



Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation

Carina Siedler

Entwicklung eines Transformationskonzepts zur Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU

Produktionstechnische Berichte aus dem FBK

Band 04/2022

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
KAISERSLAUTERN

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the Internet at <http://dnb.ddb.de>.

Produktionstechnische Berichte aus dem FBK

Wissenschaftliche Schriftenreihe des
Lehrstuhls für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation
der Technischen Universität Kaiserslautern

Herausgeber: Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation
Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich
Postfach 3049
Technische Universität Kaiserslautern
67653 Kaiserslautern

Verlag: Technische Universität Kaiserslautern

Druck: Technische Universität Kaiserslautern
Hauptabteilung 5
Abteilung 5.6 Foto-Repro-Druck

D-386

© Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, 2022
Technische Universität Kaiserslautern
Erwin-Schrödinger-Straße
67663 Kaiserslautern

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISBN 978-3-95974-185-9
ISSN 0937-9061

Entwicklung eines Transformationskonzepts zur Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Master of Science

Carina Siedler

aus

Aalen

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Juli 2022

Promotionskommission:

Vorsitzende: Prof. Dr.-Ing. Kristin de Payrebrune

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Jens C. Göbel

Kaiserslautern, 2022

D 386

Vorwort des Verfassers

*"Change is the law of life
and those who look only to the past or present
are certain to miss the future."
/John F. Kennedy/*

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation der Technischen Universität Kaiserslautern (FBK).

Danken möchte ich an dieser Stelle Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich für die Möglichkeit, meine Dissertation am FBK anzufertigen und die Möglichkeit für die vielfältigen Projekte, die ich im Rahmen meiner Beschäftigung als wissenschaftliche Mitarbeiterin bearbeiten durfte. Weiterhin danke ich Prof. Dr.-Ing. Jens C. Göbel für das Interesse an meiner Arbeit und die Bereitschaft zur Übernahme der Berichterstattung. Prof. Dr.-Ing. Kristin de Payrebrune gilt mein herzlicher Dank für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Besonders danken möchte ich meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am FBK, die während meiner Zeit am FBK für eine motivierende und angenehme Arbeitsatmosphäre gesorgt haben. Besonders danken möchte ich Frau Dr.-Ing. Chantal Sinnwell und Frau Tabea Kruppa für die Übernahme des Lektorats meiner Dissertation und dafür, dass sie mir als Freunde während meiner Zeit am FBK und darüber hinaus zu Seite gestanden haben. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Pascal Langlotz, Herrn Dr.-Ing. Hermann Meissner und Frau Dr.-Ing. Gülsüm Mert für die konstruktiven Diskussionen im Themenfeld Cyber-Physische-Produktionssysteme, aber auch darüber hinaus, bedanken. Ich danke Frau Rosemarie Schleret, Frau Seher Tuncay und Frau Marion Teubner für die organisatorische Unterstützung und dafür, dass sie für alle wissenschaftlichen MitarbeiterInnen ein offenes Ohr haben. Zudem möchte ich mich bei Herrn Lucas Hartmann für den IT-technischen Support bedanken.

Über den Lehrstuhl hinaus möchte ich mich insbesondere bei Herrn Stefan Braun und Herrn Felix Batzler von der Braun Maschinenbau GmbH, sowie bei Frau Stephanie Dupont vom Institut für Technologie und Arbeit (ITA) und bei den Projektpartnern für die Zusammenarbeit im Verbundforschungsprojekt InAsPro sowie die bereichernden Gespräche und Diskussionen bedanken. Ein besonderer Dank geht an Prof. Dr.-Ing. Horst Nespeta von der Hochschule Aalen, der mich seit Beginn meines Studiums gefordert und gefördert hat und mir seitdem mit Rat und Tat zur Seite stand.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich stets ermutigt hat, meinen Weg zu gehen und meinen Träumen zu folgen. Vielen Dank für eure Geduld, eure Unterstützung und euren Rückhalt, welcher mir durch alle Höhen und Tiefen geholfen hat.

Kaiserslautern, im Juli 2022

Carina Siedler

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	IV
Abstract	V
Abkürzungen	VI
1 Einleitung und Motivation	1
2 Stand von Wissenschaft und Technik	3
2.1 Schlüsselbegriffe	3
2.1.1 Charakteristika von produzierenden kleinen und mittleren Unternehmen (KMU).....	3
2.1.2 Digitalisierung und Industrie 4.0 (I4.0).....	4
2.1.3 Digitale Transformation	5
2.1.4 Produktionssystem und CPPS	7
2.1.5 Technologietrends und Digitale Technologien	9
2.2 Bestehende Transformationsansätze zur Digitalisierung von Unternehmen.....	11
2.2.1 Allgemeine Ansätze zur Digitalen Transformation produzierender Unternehmen	11
2.2.2 Ansätze zur Digitalisierung von Produktionssystemen.....	20
2.3 Kernbestandteile von Transformationskonzepten zur Digitalisierung	27
2.3.1 Technische und organisatorische Herausforderungen für KMU.....	27
2.3.2 Aufbau der Transformationskonzepte	28
2.3.3 Referenzmodelle von CPPS	31
2.3.4 Reifegradmodelle zur Bestimmung des Digitalisierungsgrads	33
2.3.5 Technologietrends der Digitalisierung und I4.0.....	37
2.3.6 Identifikation und Implementierung digitaler Technologien	38
2.3.7 Kennzahlen zur Kontrolle des Fortschritts der Digitalisierung von Produktionssystemen.....	41
2.4 Bewertung und Fazit zum Stand von Wissenschaft und Technik	42
2.4.1 Anforderungen an ein Konzept zur Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU	42
2.4.2 Fazit zum Stand von Wissenschaft und Technik	47
3 Zielsetzung und Aufgabenstellung	49
3.1 Ziele und Aufgabenstellung	49
3.2 Aufbau der Arbeit.....	51
4 Entwicklung eines Transformationskonzepts zur Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU	53
4.1 Überblick über das entwickelte Transformationskonzept	53
4.2 Entwicklung eines Referenzmodells zur Definition einer Digitalen Vision	57
4.2.1 Anforderungen an ein Referenzmodell	57
4.2.2 Aufbau des Referenzmodells	57
4.2.3 Nutzung des Referenzmodells zur Festlegung einer Digitalen Vision	62
4.3 Erarbeitung eines geeigneten Reifegradmodells und Integration in das Transformationskonzept.....	62
4.3.1 Bewertung bestehender Reifegradmodelle für die Nutzung im Transformationskonzept.....	63
4.3.2 Aufbau des Reifegradmodells	66
4.3.3 Identifikation von Umsetzungsmaßnahmen zur Digitalisierung von Produktionssystemen anhand der Ergebnisse der Anwendung des Reifegradmodells	68
4.4 Definition konkreter Projektziele zur Digitalisierung von Produktionssystemen... 71	
4.4.1 Auswirkungen von Reifegradindikatoren auf Kennzahlen eines Produktionssystems	71
4.4.2 Definition von Projektzielen unter Verwendung der KPIs	75

4.4.3	Anforderungen an eine digitale Technologie auf Basis der definierten Projektziele	76
4.5	Planung der einzelnen Umsetzungsprojekte	78
4.5.1	Technologieradar zur Identifikation digitaler Technologien	78
4.5.2	Auswahl geeigneter digitaler Technologien zur Zielerreichung	82
4.5.3	Aufgaben- und Zeitplanung der Umsetzungsprojekte	84
4.5.4	Risikobewertung des Umsetzungsprojekts	86
4.6	Realisierung und Steuerung des Umsetzungsprojekts	86
4.7	Prüfung der Zielerreichung des Projekts und hinsichtlich der Digitalen Vision	88
4.7.1	Evaluation des Umsetzungsprojekts	89
4.7.2	Prüfung der Zielerreichung hinsichtlich der Digitalen Vision	91
5	Softwaretechnische Umsetzung	93
5.1	Anforderungen an die softwaretechnische Unterstützung	93
5.2	Realisierung der softwaretechnischen Unterstützung	94
6	Anwendungsbeispiel	101
6.1	Beschreibung des Anwendungsbeispiels	101
6.1.1	Ausgangssituation und Zielsetzung	101
6.1.2	Anwendungsfall	102
6.2	Anwendung des Transformationskonzepts	103
6.2.1	Bestimmung einer Digitalen Vision für das Produktionssystem	103
6.2.2	Situationsanalyse im Produktionssystem mithilfe des entwickelten Reifegradmodells	104
6.2.3	Definition konkreter Projektziele zur Digitalisierung des Produktionssystems	105
6.2.4	Planung der einzelnen Umsetzungsprojekte	107
6.2.5	Realisierung und Monitoring der Umsetzungsprojekte	110
6.2.6	Prüfung der Zielerreichung hinsichtlich der Projektziele und der Digitalen Vision	110
6.3	Erkenntnisse aus der Validierung	113
7	Zusammenfassung und Ausblick	114
8	Quellenverzeichnis	119
9	Anhang	140
9.1	Übersicht existierender Transformationskonzepte	140
9.1.1	Ansätze zur Digitalisierung produzierender Unternehmen	140
9.1.2	Ansätze zur Digitalisierung von Produktionssystemen	147
9.1.3	Sonstige Ansätze	158
9.1.4	Bewertung der Transformationskonzepte	162
9.2	Herausforderungen von KMU	164
9.3	Referenzmodelle der Digitalisierung	169
9.4	Reifegradmodelle im Kontext der Digitalisierung	171
9.4.1	Bestimmung des Digitalisierungsgrads von Unternehmen	171
9.4.2	Bestimmung des Digitalisierungsgrads von Produktionssystemen	173
9.4.3	Sonstige Reifegradmodelle hinsichtlich der Digitalisierung	174
9.4.4	Sonstige Reifegradmodelle für produzierende Unternehmen	176
9.4.5	Bewertung der Reifegradmodelle	179
9.5	Entwicklung von Reifegradmodellen	180
9.5.1	Übersicht bestehender Ansätze zur Reifegradmodellentwicklung	180
9.5.2	Vorgehen zur Reifegradmodellentwicklung in dieser Dissertation	183
9.6	Technologietrends der Digitalisierung	184
9.7	Ansätze zur Bestimmung von Wechselwirkungen	186
9.8	Kennzahlen zur Zieldefinition von Projekten	188
9.8.1	Vensim TM -Modell	188

9.8.2	Kennzahlen der Kategorie „Unterstützende Elemente“	191
9.8.3	Einfluss der Reifegradindikatoren auf Kennzahlen	192

Kurzfassung

Um nachhaltig die Wettbewerbsfähigkeit zu sichern, transformieren kleine und mittlere Unternehmen mithilfe digitaler Technologien ihre bestehenden zu flexiblen und intelligenten cyber-physischen Produktionssystemen. Diese ermöglichen eine Vernetzung der Bereiche und Bestandteile des Produktionssystems sowie der Produkte und ermöglichen dadurch eine durchgängige Aufnahme, Analyse sowie den Austausch von Daten und Informationen. Die Digitalisierung ist in kleinen und mittleren Unternehmen noch nicht weit genug fortgeschritten, da sie diesbezüglich verschiedenen Herausforderungen und Unsicherheiten gegenüberstehen. Um diese Unternehmen bei der Digitalisierung ihrer Produktionssysteme zu unterstützen, wird in der Dissertation ein Transformationskonzept zur Digitalisierung des Produktionssystems von kleinen und mittleren Unternehmen entwickelt, das schrittweise durch die Digitalisierungsvorhaben führt. Dieses Konzept ermöglicht anhand eines Referenzmodells die Festlegung einer Vision für das jeweilige Produktionssystem und ermittelt dessen aktuellen Digitalisierungsgrad. Weiterhin werden digitale Technologien zur Erreichung der definierten Umsetzungsprojekte identifiziert und mithilfe von Kennzahlen zielgerichtet implementiert. Die Umsetzungsplanung sowie die Realisierung und Steuerung der Projekte werden durch Methoden und Werkzeuge des Projektmanagements unterstützt. Die Prüfung der Erreichung der Projektziele erfolgt mittels definierter Methoden und Werkzeuge und die Erreichung der Vision wird durch die erneute Anwendung des Reifegradmodells evaluiert. Das Transformationskonzept wird anhand eines weltweit agierenden mittelständischen Unternehmens im Wein- und Obstbau validiert.

Abstract

To ensure sustainable competitiveness, small and medium-sized companies are transforming their production systems into flexible and intelligent cyber-physical production systems using digital technologies. Cyber-physical production systems enable the networking of the areas and components of the production systems itself as well as the products, thus providing continuous recording, analysis and exchange of data and information. Digitalization has not yet progressed far enough in small and medium-sized companies, as they are facing various challenges and uncertainties. To support these companies in the digitalization of their production systems, the doctoral thesis develops a transformation concept for the digitalization of the production system of small and medium-sized companies, which leads step-by-step through the relevant projects. The transformation concept enables the definition of a vision for the production system by means of a reference model and measures the production system's current degree of digitalization. Furthermore, digital technologies are identified and implemented through key performance indicators to achieve the defined (sub-) projects. The implementation planning as well as the realization and control of the projects are supported by methods and tools of project management. The verification of the project goals' implementation is carried out by means of defined methods and tools, while the achievement of the vision is evaluated by the re-application of the maturity model. This transformation concept is validated on the basis of a globally operating medium-sized company in the wine and fruit growing sector.

Abkürzungen

A	Verfügbarkeit, engl. Availability	MES	Manufacturing-Execution-System
AQT	tatsächliche Wartezeit, engl. Actual Queuing Time,	MoSCoW	Must have, Should have, Could have, Won't have
AW	Auswirkung	MTO	Mensch, Technik und Organisation
ATT	Ist-Transportzeit, engl. Actual Transportation Time	NC	numerische Steuerung, engl. Numerical Control
CAD	rechnerunterstütztes Konstruieren, engl. Computer-Aided Design	OEE	Gesamtanlageneffektivität, engl. Overall Equipment Effectiveness
CAM	rechnerunterstützte Fertigung, engl. Computer-Aided Manufacturing	PDCA	Plan, Do, Check, Act
CNC	Computerized Numerical Control	PESTEL	Political, Economic, Social, Technological, Environmental and Legal
CPS	cyber-physisches System	P	Auftretenswahrscheinlichkeit
CPPS	cyber-physisches Produktionssystem	PQ	produzierte Menge, engl. Produced Quantity
DMM	Domain-Mapping-Matrix	PPS	Produktionsplanung und -steuerung
ERP	Enterprise-Resource-Planning	PRI	geplante Durchlaufzeit pro Artikel, engl. Planned Runtime Per Item
GP	Gutteile, engl. Good Parts	PSS	Produkt-Service-System
GPS	ganzheitliches Produktionssystem	RFID	Radio-Frequency Identification
GQ	Anzahl an Gutteilen, engl. Good Quantity	SMART	Spezifisch, Messbar, Aktivierend, Realistisch, Terminiert; engl. Specific, Measurable, Attainable, Relevant und Time-bound
I4.0	Industrie 4.0	SMED	Single Minute Exchange of Dies
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien	SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
IT	Informationstechnologie	T-O-P	Technik, Organisation und Personal
KPI	Kennzahl, engl. Key Performance Indicator		
KMU	kleine und mittlere Unternehmen		
M2M	Maschine-zu-Maschine, engl. Machine-to-Machine		

Genannte (Verbund-) Forschungsprojekte:

ADAPTION	Verbundforschungsprojekt „Migration zum cyber-physischen Produktionssystem“
CyProAssist	Verbundforschungsprojekt „Fertigungsassistenzsystem unter Verwendung soziocyber-physischer Produktionssysteme“
DigiKMU	Verbundforschungsprojekt „Entwicklung einer Methode zur Unterstützung von KMU im Maschinen- und Anlagenbau bei der Umsetzung von Industrie 4.0 im Bereich der CAD-CAM-NC-Verfahrenskette“
InAsPro	Verbundforschungsprojekt „Integrierte Arbeitssystemgestaltung in digitalisierten Produktionsunternehmen“
Intro 4.0	Verbundforschungsprojekt „Befähigungs- und Einführungsstrategien für I4.0“
MetamoFAB	Verbundforschungsprojekt „Metamorphose zur intelligenten und vernetzten Fabrik“
MyCPS	Forschungsprojekt „Migrationsunterstützung für die Umsetzung menschenzentrierter Cyber-Physical Systems“
STEPS	Verbundforschungsprojekt „Sozio-Technische Gestaltung und Einführung Cyber-Physischer Produktionssysteme in nicht forschungs- und entwicklungsintensiven Unternehmen“

1 Einleitung und Motivation

Die Digitalisierung verändert die Gesellschaft, Wirtschaft und Politik [BMWi16b]: Alle Lebensbereiche werden von Informations- und Kommunikationstechnologien über physische, digitale sowie biologische Grenzen hinweg [Schw17a] durchdrungen und miteinander vernetzt [BMWi17]. Die Digitalisierung ermöglicht anhand des Einsatzes digitaler Technologien das Sammeln und Analysieren von Informationen und Daten in Echtzeit sowie dadurch eine autonome und regelbasierte Entscheidungsfindung [BMWi17]. Diese rasante Entwicklung verändert auch die zukünftige Herstellung von Produkten sowie die Arbeitsweise entlang der Wertschöpfungskette in produzierenden Unternehmen [BMWi18].

Die Digitalisierung als stärkste Triebkraft des industriellen Wandels im 21. Jahrhundert [Stec18] führte zur 4. Industriellen Revolution [Mono16]. Ein genauere Blick auf die Organisations- und Prozessstrukturen produzierender Unternehmen zeigt allerdings, dass die Realisierung der digitalen Potenziale schwierig ist, da die Digitalisierung in allen Abteilungen eines Unternehmens umgesetzt werden muss und somit entsprechende vielfältige Abhängigkeiten bestehen. Zum einen haben kleine und mittlere Unternehmen (KMU) in Deutschland die von der 3. industriellen Revolution angestrebten Technologien und Prozesse bisher kaum vollständig erfasst und somit noch keine Grundlagen für die Einführung der Digitalisierung geschaffen [Qin16]. Zum anderen geht das Erkennen eines Digitalisierungsbedarfs stets mit der herausfordernden Aufgabe einher, die für die Bedürfnisse eines Unternehmens am besten geeigneten digitalen Technologien zu ermitteln, die aus einer großen Auswahl oft investitionsintensiver Optionen ausgewählt werden müssen [Jäge16]. Die Bewältigung dieser Aufgabe ist von entscheidender Bedeutung, da nur eine ziel- und bedarfsgerechte Implementierung digitaler Technologien den zukünftigen Geschäftserfolg eines Unternehmens sichern kann; dies sollte sowohl mit einer Transformation der bestehenden Organisationsstrukturen und -prozesse [Telu18] als auch einer Beteiligung der Mitarbeiter einhergehen [Krug18], [Bene17].

Produzierende Unternehmen sind in hohem Maße auf digitale Technologien angewiesen. Die signifikante Vielfalt digitaler Technologien, z. B. Radio-Frequency Identification, Augmented Reality, Internet der Dinge oder Produkt-Service-Systeme [Auri16] ermöglicht es Unternehmen, ihre konventionellen in flexible und intelligente Systeme umzuwandeln, sog. cyber-physische Systeme, die miteinander und mit ihrer Umgebung verbunden sind [Weid15]. Eine Kombination autonomer und kooperativer Elemente und Subsysteme, z. B. cyber-physischer Systeme, Mensch-Maschine-Interaktionen, Maschine-Maschine-Interaktionen sowie intelligenter Produkte innerhalb der Produktion, führt zu cyber-physischen Produktionssystemen [Mono16]. Im Ergebnis gestaltet die Digitalisierung das Produktionssystem und dessen Prozesse agiler sowie effizienter und die Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungskette einfacher [Issa17].

KMU stellen mit 99,3 % (\cong 2,5 Millionen) aller Unternehmen in Deutschland den Großteil der deutschen Wirtschaft dar [Stat19]. Die Digitalisierung ist bei ihnen in vielen Fällen noch nicht weit genug fortgeschritten [Schö18b], allerdings wurden viele Chancen erkannt, denen jedoch auch einige Herausforderungen gegenüberstehen. Eine systematische Herangehensweise zur Digitalisierung von Unternehmen und speziell von Produktionssystemen ist für kleine und mittlere Unternehmen essenziell, da nur dadurch wesentliche Unsicherheiten sowie finanzielle Risiken verringert werden können [Hölz20]. Darüber hinaus können auch Fehlinvestitionen, die

kleine und mittlere Unternehmen in ihrem Handeln nachhaltig einschränken, reduziert werden [Fisc20].

Um den Herausforderungen der Digitalisierung zu begegnen, wird in der vorliegenden Dissertation ein Transformationskonzept zur Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU entwickelt. Damit eine unternehmensindividuelle Digitalisierung in diesem Kontext erreicht werden kann, werden bezüglich der Anwendung des Transformationskonzepts technische und organisatorische Herausforderungen, der individuelle Digitalisierungsgrad, definierte Kennzahlen sowie die Identifikation und zielgerichtete Implementierung geeigneter digitaler Technologien berücksichtigt. Dabei erfolgt innerhalb des Transformationskonzepts zunächst anhand eines Referenzmodells der Digitalisierung die Entwicklung eines Zielbildes des zu digitalisierenden Produktionssystems. Das im Rahmen der vorliegenden Dissertation entwickelte Reifegradmodell dient zur Bewertung des Istzustands der Digitalisierung im Produktionssystem und zur entsprechenden Auswahl digitaler Technologien. Die Identifikation geeigneter Technologien wird im Transformationskonzept durch Methoden der Technologiefrüherkennung unterstützt, indem ein Technologieradar gebildet wird. Zur Vermeidung von Fehleinschätzungen aufgrund von Insellösungen werden Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen digitalen Technologien identifiziert. Die anschließende Implementierung ausgewählter digitaler Technologien erfolgt auf Basis des unternehmensindividuellen Digitalisierungsgrades des Produktionssystems sowie festgelegter, messbarer Kennzahlen. Diese Kennzahlen quantifizieren die Auswirkungen der Digitalisierung im Zuge der zielgerichteten Implementierung digitaler Technologien. Dies stellt eine unternehmensindividuelle Problemlösung und eine damit einhergehende sukzessive Implementierung in beherrschbaren Teilschritten sicher. Darüber hinaus unterstützen die Kennzahlen die Bewertung der Zielerreichung sowohl hinsichtlich des Referenzmodells der Digitalisierung als auch der Zieldefinition des Umsetzungsprojekts. Die Umsetzung der definierten Projekte zur Erreichung des Zielbildes basiert dabei auf bekannten Methoden des Change- und Projektmanagements, um so die Anwendung für kleine und mittlere Unternehmen zu erleichtern.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Kapitel 2 beschreibt den Stand von Wissenschaft und Technik; der Aufbau ist in Abbildung 2-1 dargelegt. Im ersten Schritt werden die für die vorliegende Dissertation relevanten Schlüsselbegriffe erläutert und anschließend bestehende Ansätze zur Digitalisierung von Unternehmen und Produktionssystemen vorgestellt. Daraufhin werden mögliche Bestandteile eines zu entwickelnden Transformationskonzepts betrachtet, z. B. der allgemeine Aufbau oder auch die Verwendung von Reifegradmodellen. Nachfolgend werden Anforderungen an ein Transformationskonzept zur Digitalisierung eines Produktionssystems von kleinen und mittleren Unternehmen abgeleitet sowie untersucht. Das Kapitel schließt mit einer Bewertung des Stands von Wissenschaft und Technik sowie einem Fazit.

Kapitel 1 Einleitung und Motivation
Kapitel 2 Stand von Wissenschaft und Technik
2.1 Schlüsselbegriffe
2.2 Bestehende Transformationsansätze zur Digitalisierung von Unternehmen
2.3 Kernbestandteile von Transformationskonzepten zur Digitalisierung
2.4 Bewertung und Fazit zum Stand von Wissenschaft und Technik
Kapitel 3 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Abbildung 2-1: Kapitelübersicht – Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Schlüsselbegriffe

Nachfolgend werden die für die vorliegende Dissertation relevanten Schlüsselbegriffe erläutert. Zunächst wird der Begriff „kleine und mittlere Unternehmen“ genauer betrachtet, bevor in Kapitel 2.1.2 ‚Digitalisierung‘ und ‚Industrie 4.0‘ sowie in Kapitel 2.1.3 deren Zusammenhang mit der ‚Digitalen Transformation‘ beschrieben werden. In Kapitel 2.1.4 werden anschließend ‚cyber-physische Produktionssysteme‘ und in Kapitel 2.1.5 die zur Implementierung notwendigen ‚digitalen Technologien‘ definiert.

2.1.1 Charakteristika von produzierenden kleinen und mittleren Unternehmen (KMU)

KMU bilden mit einem Anteil von 99,3 % (\cong 2,5 Millionen Unternehmen) aller Unternehmen den Großteil der deutschen Wirtschaft ab [Stat19]. Sie können durch qualitative und quantitative Merkmale unterschieden werden [Beck20]. Die qualitativen Merkmale beziehen sich auf die Eigentums-, Haftungs- und Führungsstruktur des Unternehmens, während die quantitativen Merkmale die Beschäftigtenanzahl und den Jahresumsatz berücksichtigen (Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Definition des Mittelstandes nach [Euro03] und [Beck11]

Unternehmensgröße	Definition der EU-Kommission [Euro03]		EFAM [Beck11]	
	Beschäftigte	Jahresumsatz	Beschäftigte	Jahresumsatz
Kleinstunternehmen	bis ca. 10	bis ca. 2 Mio. EUR	bis ca. 30	bis ca. 6 Mio. EUR
Kleine Unternehmen	bis ca. 50	bis ca. 10 Mio. EUR	bis ca. 300	bis ca. 60 Mio. EUR
Mittlere Unternehmen	bis ca. 250	bis ca. 50 Mio. EUR	bis ca. 3.000	bis ca. 600 Mio. EUR
Große Unternehmen	250 und mehr	ab ca. 50 Mio. EUR	3.000 und mehr	ab ca. 600 Mio. EUR

Die Definition des Europäischen Forschungsfeldes für Angewandte Mittelstandsforschung (EFAM) kombiniert quantitative und qualitative Merkmale [Beck11]. Als Grundlage der Dissertation dient allerdings die rein quantitative Definition der EU-Kommission, da diese eine landesweite Gültigkeit besitzt [Euro03].

Produzierende Unternehmen werden in der Wirtschaftsstatistik als ‚verarbeitendes Gewerbe‘ bezeichnet [Bund16a]. Hierzu zählen das Grundstoff- und Produktionsgütergewerbe, die Herstellung von Investitions- und Verbrauchsgütern sowie das Nahrungs- und Genussmittelgewerbe [Bund16b]. Die Wirtschaftsstatistiken unterscheiden nicht weiter nach Wirtschaftszweigen wie etwa Maschinenbau, Metallherzeugung oder -verarbeitung. Ungefähr 200.000 Unternehmen in Deutschland sind im verarbeitenden Gewerbe tätig. Davon zählen ca. 185.000 ($\cong 97\%$) zu den KMU. Sie erwirtschaften einen Jahresumsatz von ca. 422 Mio. Euro, was ca. 19 % des Jahresumsatzes aller deutschen Unternehmen im verarbeitenden Gewerbe entspricht. KMU beschäftigen insgesamt ca. 3,1 Mio. Mitarbeiter/innen, was somit 42 % aller Mitarbeiter/innen der deutschen Unternehmen im verarbeitenden Gewerbe entspricht [Stat19]. Anhand dieser Statistik ist nicht ersichtlich, welche Definition für KMU als Basis herangezogen wird. Die Statistik zeigt dennoch auf, dass produzierende KMU zwar den Großteil der deutschen Unternehmenslandschaft repräsentieren, ihr Jahresumsatz und somit ihre finanziellen Ressourcen aber vergleichsweise gering sind.

2.1.2 Digitalisierung und Industrie 4.0 (I4.0)

Digitalisierung beschreibt im Allgemeinen die Umwandlung analoger Werte in digitale Formate, die sich mithilfe der Informationstechnik sammeln, auswerten und interpretieren lassen [Hipp18], [Core17], [Dier17]. Eine weitere Bedeutung der Digitalisierung ist die digitale Revolution bzw. Transformation: Damit ist ein kontinuierlicher Veränderungsprozess in der Industrie, Kultur, Bildung und Politik gemeint, der durch den zunehmenden Einsatz digitaler Technologien ausgelöst wird [Hirs17], [Hirs16]. Deren Verwendung kann Disruptionen in Unternehmen und Organisationen auslösen, die strategische Reaktionen erfordern und bspw. zur Änderung von Wertschöpfungswegen führen können. Gleichzeitig versuchen die Unternehmen und Organisationen, die strukturellen Veränderungen zu bewältigen, die sich aus den positiven sowie negativen Folgen des kontinuierlichen Veränderungsprozesses durch Digitalisierung ergeben [Vial19].

Die **Digitalisierung der Wertschöpfung** in der Industrie basiert auf selbstorganisierenden und echtzeitfähigen Systemen [Baue14b]. Sie ermöglicht eine starke Individualisierung der Produkte unter den Bedingungen einer hoch flexibilisierten Produktion. Das Zukunftsprojekt I4.0 zielt darauf ab, die deutsche Industrie an diese Zukunft der Produktion anzupassen [Fede16].

Trotz kontroverser Diskussionen und vielfältiger Publikationen zum Begriff **I4.0** wurde dieser noch nicht eindeutig definiert [Tsch15]. Jedoch gibt es einige Ansätze zur Begriffsklärung: So kann die I4.0 beschrieben werden als Zusammenschluss von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) mit einem Produktionssystem [Luka14] oder als umfassende „intelligente Vernetzung aller Akteure innerhalb der Wertschöpfungsketten [...] und die vollständige Digitalisierung relevanter Informationen“ [Seit16]. Beiden Varianten ist gemein, dass die I4.0 durch **cyber-physische Systeme (CPS)** realisiert werden kann (Abbildung 2-2) [Meis17]: Sie beinhaltet die Nutzung von CPS in der Produktion [Kage13], die die Vernetzung der Systemelemente von Produktionssystemen ermöglicht [Send13] sowie zur Verbindung der virtuellen

und der realen Welt führt [Uhl15]. Diese intelligenten und vernetzten Systeme schaffen somit eine Grundlage für die Kommunikation und Kooperation zwischen Menschen, Maschinen, Anlagen, Logistik und Produkten entlang der Wertschöpfungskette [BMWi18]. Dabei schließt die I4.0 den gesamten Lebenszyklus eines Produktes von der Entwicklung über die Fertigung, Nutzung und Wartung bis hin zum Recycling ein [Plat17]. Somit ergibt sich ein intelligentes Produktionssystem mit effizienteren Prozessen, ein cyber-physisches Produktionssystem (CPPS), das intelligente Produkte und Dienstleistungen ermöglicht [Seit16]. Beispielsweise kann die I4.0 zu einer Kombination aus technischen Sach- und Serviceprodukten zu sog. Produkt-Service Systemen 4.0 (PSS 4.0) führen [Auri16].

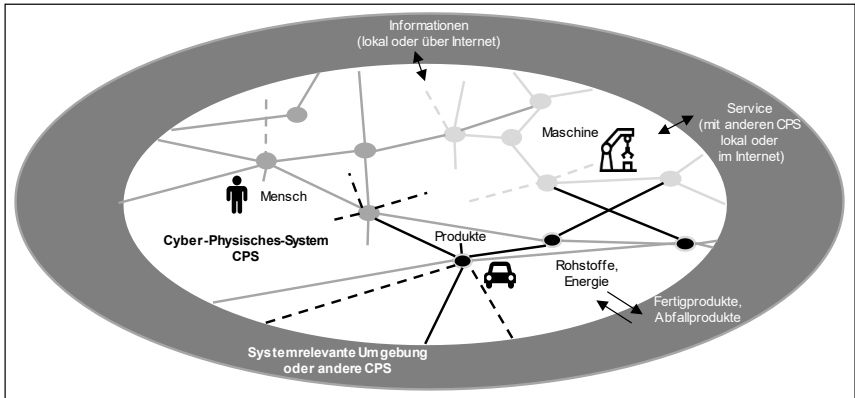


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung eines cyber-physischen Systems [Wilm13]

2.1.3 Digitale Transformation

Unter einer Transformation wird der **Prozess der Veränderung** oder auch die Umgestaltung einer Unternehmensform vom aktuellen Istzustand hin zu einem angestrebten Sollzustand in der nahen Zukunft verstanden [Deur00]. Sie bedeutet einen fundamentalen und dauerhaften Wandel [Groß96], dessen Bandbreite durch das Schichtenmodell der Transformation (Abbildung 2-3) aufgezeigt werden kann [Krüg94].

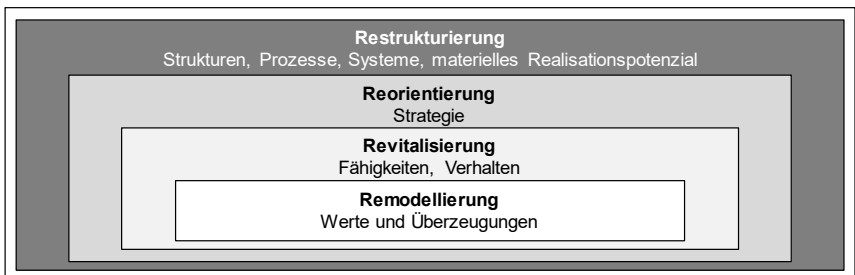


Abbildung 2-3: Schichtenmodell des Wandels bzw. der Transformation nach [Krüg84]

Dabei werden anhand einer ‚Restrukturierung‘ Veränderungen von Strukturen, Prozessen und Systemen im Unternehmen vorgenommen, wie bspw. die Einführung einer neuen Geschäftsorganisation. Die ‚Reorientierung‘ zielt auf die Veränderung der Unternehmensstrategie ab, die

durch das Erschließen neuer Geschäftsfelder durch die Umgestaltung der Produktportfolios erreicht werden kann. Die dazu nötige signifikante Veränderung der personellen Fähigkeiten und des Führungsverhaltens wird durch den Begriff der ‚Revitalisierung‘ beschrieben. Beispiele hierfür sind ein Hierarchieabbau oder die Ermächtigung der Mitarbeiter zur selbstständigen Entscheidungsfindung. Die am tiefsten reichende Veränderung wird im Rahmen der ‚Remodelierung‘ vorgenommen, des Wandels der Werte und Überzeugungen, die in der Unternehmenskultur verankert sind [Deur00].

Ursachen für eine Transformation sind bspw. veränderte Umfeldanforderungen an das Unternehmen, eine steigende oder gar höhere Wettbewerberskompetenz, bestehende Geschäftsprobleme oder die Möglichkeit der Problemlösung. Die Umsetzung der Transformation wird hierbei u. a. vorangetrieben durch Nutzenpotenziale für das Unternehmen oder die Option des Aufbaus und der Erweiterung von Kompetenzen, sowohl der Mitarbeiter als auch der unternehmensspezifischen Kernkompetenzen. Weiterhin sind auch Flexibilität sowie die Förderung von Innovationsprozessen Treiber der Transformation [Groß96].

Für den Begriff der **Digitalen Transformation** existiert derzeit keine allgemeingültige Definition [Vial19], [Scha16]. Einen Ansatz liefern BOWERSOX et al., allerdings wird darin die Digitale Transformation als ‚Digital Business Transformation‘ verstanden, die das Vorgehen bezeichnet, ein Unternehmen neu zu definieren, um so Prozesse und Tätigkeiten zu digitalisieren und ein erweitertes Wertschöpfungsnetzwerk zu aufzubauen. Dabei ist die Digital Business Transformation die Umwandlung der Geschäftstätigkeiten im Rahmen der industriellen ins informationstechnische Zeitalter durch die Neudefinition von Tätigkeiten, Prozessen und Beziehungen unter Zuhilfenahme von Informationstechnologien [Bowe05]. Eine andere Begriffsbestimmung beschreibt die Digitale Transformation als Einsatz innovativer Technologien zur radikalen Neugestaltung von Betriebsprozessen, Kundenerlebnissen und Geschäftsmodellen mit dem Ziel der Erhöhung der Leistung und Reichweite eines Unternehmens [MIT11]. Die Definitionsansätze fokussieren den gezielten Einsatz von Technologien zur Umsetzung der Digitalen Transformation im Wertschöpfungsnetzwerk. Alternativ kann die Digitale Transformation auch als eine bewusste strategische bzw. taktische fortlaufende digitale Evolution eines Unternehmens oder lediglich eines Prozesses verstanden werden. Dabei steht nicht nur ein einzelner Bereich im Fokus, sondern wie auch bei den vorangegangenen Definitionen das gesamte Wertschöpfungsnetzwerk [Mazz14]. Zusammenfassend beschreibt die Digitale Transformationen, die Nutzung technologischer Potenziale, etwa IKT, zur Veränderung oder Vernetzung von Wertschöpfungsketten, -netzwerken sowie Geschäftsmodellen, sodass individuelle Kundenwünsche erfüllt und die angebotenen Leistungen effizienter bereitgestellt werden können [Scha16]. Ziel der Digitalen Transformation ist somit die Sicherstellung und Verbesserung der Wettbewerbsposition des Unternehmens [Siro20], [Wild16].

Auf Grundlage dieser Definition der Digitalen Transformation lässt sich in Kombination mit dem Begriff des Konzepts auch das Transformationskonzept eingrenzen: Generell beschreibt ein **Konzept** einen konkreten Plan oder eine Vorgehensweise zur Umsetzung eines größeren und längerfristigen Vorhabens [Scho15]. Folglich umfasst ein Transformationskonzept eine möglichst genaue Definition des Prozesses der Veränderung oder der Umgestaltung einer Unternehmensform vom aktuellen Ist- zum angestrebten Sollzustand.

2.1.4 Produktionssystem und CPPS

Das **Produktionssystem** im Allgemeinen beinhaltet nach einer systemtechnischen Definition alle Elemente und Relationen zwischen diesen Elementen, die zur vollständigen Erstellung eines Produktes notwendig sind [Klau68]. Demnach enthält ein Produktionssystem neben den Aspekten des technischen Herstellungsprozesses auch die organisatorischen Elemente zur Planung und Steuerung der Produktionsprozesses [Webe79] (nach [Ever92]).

Ganzheitliche Produktionssysteme (GPS) bestehen aus Vorgehensweisen, Methoden, Werkzeugen, Hilfsmitteln und Regeln [Spat03] [Wild05], wobei diese Elemente eines GPS in Gestaltungsfeldern zusammengefasst werden [Domb06]. Folglich ist ein GPS nicht auf die Produktion begrenzt, sondern ein methodisches Regelwerk, das für alle Prozesse im Unternehmen gilt (Abbildung 2-4). Grundsätzlich sind somit alle Kern-, Führungs- und Unterstützungsprozesse eingeschlossen.

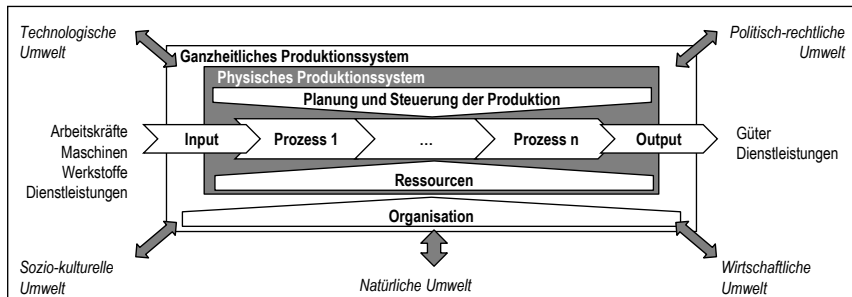


Abbildung 2-4: Produktionssystem [Günt12]

Das **physische Produktionssystem** hingegen beinhaltet die Planung und Steuerung der Produktion, alle erforderlichen Prozesse zur Herstellung eines Guts oder einer Dienstleistung sowie alle notwendigen Ressourcen [Günt12]. Physische Produktionssysteme können durch (quasi-)statische und dynamische Elemente, sog. Prozessmerkmale, beschrieben werden. Beispiele für statische Elemente sind Grundstücke, Gebäude und Ausrüstung. Dynamische Elemente (Flusselemente) wiederum sind Stoffflusssysteme (Materialfluss, Fluss von Vorrichtungen, Werkzeuge, Prüfmittel, Medienfluss) oder Informationsflusssysteme [Sche14]. Diese Flusssysteme sind im Produktionssystem miteinander vernetzt. Weiterhin sind ein- oder mehrstufige Prozesse wie z. B. Fertigungsstufen sowie Verfahrensunterschiedlichkeiten Bestandteile der Prozessmerkmale. Physische Produktionssysteme sind einerseits gliederbar in Rohteilfertigung, Teilefertigung, Baugruppenmontage, Endmontage, Sonderfertigungen und Demontageprozesse sowie andererseits u. a. in Bereiche, Abschnitte, Inseln und Fraktale. Meist liegt der Hauptfokus innerhalb des Produktionssystems auf der Materialflussvernetzung sowohl zwischen einzelnen Prozessstufen als auch innerhalb der Prozessstufen zwischen verschiedenen Bearbeitungsschritten. Ebenso finden Förder-, Transport-, Lager- und Pufferprozesse sowohl innerhalb als auch zwischen den einzelnen Prozessstufen statt [Grun15].

Des Weiteren kann die Produktion als Teil des **Produktlebenszyklus** verstanden werden. Ein Produktlebenszyklus besteht aus aufeinanderfolgenden und miteinander verknüpften Schritten [Haye03] und beginnt mit der Produktidee, gefolgt von der Konstruktion, der Prozessplanung,

der Produktherstellung (bestehend aus Fertigung und Montage), der Produktnutzung und schließlich der Produktentsorgung (Abbildung 2-5) [Köls99].

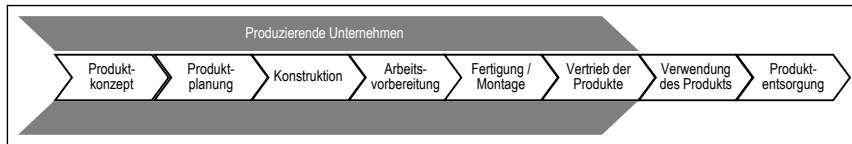


Abbildung 2-5: Produktlebenszyklus nach [Köls99], [Haye03] und [Sied21]

Im Rahmen dieser Dissertation werden die Arbeitsvorbereitung, Fertigung und Montage aus dem Produktlebenszyklus betrachtet und um die Teilaspekte nach Wiendahl erweitert [Wien14]. Dabei werden die Fertigung sowie die Montage zusammengefasst und die Bearbeitung sowie das Fügen als ‚Produktionsprozess‘ bezeichnet. Basierend darauf werden die Aufgaben der Arbeitsvorbereitung zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS) kombiniert. Weiterhin wird in der Produktion der Transport erweitert und als ‚Materialfluss‘ bezeichnet; der Lagerprozess wird separat betrachtet [Wien14]. Zur Übersicht wird nachfolgend eine nähere Abgrenzung der in der vorliegenden Dissertation verwendeten Begriffe vorgenommen:

- Die Produktion ermöglicht durch die Anwendung wertschöpfender Prozesse wie der Fertigung und Montage [Nyhu08] eine Umwandlung von Inputfaktoren, z. B. Roh- und Hilfsstoffen, zu Outputfaktoren, z. B. Produkten und Halbzeugen [Ever92]. Zur Umsetzung werden Ressourcen wie Maschinen, Menschen oder Material eingesetzt [Gute58]. Die Produktion wird in der vorliegenden Dissertation als **Produktionsprozess** bezeichnet.
- Die **PPS** umfasst alle Maßnahmen, die zur Auftragsabwicklung erforderlich sind [Ever02]. Sie ist logistisch orientiert und beinhaltet Aufträge, Mengen, Termine, Bestände und Durchlaufzeiten. Dabei können rechnergestützte Systeme eingesetzt werden, um unter Berücksichtigung von Mengen-, Termin- und Kapazitätsaspekten den Produktionsprozess zu planen, steuern und überwachen [Wien20]. Die Ziele der PPS sind Termintreue, eine hohe und gleichmäßige Kapazitätsauslastung, kurze Durchlaufzeiten sowie geringe Bestände [Ever02]. Die Produktionsplanung entspricht einer mittel- bis langfristigen Vorausplanung. Die Produktionssteuerung setzt die Vorgaben der Produktionsplanung kurzfristig um, wobei Störungen, z. B. material-, arbeits-, dispositions- oder anlagenbedingt, berücksichtigt werden müssen [Lödd16].
- Der **Materialfluss** stellt ein dynamisches Element im Produktionssystem dar. Gemäß der VDI-Richtlinie 2689 ist der Materialfluss eine „räumliche, zeitliche und organisatorische Verkettung aller Vorgänge bei der Gewinnung, Bearbeitung und Verteilung von Gütern innerhalb festgelegter Bereiche“ [VDI19]. Dazu gehören sämtliche Objekte, etwa Roh- und Hilfsstoffe, Material, Arbeitsgegenstände sowie fertige Produkte, die mit der Beschaffung, der Produktion sowie dem Vertrieb in Verbindung stehen [Mart14]. Die Objekte werden in (un-) regelmäßigen Zeitabständen mithilfe von Fahrzeugen bewegt, z. B. Gabelstaplern oder autonomen Transportmitteln [Arno09].
- Der **Lagerprozess** beschreibt das Einlagern, Lagern und Auslagern von z. B. Roh- und Hilfsstoffen, Halbzeugen sowie Produkten. Mithilfe von Transportmitteln werden die Lagereinheiten entsprechend ihren warenspezifischen Merkmalen und lagerspezifischen An-

forderungen zu ihrem Lagerplatz transportiert und eingelagert, wobei die korrekte Ausführung dieses Vorgangs (Rückmeldung, Platz und Ziel) überwacht wird [Arno08]. Der Begriff ‚Lagerung‘ bezeichnet ‚jedes geplante Liegen von Arbeitsgegenständen im Materialfluss‘ [VDI70] und stellt somit keine Aktivität dar [Wiss09], sondern vielmehr eine geplante Unterbrechung zur Zeitüberbrückung (Pufferung, Langzeitlagerung) [Arno08]. Zur Lagerung der Objekte werden Lager verwendet, die die Basis der Versorgung nachgeschalteter Systeme darstellen. Sie unterbrechen den Materialfluss im Produktionssystem. Dabei kann zwischen Eingangslager, Zwischenlager und Absatzlager unterschieden werden. Eingangslager bevorraten Materialien, die durch die zuständige Beschaffungsinstanz eingekauft und im sog. Wareneingang vorgehalten werden. Zwischenlager befinden sich im Produktionssystem und bevorraten Materialien für den Produktionsprozess. Sie können entweder direkt am Arbeitsplatz oder zwischen verschiedenen Stufen des Produktionsprozesses liegen. Das Absatzlager befindet sich im Wareneingang und kann bspw. zeitliche Unterschiede zwischen dem Produktionsprozess und dem Vertrieb ausgleichen [Schu91]. Die Auslagerung erfolgt auf Grundlage von Aufträgen. Dabei werden die Lagerstrategie, z. B. die Kommissionierung, sowie die Verfügbarkeit von Transportmitteln berücksichtigt. Existiert ein unterstützendes IT-System, so überwacht es die Durchführung der Auslagerung mittels einer entsprechenden Rückmeldung an dieses [Arno08].

Zur Umsetzung von 14.0 in produzierenden Unternehmen sind hochflexible vernetzte Produktionssysteme (CPPS) sowie neue Konzepte zur Produktionsorganisation erforderlich. CPPS bestehen aus eigenständigen und kooperativen Elementen und Subsystemen wie etwa CPS, die untereinander sowie produktionsübergreifend verbunden sind. Die Elemente handeln autonom und nehmen Informationen aus der Umgebung auf. Aufgrund der Verbundenheit der Elemente und Subsysteme im CPPS reagieren diese sowohl auf interne als auch externe Veränderungen [Mono16]. In CPPS sind intelligente Produkte eindeutig identifizierbar; ihre Historie sowie ihr aktueller Zustand sind bekannt und sie steuern sich autonom durch den Herstellungsprozess. Des Weiteren sind sie vertikal integriert und mit bspw. betriebswirtschaftlichen Prozessen innerhalb des produzierenden Unternehmens sowie horizontal mit vor- und nachgelagerten Prozessen entlang der Wertschöpfungskette vernetzt (siehe Abbildung 2-6) [Kage13].

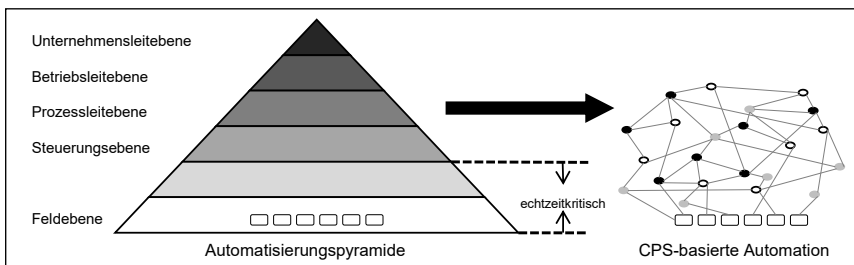


Abbildung 2-6: Vernetzte, dezentral organisierte bzw. teilweise selbstorganisierende Produktion nach [VDI13]

2.1.5 Technologietrends und Digitale Technologien

Es stellt eine Herausforderung dar, den Begriff **Trend** terminologisch und definitorisch eindeutig zu erfassen [Font13]. Im Allgemeinen bezeichnet er eine Grundentwicklung einer Zeitreihe und beschreibt eine allgemeine Bewegungsrichtung der Gesellschaft und Wirtschaft [Horx96].

Ein ‚Trend‘ kann allerdings auch als statistische Bezeichnung angesehen werden, die die Entwicklung und die zugehörige zukünftige Grundrichtung der sich verändernden Variablen und derer Beziehungen zueinander beschreibt [Hill07]. Im Zusammenhang mit Technologie bedeutet ein Trend einen Veränderungsprozess oder auch die Innovationschritte einer Technologie über einen Zeitraum [Rein12], [Durs10], indem es die Bereitstellung der benötigten Technologien (Produkt-, Produktions- und Materialtechnologien) zur richtigen Zeit und zu angemessenen Kosten sicherstellt. Im Rahmen des Zukunftsmanagements eines Unternehmens werden (Technologie-) Trends in der strategischen Früherkennung mittels Methoden des Trend-Managements analysiert. Die Analyse wird eher qualitativ in einem mittelfristigen Betrachtungshorizont durchgeführt. Dabei wird der Fokus auf das Umfeld des Unternehmens gelegt mit dem Ziel der Orientierung und der Erkenntnisgewinnung [Sieb06].

Als Teil des strategischen Managements [Papp84] thematisiert das **Technologiemanagement** die Planungsaktivitäten zur langfristigen Sicherung und Stärkung der Marktposition eines Unternehmens, indem es technologisches Wissen zur Verfügung stellt und nutzt [Rohr07]. Es ist notwendig, regelmäßig zu überprüfen, ob die im Unternehmen implementierten Technologien weiterhin aktuelle und zukünftige Anforderungen erfüllen [Rein12] und somit zu einer verbesserten Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens beitragen [Guda17]. Dabei fokussiert das Technologiemanagement innerbetriebliche Aspekte, die in Unternehmensprozesse, -entwicklung und -struktur aufgeteilt sind [Schu11].

Eine **Technologie** bildet im traditionellen Sinn sowohl die Wissensbasis zur Problemlösung als auch den zugehörigen Lösungsweg selbst ab [Schu11]. Dabei werden die naturwissenschaftlich-technischen Zusammenhänge zur technischen Problemlösung dargestellt, sodass die Technologie als Grundlage zur Entwicklung von Produkten, Prozessen und Verfahren herangezogen werden kann [Cors17], [Bull94]. Das entstehende Resultat wird als ‚Technik‘ bezeichnet und besteht aus einer konkreten Anwendung einer oder mehrerer Technologien zur Problemlösung [Wolf91]. Das integrative Begriffsverständnis der Technologie sieht keine strikte Trennung von Technologie und Technik vor [Schu11], sondern versteht Technik als Untersystem der Technologie [Bind96]. Demnach beinhaltet eine Technologie das Wissen, die Kenntnisse und die Fertigkeiten, die zur technischen Problemlösung benötigt werden. Darüber hinaus umfasst sie Anlagen, Maschinen, Prozesse und Verfahren zur praktischen Umsetzung der gewonnenen naturwissenschaftlichen Erkenntnisse [Schu11].

Nach BISCHOFF et al. dienen **digitale Technologien** der Erfassung, der Überführung und der Integration analoger Größen (z. B. von Daten, Dokumenten und Prozessen) in rechnergestützte (digitale) Werte, deren digitale bzw. elektronische Übermittlung sowie elektronische Speicherung und/oder digitale Weiterverarbeitung [Bisc15]. Digitale Technologien können durch das Schichtenmodell nach FLEISCH bzw. SEITER beschrieben werden. Dabei können digitale Technologien aus physischen und/oder digitalen Komponenten bestehen, die beim Übergang von der physischen zur digitalen Welt mit dem Internet verbunden werden [Seit16], [Flei15]. Nach SIEDLER et al. bestehen digitale Technologien aus einer physischen Komponente und einem eingebetteten System (Abbildung 2-7). Die physische Komponente kann mechanisch, elektronisch oder mechatronisch sein [Seit17]. Das eingebettete System umfasst Softwaresysteme sowie spezifische Schnittstellen für die Interaktion mit der Umgebung, z. B. Sensoren und Aktoren, und wird in digitale Netzwerke integriert [Lee12], [Broy10]. Der Softwareteil der digitalen Technologie kann auch analytische Fähigkeiten zur Auswertung von Sensordaten enthalten und

verwertbare Informationen liefern [Seit17]. Beispiele für digitale Technologien sind fahrerlose Transportsysteme [Seit17], Augmented Reality oder Radio-Frequency Identification (RFID) [Sied19b]. Zwei oder mehr digitale Technologien bilden ein CPS [Broy10]. Ein FTS selbst ist eine digitale Technologie, die aus physischen Komponenten, Sensoren und Aktoren sowie einer Verbindung mit dem Internet besteht. In Kombination mit einer anderen digitalen Technologie, etwa einem Computer, tauscht das FTS Daten und Informationen, z. B. Logistik- und Standortdaten, bidirektional aus. Daraus ergibt sich ein CPS, da zwei digitale Technologien miteinander interagieren [Sied20d].

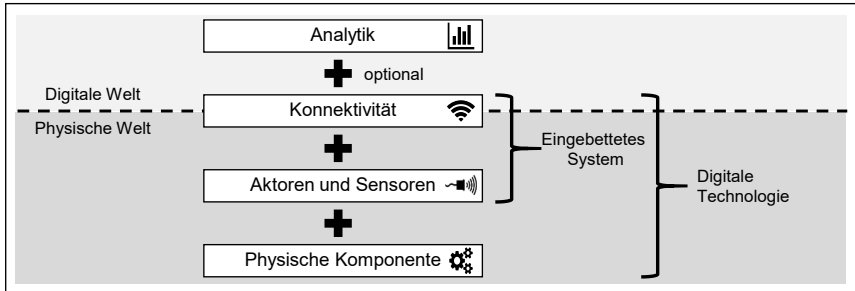


Abbildung 2-7: digitale Technologie nach [Sied20d]

2.2 Bestehende Transformationsansätze zur Digitalisierung von Unternehmen

Im Folgenden wird ein Auszug der für die vorliegende Dissertation relevantesten bestehenden Transformationsansätze dargestellt, die produzierende Unternehmen allgemein (Kapitel 2.2.1) betrachten. Weitere Ansätze, die sich auf produzierende Unternehmen oder ein Produktionssystem beziehen, sowie sonstige Transformationsansätze zur Digitalisierung von Unternehmen, die für diese Arbeit weniger relevant sind, werden in Kapitel 9.1 im Anhang aufgezeigt.

2.2.1 Allgemeine Ansätze zur Digitalen Transformation produzierender Unternehmen

Im Folgenden wird eine Auswahl an Ansätzen zur ganzheitlichen Digitalen Transformation produzierender Unternehmen vorgestellt. Diese Ansätze beschreiben u. a. Vorgehensweisen und Modelle, die die Digitale Transformation von Unternehmen im Allgemeinen unterstützen und dabei mehrere Unternehmensbereiche gleichzeitig betrachten. Weitere bestehende Ansätze werden in Kapitel 9.1.1 erläutert.

Capgemini Consulting Industry 4.0 Framework

Das Capgemini Consulting Industry 4.0 Framework von BECHTHOLD ET AL. dient als Referenzmodell und basiert auf digitalen Technologien, die die Fusion zwischen der physischen und der virtuellen Welt zu CPS ermöglichen und dadurch Optionen für Unternehmen eröffnen (Abbildung 2-8, oben). Digitale Technologien führen zu ‚Wachstumstreibern‘ und ‚Leistungstreibern‘, die z. B. durch intelligente Lösungen oder eine intelligente Fabrik realisiert werden können. Das zugehörige ‚agile Betriebsmodell‘ eröffnet anhand einer zielgerichteten Steuerung und der Einbindung des ‚Menschen, der Führung & der Veränderung‘ sowie der ‚Governance &

Prozesse' eine umfassende Unternehmenstransformation. Aus einer zielgerichteten Datenaufnahme, -verarbeitung und -analyse im Rahmen der ‚digitalen Infrastruktur‘ resultieren neue Geschäftsmodelle und Serviceangebote [Bech14].

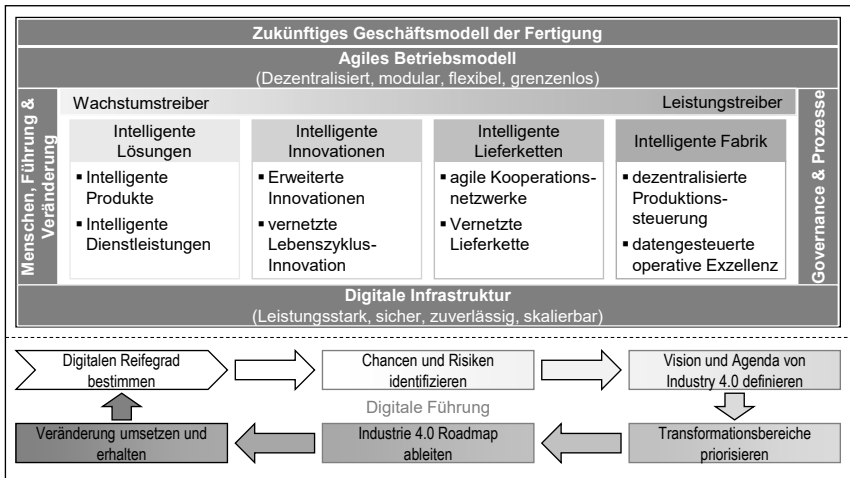


Abbildung 2-8: Capgemini Consulting Industry 4.0 Framework (oben) und Vorgehensweise zur Digitalen Transformation (unten) nach [Bech14]

Die entsprechende iterative Vorgehensweise zur Realisierung des Frameworks besteht aus sechs Schritten (Abbildung 2-8, unten). Im ersten Schritt wird mittels eines Reifegradmodells der aktuelle Stand des Unternehmens hinsichtlich der Digitalisierung bestimmt. Anschließend können auf Basis der Ergebnisse Möglichkeiten und Risiken der I4.0 im Unternehmensumfeld identifiziert werden. Anhand dieser Analysen können Unternehmen eine Vision und eine Strategie für ihre Digitalisierung erstellen. Daraufhin wird festgelegt, welche Bereiche im Unternehmen zuerst digitalisiert werden. Auf Basis der Strategie und der Priorisierung kann nun eine unternehmensindividuelle Roadmap erstellt werden. Im Rahmen der Implementierung werden nicht nur digitale Technologien eingeführt, sondern es wird darüber hinaus die Unternehmenskultur weiterentwickelt. Die Vorgehensweise zur Digitalen Transformation muss kontinuierlich angepasst werden, da digitale Technologien eine hohe Innovationsrate besitzen und somit schnell weitere Möglichkeiten der Digitalisierung zur Verfügung stehen [Bech14].

Roadmap I4.0 nach SEITER ET AL.

Der Ansatz „Roadmap I4.0“ hat zum Ziel, I4.0 in der betrieblichen Praxis in vier Phasen umzusetzen (Abbildung 2-9) [Seit17]. In der ersten Phase wird mithilfe eines Fragebogens, des sog. ‚Quick-Check 4.0‘, eine Bestandsaufnahme durchgeführt. Im Rahmen des Quick-Check 4.0 werden sowohl eine interne als auch eine externe Perspektive eingenommen. Für die interne Perspektive wird das Instrument des Business Model Canvas eingesetzt und für die externe die Political-Economic-Social-Technological-Environmental-and-Legal-(PESTEL-)Analyse verwendet (siehe hierzu bspw. [Büsc19]). Die Ergebnisse werden in einer Strengths-Weaknesses-Opportunities-and-Threats-(SWOT-) Analyse (siehe hierzu bspw. [Leig10]) zusammengeführt. In der zweiten Phase werden die I4.0-Potenziale des Unternehmens basierend auf einem Schichtenmodell von I4.0-Technologien und des Business Model Canvas sowie der

SWOT - Analyse identifiziert. Im Zuge der dritten Phase werden zunächst Bewertungskriterien festgelegt, die die Umsetzbarkeit sowie wirtschaftliche Aspekte der I4.0-Potenziale beschreiben und anschließend in einem Bewertungskatalog zusammengefasst werden. Die Ergebnisse dieser Bewertung werden in einer Potenzial-Matrix visualisiert und davon drei bis fünf erfolgsversprechende I4.0-Potenziale ausgewählt. Mithilfe dieser sog. ‚Enabler 4.0‘ werden die notwendigen Voraussetzungen für Mensch, Technik und Organisation zur Umsetzung der gewählten I4.0-Potenziale identifiziert und entsprechende Handlungsmaßnahmen abgeleitet. Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit der I4.0-Potenziale wird daraufhin eine Investitionsrechnung durchgeführt, sofern die möglichen Einzahlungen durch die Implementierung monetär bestimmbar sind. Ist Letzteres nicht gegeben, so wird die Methode der Extended Performance Analysis (siehe hierzu bspw. [Seit08]) herangezogen. In der vierten Phase wird eine Roadmap zur Umsetzung der gewählten I4.0-Potenziale entwickelt, die als Basis für einen detaillierten Projektplan dient. Dabei werden die zuvor definierten Handlungsmaßnahmen in Umsetzungsschritte überführt, die dann zeitlich sowie nach den Perspektiven Mensch, Technik und Organisation eingeordnet werden. Abschließend wird die Roadmap im Unternehmen umgesetzt [Seit16].

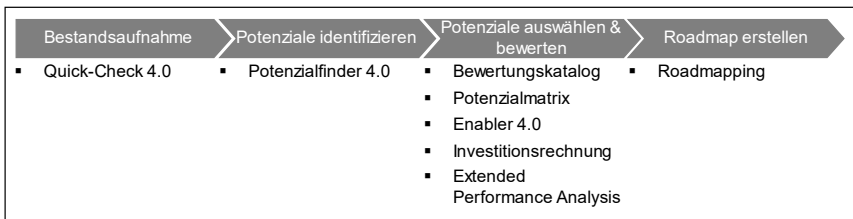


Abbildung 2-9: Die Phasen des Ansatzes und die zugehörigen Instrumente nach [Seit16]

Vorgehensmodell zur Digitalen Transformation in KMU nach PETER

Dieses Vorgehensmodell fokussiert die Handlungsfelder Kundenorientierung, neue Technologien, Cloud & Daten, Business Development, Process Engineering, digitales Marketing sowie Führung & Kultur, um einen ganzheitlichen Ansatz zur Digitalen Transformation von KMU zu bilden (Abbildung 2-10). Zuerst wird eine Maturitätsanalyse durchgeführt, um so die Ausprägungen der relevanten Indikatoren des Transformationsvorhabens zu identifizieren, etwa die digitalen Kundenbedürfnisse und Geschäftsoptionen sowie die organisatorische Einbindung dieser Geschäftsoptionen. Parallel dazu werden die Handlungsfelder aus der Perspektive des Marktes bzw. Absatzes sowie aus Sicht der Wertschöpfungskette analysiert und Handlungsbedarfe ermittelt. Im zweiten Schritt werden eine Digitale Vision und ein zugehöriges Leistungsversprechen definiert. Dabei werden sowohl die Marktsicht als auch die unternehmensinterne Perspektive berücksichtigt. Im Rahmen des Business Development werden neue Ertrags- und Geschäftsmodelle entwickelt und darauf basierend die Kernprozesse für das Unternehmen, die zugehörigen Anforderungen an die IT und zuletzt der Umsetzungsplan formuliert. Die resultierende Roadmap beinhaltet verschiedene Teilprojekte, mit denen die Umsetzung entsprechend der definierten Vision erreicht werden soll. Im letzten Schritt werden die Führung und die Unternehmenskultur auf der unternehmensinternen Seite sowie das digitale Marketing auf der Marktseite ausgebaut. Die Ergebnisse werden iterativ in den vorherigen Schritten wieder aufgenommen und weiterentwickelt [Pete17].

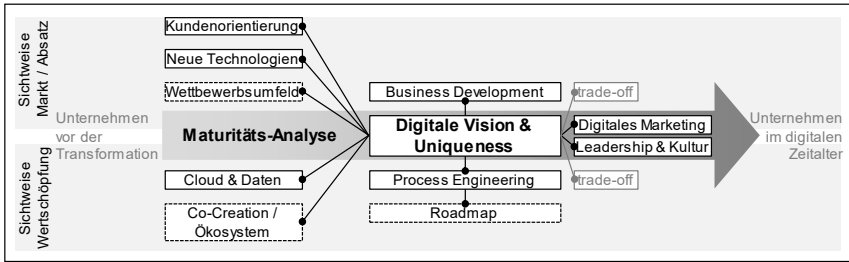


Abbildung 2-10: Vorgehensmodell für die Digitale Transformation und ihre Handlungsfelder nach [Pete17]

Ausrichtung der Unternehmens-IT zur Umsetzung von I4.0-Konzepten nach KÖNIGS & ZELLER

Der Ansatz des Verbundforschungsprojekts „DigiKMU - Entwicklung einer Methode zur Unterstützung von KMU im Maschinen- und Anlagenbau bei der Umsetzung von Industrie 4.0 im Bereich der CAD-CAM-NC-Verfahrenskette“ beruht auf der Annahme, dass die Unternehmens-IT produzierender KMU mittelfristig ausgerichtet werden muss, um unternehmerische Ziele mithilfe von I4.0-Konzepten in der Computer-Aided-Design-(CAD-)Computer-Aided-Manufacturing-(CAM-)Numerical-Control-(NC-)Verfahrenskette erreichen zu können [Blei16]. Dafür muss die Verfahrenskette der Produkte, Produktionsmaschine und des Produktionsprozesses vernetzt werden, wodurch die Daten eines konstruierten Produkts nahtlos in die Produktion übergeben werden können. Dadurch kann eine effiziente Fertigung bis hin zur Losgröße 1 ermöglicht werden. Zur Vernetzung dieser Verfahrenskette entwickelten KÖNIGS & ZELLER einen Leitfaden (Abbildung 2-11): Im ersten Schritt wird der Istzustand der Unternehmens-IT mithilfe eines Fragebogens bezüglich der Dimensionen Ressourcen, Organisation und Methoden sowie der Unternehmensphilosophie erfasst.

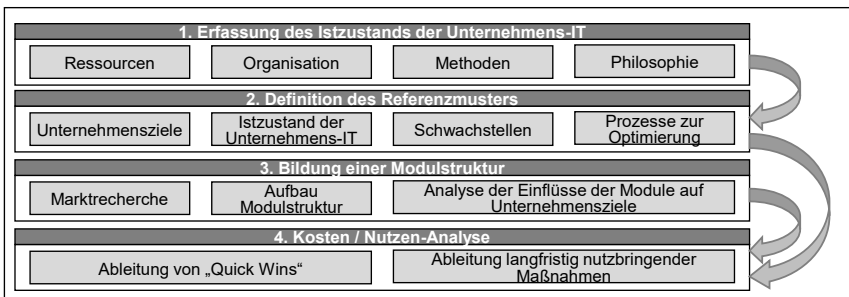


Abbildung 2-11: Leitfaden DigiKMU nach [Köni17]

Im zweiten Schritt wird ein Referenzmuster definiert, das den angestrebten Zielzustand in Form eines Reifegrads enthält. Parallel dazu wird eine Schwachstellenanalyse durchgeführt, mit der die einzuführenden oder zu optimierenden Prozesse identifiziert werden. Die Bildung einer Modulstruktur anhand des Produktportfolios (Module und Softwarepakete) eines Systemanbieters stellt den dritten Schritt des Leitfadens dar. Basierend auf einer Marktrecherche werden die aufgenommenen Softwaresysteme in eine Modulstruktur eingeteilt. Anschließend werden die Einflüsse der strukturierten Module auf die Unternehmensziele identifiziert. Im vierten Schritt

wird eine Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt, aus der kurzfristig und langfristig nutzbringende Maßnahmen abgeleitet werden können. Der Leitfaden kann bei einer gleichbleibenden Unternehmensstrategie iterativ angewandt werden, um den optimalen Digitalisierungsstand erreichen zu können [Köni17].

Digitale Transformation von Unternehmen nach APPELFELLER & FELDMANN

Das von APPELFELLER & FELDMANN entwickelte Vorgehen zur Digitalisierung von Unternehmen besteht aus drei Modellen: (1) dem Referenzmodell, (2) dem Reifegradmodell und (3) dem Vorgehensmodell (Abbildung 2-12).

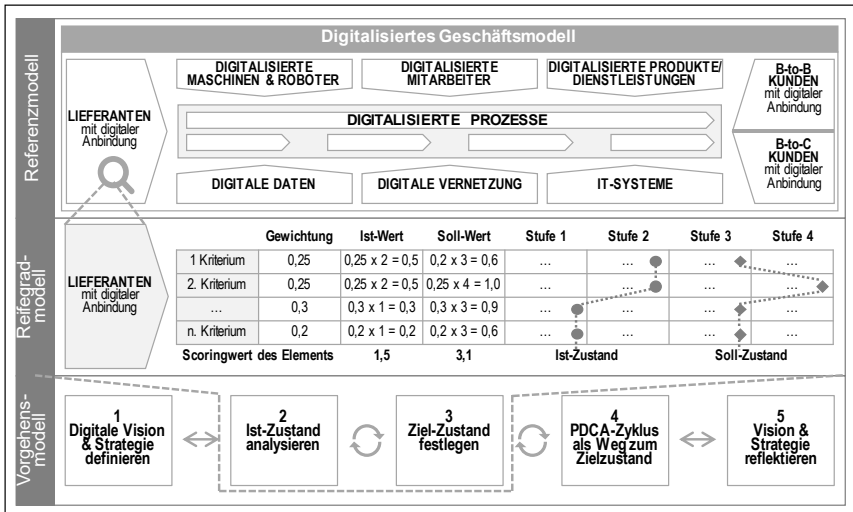


Abbildung 2-12: Referenz-, Reifegrad- und Vorgehensmodell für das digitale Unternehmen nach [Appe18]

Das (1) Referenzmodell strukturiert das Thema Digitalisierung mit dessen zahlreichen einzelnen Elementen, z. B. digitalisierten Maschinen und Robotern, digitalen Daten oder IT-Systemen, sowie deren Beziehungen zueinander und schafft ein gleiches Begriffsverständnis. Das (2) Reifegradmodell beinhaltet für jedes der Elemente aus dem Referenzmodell eine Matrix mit definierten Kriterien und zugehörigen Reifegradstufen. Die niedrigste Stufe steht für eine analoge Ausprägung des Kriteriums und die höchste für eine vollständige Digitalisierung des Elements. Durch eine Gewichtung der einzelnen Kriterien sowie durch die Einordnung in eine entsprechende Reifegradstufe ergeben sich Scoring-Werte für alle Elemente, die in einem Spinnennetzdiagramm visualisiert werden. Zur kontinuierlichen digitalen Transformation wird das (3) Vorgehensmodell angewandt. In dessen erstem Schritt wird eine Digitale Vision festgelegt, die den Idealzustand darstellt. Im zweiten Schritt wird jedes Element aus dem Referenzmodell mithilfe des Reifegradmodells analysiert, um so den Istzustand und nachfolgend im dritten Schritt den Zielzustand festzulegen. Das Ergebnis liefert bereits erste Handlungsempfehlungen, wie ein Unternehmen ausgehend vom Istzustand über Projekte und Maßnahmen hin zum Zielzustand digitalisiert werden kann. Im vierten Schritt wird der Plan-Do-Check-Act- (PDCA-) Zyklus angewandt, um iterativ jeweils das nächste Zwischenziel zu erreichen. Im fünften Schritt

werden die Vision und die Strategie reflektiert, um so Defizite aufdecken, das Vorgehen entsprechend anpassen und dadurch die definierte Digitale Vision erreichen zu können [Appe18].

I4.0 für KMU in der Textil- und Bekleidungsindustrie nach VON WASCINSKI et al.

Das KMU-spezifische Konzept nach VON WASCINSKI et al. zur Digitalisierung von KMU in der Textil- und Bekleidungsindustrie basiert auf den folgenden fünf Schritten: (1) Informieren, (2) Demonstrieren, (3) Qualifizieren, (4) Konzipieren und (5) Umsetzen. Im ersten Schritt werden die Beschäftigten und die Geschäftsleitung für Themen zur Digitalisierung sensibilisiert. Dazu werden u. a. Workshops, Führungen durch die Produktion oder Webinare organisiert. Im zweiten Schritt werden existierende I4.0-Lösungen betrachtet, um so Inspirationen für das eigene Unternehmen zu erhalten und unternehmensspezifische Lösungen zu identifizieren. Bevor diese Ideen und Lösungen im Unternehmen implementiert werden können, müssen die Beschäftigten im dritten Schritt entsprechend qualifiziert werden. Dafür werden Workshops durchgeführt und Schulungen angeboten. Im anschließenden vierten Schritt werden die ausgewählten I4.0-Lösungen genauer konzipiert und hinsichtlich technischer, organisatorischer und wirtschaftlicher Potenziale analysiert. Basierend darauf werden Handlungsfelder abgeleitet und spezifische Projektpläne erarbeitet. Im letzten Schritt werden die konzeptionellen Lösungen umgesetzt [Wasc18].

Digitalisierung produzierender Unternehmen nach SCHUMACHER et al.

Das systematische Vorgehensmodell von SCHUMACHER et al. ermöglicht produzierenden Unternehmen die Digitalisierung beginnend bei der Orientierung über die Definition unternehmensspezifischer Handlungsfelder bis hin zur Realisierung von Projekten mittels Roadmaps (Abbildung 2-13). Der Fokus des Vorgehensmodells liegt auf der innerbetrieblichen Wertschöpfung, genauer auf der Produktion sowie der Logistik. Zunächst werden die Grundlagen geschaffen, indem ein gemeinsames Verständnis für I4.0 und die Ziele der Reifegradbewertung sowie der aktuellen Aktivitäten des Unternehmens im Bereich I4.0 definiert werden. Daraufhin wird das Reifegradmodell angewandt, das aus acht Dimensionen (Technologie, Produkte, Kunden und Partner, Wertschöpfungsprozess, Daten und Informationen, Unternehmensstandards, Mitarbeiter sowie Strategie und Führung) und 65 Indikatoren besteht, um den Istzustand hinsichtlich der I4.0 zu bestimmen. In diesem Rahmen wählen die Anwender/innen die für sie relevanten Indikatoren aus, sodass diese bei der weiteren Vorgehensweise stärker in den Fokus gesetzt werden können. Anschließend wird das Ergebnis des Reifegradmodells analysiert und in einem Reifegradbericht zusammengeführt. Im Zuge eines Workshops werden die Ziele des Unternehmens im Kontext der I4.0 definiert. Basierend darauf wird im nachfolgenden Schritt der Zielzustand mithilfe des Reifegradmodells festgelegt. Daraufhin werden die Abweichungen zwischen Ist- und Sollzustand für jeden Indikator analysiert. Anschließend werden unternehmensspezifische Realisierungspfade anhand der Phasen des Implementierens und Formalisierens festgelegt. Das Ergebnis ist eine unternehmensspezifische Roadmap mit den in Aktionsbereiche gruppierten Handlungsfeldern des Unternehmens. Mittels dieser Roadmap werden die Handlungsfelder anhand der Relevanzbewertung der Anwender im Reifegradmodell priorisiert und Realisierungsprojekte definiert. Im letzten Schritt werden die Handlungsfelder, die Realisierungsprojekte sowie die zugehörigen Teilaufgaben in einer unternehmensspezifische Realisierungs-Roadmap zusammengeführt [Schu19].

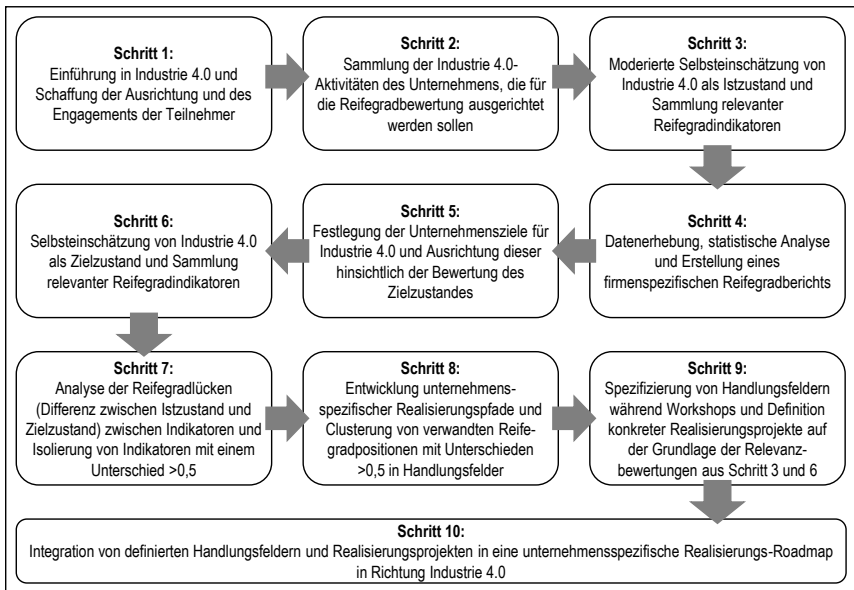


Abbildung 2-13: Reifegradbasiertes Vorgehensmodell nach [Schu19]

Digitalisierung des Mittelstands nach EL SAKKA et al.

Die Vorgehensweise zur Digitalisierung des Mittelstands von EL SAKKA et al. basiert auf den Methoden der Prozess- und erweiterten Informationsflussanalyse (siehe bspw. [Lew17]) sowie einer Bewertung des I4.0-Grads anhand eines Reifegradmodells und einer Auswahlunterstützung digitaler Technologien mithilfe eines Technologieradars. Im Rahmen der Prozess- und Informationsanalyse wird zunächst der I4.0-Reifegrad bestimmt, um auf objektiven Kriterien basierend den Istzustand der Digitalisierung zu ermitteln (Abbildung 2-14). Parallel dazu werden weitere Rahmenbedingungen wie systemtechnische Abhängigkeiten oder geplante Geschäftsmodellausrichtungen in einem Kriterienkatalog zusammengetragen. Mithilfe konventioneller Methoden, z. B. einer Wertstromanalyse, kann eine Eingrenzung der zu untersuchenden primären Prozesse erfolgen. Anschließend erfolgt die Identifikation der Schwachstellen in den Prozessen und im Informationsfluss mit relevanten Handlungsbedarfen [EIS19].

Im Rahmen des technologieneutralen Grobkonzepts werden, basierend auf den vorherigen Analysen, die digitalisierten Sollprozesse modelliert, wobei diese technologieneutral zu beschreiben sind. Durch einen Abgleich der Ist- und Sollprozesse werden Handlungsfelder identifiziert und anschließend priorisiert. Weiterhin werden diese Handlungsfelder soweit ausgearbeitet, dass sie als Anforderungen für das technologiespezifische Feinkonzept dienen. Zur Implementierung der Sollprozesse sind teilweise neue, noch nicht im Unternehmen eingesetzte digitale Technologien notwendig, die mithilfe eines Technologieradars ausgewählt werden. Zudem können bestehende Informationsflüsse miteinander verknüpft werden, um so neue Analysen durchzuführen und basierend auf dieser Zusammenfassung Investitionskosten einzusparen. Auf der Grundlage des Grobkonzepts sowie der verschiedenen Umsetzungsmöglichkeiten der Handlungsfelder werden Feinkonzepte erstellt und z. B. mithilfe der Nutzwertanalyse bewertet.

Nach der Auswahl eines technologiespezifischen Feinkonzepts wird dieses technologieabhängig modelliert und als Basis der nachfolgenden Implementierung genutzt. Für die Umsetzung wird zunächst eine Pilotanwendung definiert, die z. B. einen Teilbereich der Produktion oder eine einzelne Maschine umfassen kann. Unter Berücksichtigung der Erfahrungen, die im Rahmen der Pilotanwendungen gesammelt werden, wird das vollständige Feinkonzept durch ein Rollout im Unternehmen umgesetzt. Anschließend kann das Reifegradmodell wiederholt angewandt werden, um so den Fortschritt hinsichtlich der Digitalisierung zu identifizieren [EIS19].

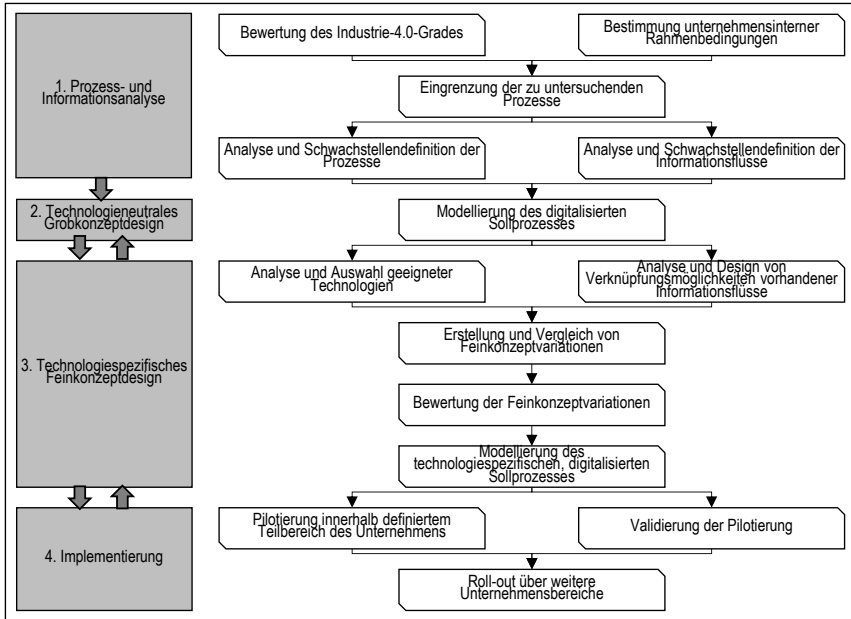


Abbildung 2-14: Vorgehensweise zur systematischen Einführung von I4.0 im Mittelstand nach [EIS19]

Modulares Transformationskonzept zur Digitalisierung produzierender Unternehmen nach AURICH et al.

Im Rahmen des Projekts „Integrierte Arbeitssystemgestaltung in digitalisierten Produktionsunternehmen (InAsPro)“ wurde ein modulares, produktlebenszyklusphasenübergreifendes Transformationskonzept entwickelt [Auri20]. Dieses beschreibt eine generische Vorgehensweise zur Auswahl und Implementierung von Digitalisierungslösungen entlang der Wertschöpfungskette und ermöglicht so deren unternehmensindividuelle Umsetzung. Dazu werden Arbeitssysteme in der Entwicklung, Fertigung, Montage und dem Aftersales betrachtet sowie die Dimensionen Mensch, Technik und Organisation (MTO) berücksichtigt [Sinn20a]. Das entwickelte Transformationskonzept beinhaltet eine strategische und eine operative Betrachtungsebene (Abbildung 2-15) [Sied20b]. Im ersten Schritt wird mithilfe eines Reifegradmodells den Digitalisierungsgrad je Produktlebenszyklusphase sowie unternehmensübergreifend bestimmt [Sied20c]. Basierend darauf werden Digitalisierungsziele ausgewählt sowie strategische Optionen entwickelt und priorisiert [Dupo20b]. Passend zu der gewählten strategischen Option wird ein An-

wendungsszenario mit einer zugehörigen Digitalisierungslösung ausgewählt. Diese Digitalisierungslösung besteht aus einer Kombination von Digitalisierungstechnologien sowie einer Beschreibung der Potenziale und Risiken sowohl für das Unternehmen als auch für die Mitarbeiter [Dupo20a]. Auf der operativen Betrachtungsebene wird ein geeignetes Arbeitssystem identifiziert und dessen Istzustand analysiert sowie Zielzustand festgelegt. Im nächsten Schritt wird die Umsetzung geplant und daraufhin die gewählte Digitalisierungslösung implementiert. Abschließend werden die Ergebnisse geprüft, wobei die Fragestellung zugrunde liegt, ob die Zielsetzungen entsprechend den strategischen Optionen sowie dem festgelegten Zielzustand erreicht wurden. Darüber hinaus kann das Reifegradmodell wiederholt angewandt werden, um so die Auswirkungen hinsichtlich der Digitalisierung zu bewerten [Sied20a].

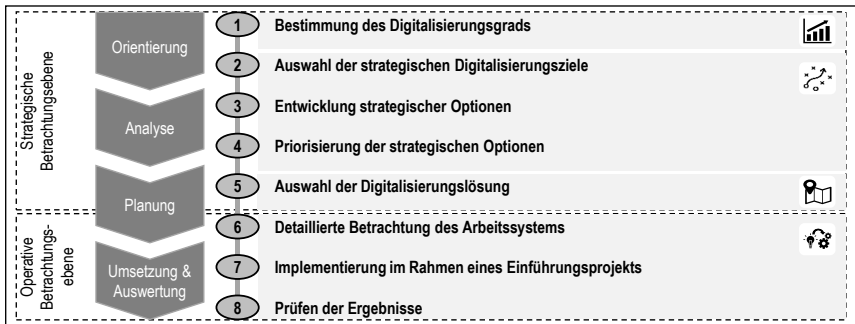


Abbildung 2-15: Modulares Transformationskonzept zur Digitalisierung produzierender Unternehmen nach [Sied20b]

Toolkit zur Einführung von I4.0 in KMU nach SOPADANG et al.

KMU sind hinsichtlich ihrer Humanressourcen, verfügbaren Technologien sowie Finanzen häufig stärker eingeschränkt als Großunternehmen, sodass nicht alle für sie potenziell geeigneten I4.0-Konzepte umgesetzt werden können. Somit ist es für KMU notwendig, I4.0-Konzepte zu priorisieren und mit geeigneten Maßnahmen umzusetzen. SOPADANG et al. entwickelten ein Toolkit zur Einführung von I4.0 in KMU unter Berücksichtigung der Dimensionen Informationstechnologie, Produktion und Betrieb, Automatisierung sowie Humanressourcen (Abbildung 2-16). Das Toolkit ist in die vier Phasen (1) Organisationsanalyse, (2) Gap-Analyse, (3) wirtschaftliche Analyse und (4) Umsetzungsleitfaden unterteilt. In der ersten Phase wird das betrachtete KMU auf organisatorischer Ebene bezüglich der Dimensionen Unternehmenstyp und -größe, Produkt, Prozess, Geschäftsposition, Lieferkettenbeziehung sowie Geschäftsstrategie analysiert. In der zweiten Phase wird eine Bedarfsanalyse durchgeführt, die die zukünftige Strategie, Zielstellungen und Herausforderungen definiert. Weiterhin werden aktuelle Trends und mögliche Geschäftsmodelle untersucht. Basierend darauf werden die Dimensionen hinsichtlich des Ist- und des Zielzustands bewertet und somit die Weiterentwicklungspotenziale identifiziert. Im dritten Schritt werden diese Weiterentwicklungspotenziale wirtschaftlich analysiert. Dazu werden Budgetierung, Nutzen, Produktivitätsverbesserung sowie Nutzen-, Kosten- und Risikoanalysen betrachtet. Auf dieser Grundlage kann das jeweilige KMU dann die Entscheidung treffen, welche der identifizierten Weiterentwicklungspotenziale geeignet sind und implementiert werden sollen. In der vierten Phase werden die ausgewählten Maßnahmen mittels

eines Leitfadens umgesetzt. Dabei werden die Dimensionen, der Digitalisierungsstand sowie der Umsetzungszeitpunkt berücksichtigt [Sopa20].

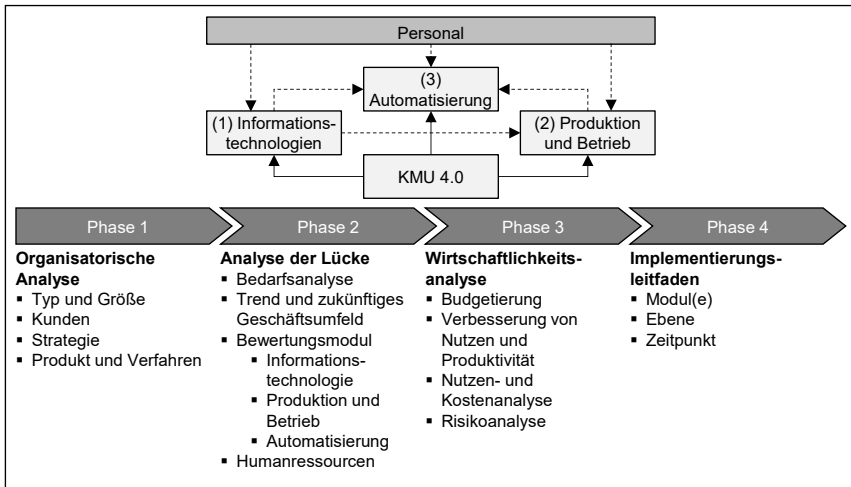


Abbildung 2-16: Phasen des Implementierungskits für intelligente KMU nach [Sopa20]

Zwischenfazit

Als **Zwischenfazit** ist festzuhalten, dass nur wenige Ansätze zur ganzheitlichen Digitalisierung eines Unternehmens den Fokus auf KMU und ihre spezifischen Anforderungen legen. Die Ansätze zeigen meist allgemein beschriebene Vorgehensweisen und -modelle auf, die nicht detailliert genug sind, als dass KMU sie direkt anwenden könnten. Demgegenüber ist es hilfreich, dass der Großteil der Ansätze bei der Identifikation sowohl eines Ist- als auch eines Zielzustands unterstützt, indem z. B. Reifegrad- oder Referenzmodelle herangezogen werden. Andererseits besteht ein Defizit der betrachteten Ansätze in der mangelnden zielgerichteten Auswahl und Implementierung digitaler Technologien. Aufgrund der Vielzahl digitaler Technologien ist eine Unterstützung bezüglich ihrer Identifikation erforderlich; diese soll daher in ein zu entwickelndes Transformationskonzept integriert werden. Wenige Ansätze berücksichtigen Kennzahlen, um den Fortschritt sowie die Auswirkungen der Digitalisierung des Unternehmens zu quantifizieren. Dies spielt allerdings für KMU eine entscheidende Rolle, da dadurch geklärt werden kann, welchen quantifizierbaren Mehrwert die Digitalisierung liefern kann.

2.2.2 Ansätze zur Digitalisierung von Produktionssystemen

Im Folgenden wird ein Auszug an Ansätzen zur Digitalen Transformation von Produktionssystemen in Unternehmen vorgestellt. Die beschriebenen Ansätze fokussieren gezielt die Digitalisierung von Teilbereichen oder thematisieren die des gesamten Produktionssystems. Weitere bestehende Ansätze werden in Kapitel 9.1.2 im Anhang erläutert.

Reifegradbasierte Migration zum CPPS nach MORLOCK

Das Ziel des Projekts „Migration zum cyber-physischen Produktionssystem (ADAPTION)“ ist die Bereitstellung eines iterativen, reifegradbasierten Vorgehensmodells zur Entwicklung und Einführung von CPPS. Dieses Vorgehensmodell ermöglicht eine individuelle Migration von

CPPS und berücksichtigt außerdem wirtschaftliche Gesichtspunkte. Der ganzheitliche Ansatz beinhaltet die Gestaltungsdimensionen Technik, Organisation und Personal (T-O-P), deren Ausbaustufen mittels des entwickelten Reifegradmodells klassifiziert werden. Der optimale Zielreifegrad wird unternehmensindividuell hinsichtlich des Nutzens und der Wirtschaftlichkeit festgelegt. Das iterative Vorgehensmodell beginnt mit der Ermittlung der Ausgangssituation, dem sog. I4.0-Audit, indem die T-O-P-Dimensionen durch ein Selbstbewertungstool evaluiert werden (Abbildung 2-17) [Mor116].

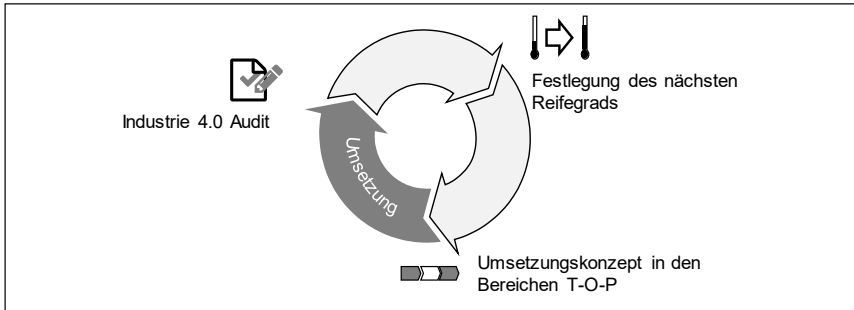


Abbildung 2-17: Iteratives, reifegradbasiertes Vorgehensmodell zur Migration zum CPPS nach [Mor116]

Das entwickelte Reifegradmodell wird zur Bestimmung des Istzustands bezüglich der I4.0 angewandt. Dabei werden Kriterien definiert, die die T-O-P-Dimensionen beschreiben. Anhand dieser Kriterien wird den einzelnen Dimensionen ein expliziter Reifegrad zugeordnet, die anschließend zu einem Gesamtreifegrad zusammengefasst werden, der wiederum den Stand eines Unternehmens hinsichtlich der Entwicklung von CPPS beschreibt [Lein18b]. Anhand des Reifegradmodells werden Unternehmen eingeordnet und die unternehmensindividuellen Anknüpfungspotenziale an I4.0 identifiziert. Daraus ergibt sich eine Definition kurz- und langfristiger Sollzustände sowie die Festlegung des nächsten Reifegrads, der durch sie erreicht werden soll. Unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen der I4.0-spezifischen Anforderungen innerhalb der Gestaltungsdimensionen T-O-P werden die Umsetzungsschritte des jeweiligen Unternehmens mit dem Ziel der Wirtschaftlichkeit realisiert. Das Vorgehen wird iterativ ausgeführt, sodass der Migrationsprozess adaptiv durchgeführt werden kann, und ermöglicht somit eine Neujustierung während der Laufzeit. Basierend auf dem definierten Sollzustand werden die notwendigen organisatorischen und technischen Veränderungen sowie Anpassungen bestimmt und die Mitarbeiter entsprechend qualifiziert. Nach der Implementierung der unternehmensspezifischen Umsetzungsschritte wird erneut ein I4.0-Audit durchgeführt, um so einen Abgleich des vorherigen Ist- mit dem aktuellen Sollzustand zu gewährleisten. Der Prozess kann weiterhin wiederholt werden, bis der gewünschte Reifegrad erreicht ist [Mor116].

Transformationsprozess zur intelligenten und vernetzten Fabrik nach WEINERT

Die iterative Vorgehensweise, die im Projekt „Metamorphose zur intelligenten und vernetzten Fabrik (MetamoFAB)“ entwickelt wurde, beginnt mit einer unternehmensinternen Analyse des aktuellen Fabrik-Istzustands unter Berücksichtigung der Dimensionen MTO (Abbildung 2-18). Im nächsten Schritt werden Chancen und Risiken bezüglich der I4.0 identifiziert, die von ex-

ternen Entwicklungen ausgehen. Sie basieren bspw. auf externen Expertenprognosen oder erwarteten Trendentwicklungen. Anhand dieser externen Entwicklungen werden anschließend sog. ‚Lösungselemente‘ ebenfalls unter Berücksichtigung von MTO identifiziert. Auf Grundlage des Istzustands und der Trends im Bereich I4.0 werden individuelle Zielvisionen für das betrachtete Unternehmen zur I4.0 entwickelt, die unterschiedliche Szenarien berücksichtigen. Im darauffolgenden Schritt werden gemäß der Zielvision die wesentlichen Lösungselemente zur konkreten Gestaltung der Zwischen- und Zielzustände ausgewählt. Die dabei entwickelten möglichen Lösungspfade beinhalten Handlungsoptionen, die mittels geeigneter Bewertungskriterien hinsichtlich ihrer Potenziale evaluiert werden. Auf Basis dieser Bewertung wird der Transformationspfad ausgewählt, der das höchste Potenzial für das betrachtete Unternehmen aufweist [Wein17]. Anschließend erfolgt die Planung der einzelnen Umsetzungsschritte des ausgewählten Pfades sowie die Entwicklung der zugehörigen Transformationsstrategie in Bezug auf MTO [Knot17]. Im letzten Schritt werden die festgelegten Maßnahmen implementiert und bewertet. Die iterative Vorgehensweise kann so lange wiederholt werden, bis der gewünschte Zielzustand der Fabrik erreicht ist [Wein17].

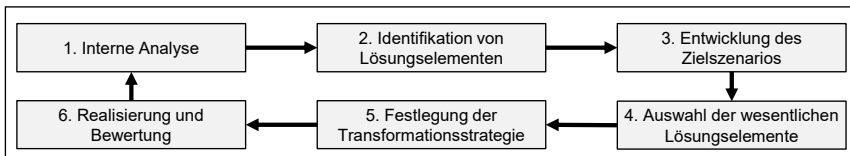


Abbildung 2-18: Iterative Vorgehensweise für den Transformationsprozess zur intelligenten und vernetzten Fabrik nach [Wein17]

Migration zu menschenzentrierten CPS im Mittelstand nach SCHULER

Das Ziel des Projekts „Migrationsunterstützung für die Umsetzung menschenzentrierter Cyber-Physical Systems (MyCPS)“ besteht in der Entwicklung systematischer Vorgehensweisen zur Umstellung digitalisierter Prozesse zu intelligenten, vernetzten Systemen [Marr17]. Der Fokus liegt dabei auf der Fertigung, Montage, innerbetrieblichen Logistik und Produktionssteuerung [Baue19]. In Form einer Toolbox, also einer strukturierten, bewerteten und konsolidierten Informationsplattform, sollen dem produzierenden Mittelstand die notwendigen Informationen zur digitalen Transformation zur Verfügung gestellt werden [Baue18]. Diese Toolbox enthält Strategien, Methoden und Vorgehensweisen zur Analyse, Planung, Realisierung sowie Bewertung von Anwendungsfällen in mittelständischen Unternehmen [Klap17]. Basierend auf diesem Erfahrungswissen und den zur Verfügung gestellten Vorlagen werden produzierende Unternehmen dazu befähigt, eigene Projekte schneller umsetzen zu können [Baue17]. Zunächst werden mithilfe der Toolbox die Ziele, wie z. B. die Verbesserung der Durchlaufzeit, die Steigerung der Effizienz oder auch die Reduktion der Qualitätskosten, definiert und hinsichtlich ihrer Relevanz in eine Reihung gebracht (Abbildung 2-19). Anschließend wird der Reifegrad der MTO-Dimensionen identifiziert. Das Ergebnis ist der Istzustand hinsichtlich Digitalisierung und in Bezug auf die gesetzten Ziele. Die Toolbox liefert dabei Handlungsempfehlungen zu einzelnen Reifegradthemen und präsentiert zu den gesetzten Zielen passende Anwendungsbeispiele, bspw. in Bezug auf Störungsmanagement, Shopfloor-Management sowie eine flexible digitale Schichtplanung [Schu18].

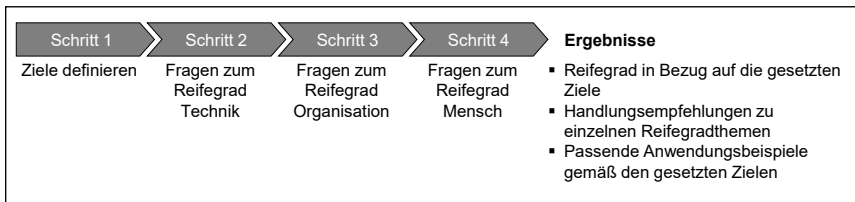


Abbildung 2-19: Anwendung der Toolbox [Schu18]

Reifegradbasierter Handlungsleitfaden zur Einführung von IKT nach LANZA & NYHUIS

Im Projekt „Befähigungs- und Einführungsstrategien für I4.0 (Intro 4.0)“ werden für die Entwicklung von Befähigungs- und Einführungsstrategien vorhandene IKT mit bestehenden Methoden zu sog. ‚I4.0-Methoden‘ zusammengeführt (Abbildung 2-20). Diese sind bspw. eine automatisierte Wertstromaufnahme und -analyse, die papierlose Fabrik und Prozessschritte sowie eine dynamisierbare Kanban-Steuerung [Lanz18].

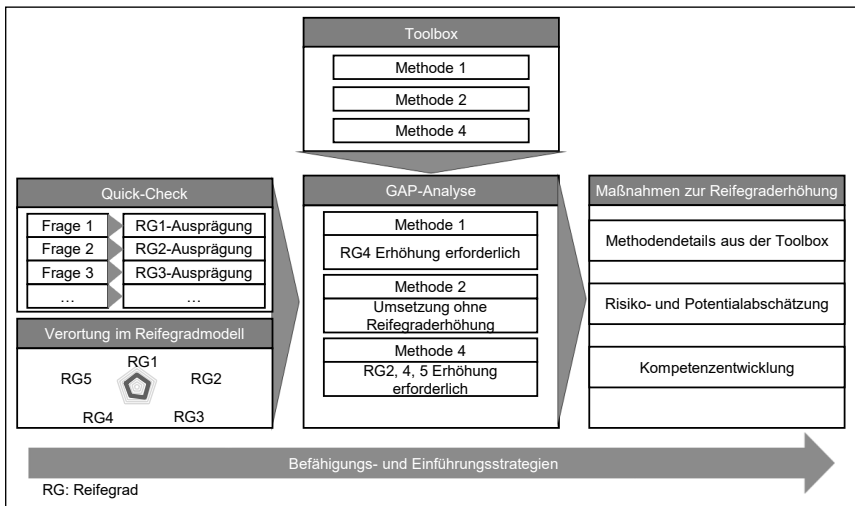


Abbildung 2-20: Reifegradbasierter Handlungsleitfaden zur Einführung von IKT nach [Lanz16]

Durch einen Quick-Check werden für unternehmensindividuelle Potenziale geeignete I4.0-Methoden identifiziert [Lanz16]. Der Quick-Check basiert auf einem Reifegradmodell, das verschiedene Handlungsfelder wie Qualitätsmanagement oder Produktionslogistik einzeln evaluiert und die identifizierten Werte zu einem übergeordneten Reifegradwert zusammenfasst. Dabei werden Reifegradbewertungsmodule definiert, die die jeweiligen Handlungsfelder mit individuellen Problemstellungen verknüpfen und so eine problemspezifische Bewertung ermöglichen [Hüb17]. Für jedes Handlungsfeld werden Zielzustände ermittelt, aus denen die Kriterien Datenerfassung und -verarbeitung, Assistenzsysteme, Vernetzung und Integration, Dezentralisierung und Serviceorientierung, Selbstorganisation und Autonomie sowie ihre Ausprägungsstufen abgeleitet werden. Jedes Handlungsfeld ist dabei in fünf Reifegradstufen eingeteilt

[Olef18]. Anschließend werden die ermittelten einzelnen zu einem übergeordneten I4.0-Reifegrad aggregiert. Der Umfang der Handlungsfelder, die hinterlegte Berechnungsmethodik und eine genaue Beschreibung der Reifegradstufen der Handlungsfelder sowie des Gesamtreifegrads werden nicht weiter spezifiziert [Hüb17]. Ausgehend von diesem I4.0-Assesment können defizitäre Bereiche identifiziert werden, die Potenziale zur Einführung oder Erweiterung von I4.0-Methoden aufweisen [Hüb17]. Daraufhin werden die ausgewählten Methoden einer Risiko- und Potenzialanalyse unterzogen, die unsichere und sowohl monetäre als auch nicht monetäre Kriterien berücksichtigt [Lieb17]. Neben der Implementierung der geeignetsten I4.0-Methoden zur Erhöhung des Reifegrads hinsichtlich der Digitalisierung steht die Kompetenzentwicklung der Mitarbeiter im Vordergrund. Diese wird durch adäquate Hilfsmittel sowie Befähigungs- und Schulungskonzepte unterstützt. Die durchgeführten Schritte werden in einem reifegradbasierten Handlungsleitfaden zur Einführung von IKT zusammengefasst. Dieser dient als Werkzeug, das das jeweilige Unternehmen iterativ einsetzen kann [Lieb18b].

Modulare, sozio-technische Gestaltungs- und Einführungssystematik für CPPS nach NÖHRING et al.

Im Rahmen des Projekts „Sozio-Technische Gestaltung und Einführung Cyber-Physischer Produktionssysteme in nicht forschungs- und entwicklungsintensiven Unternehmen (STEPS)“ wurden Auswahlhilfen für CPPS-Lösungen entwickelt. Anhand dieser Hilfen werden die Unternehmensziele über operative Kennzahlen mit den CPPS-Lösungen verknüpft. Zusätzlich wird die erforderliche methodische Unterstützung zur erfolgreichen Einführung von CPPS-Lösungen unter Berücksichtigung der unternehmensspezifischen Rahmenbedingungen fokussiert [Nöhr18]. Zuerst werden CPPS-Lösungen wie Big Data oder Smart Components definiert und deren Erfolgsfaktoren sowie Hemmnisse für das Unternehmen abgeleitet [Klin18]. Darauf aufbauend wird eine modulare Gestaltungs- und Einführungssystematik entwickelt, die sich in drei Module gliedert. Im ersten Modul werden der Ist- und der Zielzustand analysiert. Zusätzlich werden dem Zielzustand operative Kennzahlen zugeordnet [Nöhr16]. Auf dieser Basis werden geeignete CPPS-Lösungen aus einem Katalog ausgewählt, der in unterschiedliche Kategorien unterteilt ist und die Merkmale sowie Einsatzmöglichkeiten der Lösungen aufzeigt. Zusätzlich werden die Auswirkungen der CPPS-Lösungen auf operative Kennzahlen dargestellt. Weiterhin werden die operativen Kennzahlen mit den übergeordneten Unternehmenszielen verknüpft [Wöst16]. Im zweiten Modul werden der Ist- und der Zielzustand mithilfe einer soziotechnischen Fähigkeitsbewertung im Rahmen eines Workshops analysiert. Zur Bewertung des Ist- und des Zielzustands werden den MTO-Kategorien Kriterien zugeordnet, die in bis zu fünf Spezifikationen unterteilt sind (Abbildung 2-21). Je höher die Spezifikation, desto stärker orientiert sich ein Arbeitssystem an der I4.0 [Nöhr19]. Im dritten Modul wird die Umsetzung der CPPS-Lösungen im Unternehmen unterstützt. Bezüglich MTO wird eine unternehmensübergreifende Vorgehensweise entwickelt, die es ermöglicht, geeignete CPPS-Lösungen zielgerichtet und erfolgreich einzuführen. So werden bspw. in der Kategorie Organisation organisatorische Rahmenbedingungen ermittelt und umgesetzt, die durch die Einführung neuer Technologien erforderlich werden [Nöhr16].

	Kriterien	Spezifikation 1	Spezifikation 2	Spezifikation 3	Spezifikation 4	Spezifikation 5
Organisation	Aktivitätsstruktur der Beschäftigten	klar definiert und auf wenige Aufgaben beschränkt (z.B. Montageschritte)	wechselnde Aktivitäten mit ähnlichen Anforderungen an Kompetenzen und Wissen (z.B. Job-Erweiterung)	verschiedene definierte Aufgaben mit unterschiedlichen Anforderungen an Kompetenzen und Wissen (z.B. Job Enrichment)	Aufgaben und Koordination finden in einer Gruppe statt, autonome Gruppenarbeit	
	Zusammenarbeit	wenig Kommunikation und Zusammenarbeit	regelmäßige Kommunikation und Zusammenarbeit	regelmäßige Kommunikation und Zusammenarbeit, gelegentliche Koordination	regelmäßige Kommunikation, Zusammenarbeit und Koordination	hohes Maß an Kommunikation, Kooperation und Koordination

Mensch	Anpassungsfähigkeit	es gibt keine Innovationen, keine Anpassungsfähigkeit der Mitarbeiter	Bereitschaft der Mitarbeiter, sich mit Innovationen auseinanderzusetzen	nach der Akklimatisierung, Anpassung an Innovationen und neue Prozesse	Innovationen aktiv umsetzen und sich am Gestaltungsprozess beteiligen	Innovationsgeist, Neugierde und positive Akzeptanz von Innovationen
	Unterstützung des Mitarbeiters innerhalb des Prozesses	nur Kenntnisse und Erfahrungen des Arbeitnehmers zur Ausführung der Arbeit	mündliche Anweisungen oder Erfahrungen zur Durchführung der Tätigkeit	schriftliche Dokumente für die Durchführung der Aktivität	Informationen in elektronischer Form vor der Aktivität	individuell angepasste Informationen in Echtzeit während der Aktivität

Technologie	Datenerfassung	Informationen werden manuell gesammelt und schriftlich dokumentiert	Informationen werden in elektronischen Datenbanken gespeichert und manuell aktualisiert	einheitliche IT-Systeme und unabhängige Informationsverwaltung	Sammlung und automatisierte Auswertung von Informationen	Kontrolle und Aktualisierung von Informationen in Echtzeit möglich
	Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle	kein Informationsaustausch zwischen Mensch und Maschine	elektronische Eingabegeräte (Tastatur, Bedienfelder, Touchscreen)	zentralisierte/dezentralisierte Produktionsüberwachung / -kontrolle	mobile Geräte mit intuitivem Software-Design und einfacher Bedienbarkeit	Gesten- und Sprachsteuerung, erweiterte Realität

Istzustand Sollzustand

Abbildung 2-21: Auszug aus der soziotechnischen Fähigkeitsbewertung nach [Nöhr19]

Vorgehensmodell zur erfolgreichen Umsetzung von I4.0 in KMU nach PEUKERT et al.

PEUKERT et al. entwickelten für KMU in globalen Produktionsnetzwerken ein I4.0-Prozessmodell, das aus fünf Phasen besteht: (1) Initialisierung, (2) Analyse, (3) Konzeptualisierung, (4) Realisierung und (5) Demonstration (Abbildung 2-22). Jede Phase wird anhand einer spezifischen Vorgehensweise sowie zugehörigen Methoden, Tools und Dokumenten zu deren Umsetzung und Dokumentation erläutert und mit einem konkreten Meilenstein abgeschlossen. Im Rahmen der (1) Initialisierungsphase erfolgen die Problemdefinition und die Erstellung eines groben Projekt- sowie eines zugehörigen Zeitplans. In der (2) Analysephase wird der Istzustand erfasst und Potenziale zur Verbesserung abgeleitet. Dazu wird eine Wertstromanalyse durchgeführt und ein Reifegradmodell zur Bestimmung des Digitalisierungsgrads angewandt [Peuk20]. Das Reifegradmodell besteht aus dem Werkzeugkasten gemäß [Ande15] und betrachtet die Digitalisierungsstufen der Produktion sowie der Produkte. PEUKERT et al. ergänzten den Werkzeugkasten durch die Dimensionen Lieferant und globales Produktionsnetzwerk, um so alle Gegebenheiten des KMU im globalen Produktionsnetzwerk berücksichtigen zu können. In der (3) Phase der Konzeptualisierung werden im Rahmen eines Workshops I4.0-Lösungen für die identifizierte Problemstellung entwickelt und die Ergebnisse in Projektprofilen dokumentiert. Die I4.0-Lösungen werden daraufhin in der (4) Realisierungsphase umgesetzt. Dazu

werden mithilfe der Projektprofile Anforderungen abgeleitet und der Markt auf potenzielle Lieferanten überprüft. Basierend auf den Anforderungen sowie einer Evaluation der Kosten und Investitionen können geeignete Lieferanten ausgewählt werden. In der abschließenden (5) Demonstrationsphase werden die umgesetzten Lösungen zu sog. ‚Demonstratoren‘ realisiert, damit diese als Inspiration für andere Unternehmen dienen können [Peuk20].

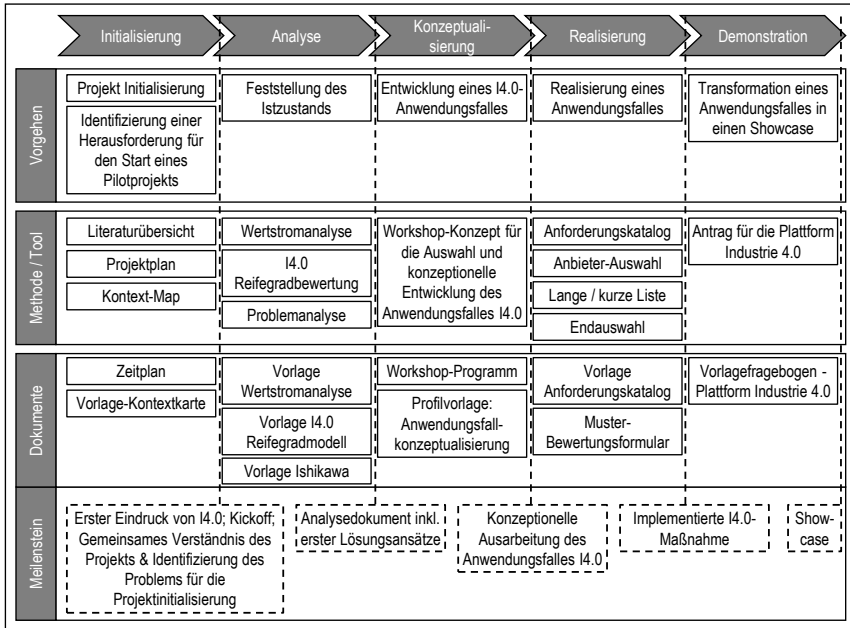


Abbildung 2-22: Prozessmodell für die Entwicklung, Implementierung und Demonstration von I4.0-Anwendungsfällen für KMU nach [Peuk20]

Zwischenfazit

Als **Zwischenfazit** ist zu konstatieren, dass nur drei der betrachteten Ansätze für den Kontext der KMU geeignet sind: Wie bei den Ansätzen zur ganzheitlichen Digitalisierung von Unternehmen fehlt auch hinsichtlich der Konzepte zur Digitalisierung des Produktionssystems eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweisen und -modelle, sodass KMU diese nur mit erhöhtem Aufwand nutzen können. Weiterhin unterstützen nur wenige der Ansätze die Identifikation des Istzustands sowie die Festlegung des Zielzustands hinsichtlich der Digitalisierung eines Produktionssystems. Der Großteil der Ansätze fokussiert eine bestimmte digitale Technologie bzw. Kategorie an digitalen Technologien, z. B. Assistenzsysteme, sodass sie kaum ein Hilfsmittel zur Identifikation und Auswahl geeigneter digitaler Technologien darstellen. Darüber hinaus werden in den betrachteten Ansätzen keine Kennzahlen zur Überprüfung und Quantifizierung des Fortschritts sowie zur Identifikation der Auswirkungen der Digitalisierung auf ein Produktionssystem berücksichtigt.

2.3 Kernbestandteile von Transformationskonzepten zur Digitalisierung

Zur Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU müssen deren speziellen Anforderungen berücksichtigt werden, sodass ein geeignetes Transformationskonzept entwickelt werden kann, das diesen Anforderungen gerecht wird. Dafür werden zunächst technische sowie organisatorische Herausforderungen von KMU analysiert (Kapitel 2.3.1) und mögliche Alternativen zu deren Aufbau in Kapitel 2.3.2 näher betrachtet. Darüber hinaus wird zur zielgerichteten Digitalisierung eines Produktionssystems zum einen ein Referenzmodell, ein Zielbild oder eine Digitalisierungsstrategie benötigt und zum anderen muss der entsprechende Istzustand analysiert werden, um als Ausgangssituation bekannt zu sein. Erst dadurch können digitale Technologien zielführend implementiert und angewandt werden. In Kapitel 2.3.3 werden verschiedene Optionen der Zielfindung erläutert und in Kapitel 2.3.4 mögliche Vorgehensweisen zur Identifikation des Istzustandes betrachtet. Aufgrund der Vielfalt der verfügbaren digitalen Technologien sind die Auswahl, Bewertung und Implementierung geeigneter digitaler Technologien wesentliche Herausforderungen für KMU. Ebenso ist die Abschätzung der tatsächlichen Auswirkungen einer umgesetzten digitalen Technologie meist schwierig und eine Methode zu ihrer Bewertung bisher nicht verfügbar [Wagn17]. Zur Identifikation digitaler Technologien werden zunächst deren Trends vorgestellt, um eine erste Einschränkung des Lösungsraums sowie eine Kategorisierung digitaler Technologien zu erreichen (Kapitel 2.3.5). Anschließend werden Methoden zur Identifikation der digitalen Technologien erläutert (Kapitel 2.3.6), sodass diese in Hinblick auf die Technologietrends kategorisiert und eingeordnet werden können. Weiterhin werden potenzielle Methoden zur Identifikation von Zusammenhängen und Wechselwirkungen bei der Implementierung digitaler Technologien betrachtet (Kapitel 2.3.6 und Kapitel 9.7 im Anhang). Außerdem sind Kennzahlen erforderlich, die bei der Wahl konkreter Digitalisierungsziele unterstützen und deren Umsetzungsfortschritt sowie Auswirkungen auf das Produktionssystem quantitativ aufzeigen. Dafür können z. B. die Gesamtanlageneffektivität (Overall Equipment Effectiveness, OEE) oder die Produktivität herangezogen werden. Entsprechende Kennzahlen und Kennzahlensysteme werden in Kapitel 2.3.7 vorgestellt.

2.3.1 Technische und organisatorische Herausforderungen für KMU

Die Digitalisierung bietet produzierenden KMU vielfältige **Chancen**, bringt aber auch **Herausforderungen** mit sich. Chancen sind u. a. die Effizienzsteigerung der Wertschöpfungskette, die Erhöhung der Energie-, Material- und Rohstoffeffizienz [Dema16], die Optimierung der Kostenstruktur [Beck13], eine höhere Kundenbindung [Lind17], die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle [Meye19] sowie die damit einhergehende Erschließung neuer Märkte [Ott17]. Herausforderungen können in die Kategorien ‚Kompetenzen/Ressourcen‘, ‚Wirtschaft/Finanzen‘, ‚rechtliche Rahmenbedingungen‘, ‚technische Aspekte‘, ‚kulturelle/organisatorische Aspekte‘ sowie ‚Implementierungsprozess‘ unterteilt werden [Orze18]. Ein Überblick der Herausforderungen im Zuge der Digitalisierung von KMU ist in Abbildung 2-23 dargestellt; die ausführliche Analyse ist im Anhang (Kapitel 9.2) zu finden.

Die vorliegende Dissertation ist auf die **technischen und organisatorischen Herausforderungen** fokussiert. Dementsprechend wird bspw. die technische Herausforderung der gezielten Auswahl und Implementierung digitaler Technologien sowie der benötigten IT-Infrastruktur und Datensicherheit adressiert. Zudem soll der Herausforderung ‚Fehlen eines methodischen

Ansatzes für die Implementierung⁴ entgegengewirkt werden. Die Begegnung dieser Herausforderungen legt erste Grundsteine für einen Kulturwandel im Unternehmen und somit auch die Akzeptanz der Mitarbeiter. Allerdings müssen weitere Maßnahmen getroffen werden, um diesen Kulturwandel zu ermöglichen [Salm16].

Herausforderungen bei der Digitalisierung von KMU											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kompetenzen / Ressourcen</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Unzureichende Kompetenzen / Qualifikation ▪ Fachkräftemangel ▪ Komplexität des Themas ▪ hoher Koordinationsaufwand ▪ Notwendigkeit, einen geeigneten Forschungspartner zu finden ▪ mangelnde Kenntnis von Industrie 4.0-Technologien und Technologieanbietern ▪ Auslastung durch Tagesgeschäft ▪ ... </td> </tr> </tbody> </table>	Kompetenzen / Ressourcen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unzureichende Kompetenzen / Qualifikation ▪ Fachkräftemangel ▪ Komplexität des Themas ▪ hoher Koordinationsaufwand ▪ Notwendigkeit, einen geeigneten Forschungspartner zu finden ▪ mangelnde Kenntnis von Industrie 4.0-Technologien und Technologieanbietern ▪ Auslastung durch Tagesgeschäft ▪ ... 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Wirtschaft / Finanzen</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hohe erforderliche Investitionen ▪ Fehlende finanzielle Ressourcen ▪ Lange und ungewisse Amortisation ▪ Rentabilität unbekannt ▪ Transparenz über Erfolge und Misserfolge ▪ Wettbewerbsdruck (Preis- und Kostendruck) ▪ Markteintrittsbarrieren ▪ ... </td> </tr> </tbody> </table>	Wirtschaft / Finanzen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hohe erforderliche Investitionen ▪ Fehlende finanzielle Ressourcen ▪ Lange und ungewisse Amortisation ▪ Rentabilität unbekannt ▪ Transparenz über Erfolge und Misserfolge ▪ Wettbewerbsdruck (Preis- und Kostendruck) ▪ Markteintrittsbarrieren ▪ ... 						
Kompetenzen / Ressourcen											
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unzureichende Kompetenzen / Qualifikation ▪ Fachkräftemangel ▪ Komplexität des Themas ▪ hoher Koordinationsaufwand ▪ Notwendigkeit, einen geeigneten Forschungspartner zu finden ▪ mangelnde Kenntnis von Industrie 4.0-Technologien und Technologieanbietern ▪ Auslastung durch Tagesgeschäft ▪ ... 											
Wirtschaft / Finanzen											
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hohe erforderliche Investitionen ▪ Fehlende finanzielle Ressourcen ▪ Lange und ungewisse Amortisation ▪ Rentabilität unbekannt ▪ Transparenz über Erfolge und Misserfolge ▪ Wettbewerbsdruck (Preis- und Kostendruck) ▪ Markteintrittsbarrieren ▪ ... 											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Rechtliche Rahmenbedingungen</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Datenschutzgrundverordnung ▪ mangelnde Unterstützung durch die Regierung ▪ Bürokratie ▪ bisherige Gesetze und Richtlinien nicht ausreichend ▪ Verantwortung, Zurechnung und Versicherbarkeit von Handlungen autonomer Systeme ▪ Kalkulation von Lizenzgebühren und Erlösen, sowie Steuern ▪ Schutz des geistigen Eigentums ▪ zeit- und kostenaufwendige Zulassungs- und Genehmigungsverfahren ▪ ... </td> <td style="vertical-align: top;"> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Technisch</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ IT-Sicherheit (unmittelbar, organisatorisch, personell) ▪ fehlende Standards ▪ Unsicherheit über die Zuverlässigkeit der Systeme ▪ schwache IT-Infrastruktur ▪ schwierige Interoperabilität / Kompatibilität der existierenden IT-Systeme ▪ mangelnde Breitbandversorgung v.a. im ländlichen Raum ▪ Auswahl einer geeigneten Technologie ▪ niedriger Reifegrad der erforderlichen Technologien ▪ Abhängigkeit von Technologien (Softwareausfall, Systemausfall) ▪ ... </td> </tr> </tbody> </table> </td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Kulturell / Organisatorisch</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Digitale Vision und Kultur ▪ mangelnde Unterstützung durch das Top-Management ▪ restriktive Denkweise ▪ Unternehmensmerkmale (Organisationsstruktur einschließlich Größe, Art des Unternehmens) ▪ Akzeptanz der Mitarbeiter ▪ Interne Entscheidungsfindung ▪ Fokus auf das Tagesgeschäft ▪ Unklare Zuständigkeiten ▪ ... </td> <td style="vertical-align: top;"> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Implementierungsprozess</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarf an neuen Geschäftsmodelle ▪ Fehlen eines methodischen Ansatzes für die Implementierung ▪ hoher Koordinationsaufwand ▪ erforderliche Zeit für die Implementierung ▪ erforderliche Änderungen zur Implementierung von Industrie 4.0 ▪ sinkende Produktivität in der Umstellungsphase ▪ Digitalisierungsstrategien selten vorhanden ▪ ... </td> </tr> </tbody> </table> </td> </tr> </tbody> </table> </td></tr></tbody></table>	Rechtliche Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Datenschutzgrundverordnung ▪ mangelnde Unterstützung durch die Regierung ▪ Bürokratie ▪ bisherige Gesetze und Richtlinien nicht ausreichend ▪ Verantwortung, Zurechnung und Versicherbarkeit von Handlungen autonomer Systeme ▪ Kalkulation von Lizenzgebühren und Erlösen, sowie Steuern ▪ Schutz des geistigen Eigentums ▪ zeit- und kostenaufwendige Zulassungs- und Genehmigungsverfahren ▪ ... 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Technisch</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ IT-Sicherheit (unmittelbar, organisatorisch, personell) ▪ fehlende Standards ▪ Unsicherheit über die Zuverlässigkeit der Systeme ▪ schwache IT-Infrastruktur ▪ schwierige Interoperabilität / Kompatibilität der existierenden IT-Systeme ▪ mangelnde Breitbandversorgung v.a. im ländlichen Raum ▪ Auswahl einer geeigneten Technologie ▪ niedriger Reifegrad der erforderlichen Technologien ▪ Abhängigkeit von Technologien (Softwareausfall, Systemausfall) ▪ ... </td> </tr> </tbody> </table>	Technisch	<ul style="list-style-type: none"> ▪ IT-Sicherheit (unmittelbar, organisatorisch, personell) ▪ fehlende Standards ▪ Unsicherheit über die Zuverlässigkeit der Systeme ▪ schwache IT-Infrastruktur ▪ schwierige Interoperabilität / Kompatibilität der existierenden IT-Systeme ▪ mangelnde Breitbandversorgung v.a. im ländlichen Raum ▪ Auswahl einer geeigneten Technologie ▪ niedriger Reifegrad der erforderlichen Technologien ▪ Abhängigkeit von Technologien (Softwareausfall, Systemausfall) ▪ ... 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kulturell / Organisatorisch</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Digitale Vision und Kultur ▪ mangelnde Unterstützung durch das Top-Management ▪ restriktive Denkweise ▪ Unternehmensmerkmale (Organisationsstruktur einschließlich Größe, Art des Unternehmens) ▪ Akzeptanz der Mitarbeiter ▪ Interne Entscheidungsfindung ▪ Fokus auf das Tagesgeschäft ▪ Unklare Zuständigkeiten ▪ ... </td> <td style="vertical-align: top;"> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Implementierungsprozess</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarf an neuen Geschäftsmodelle ▪ Fehlen eines methodischen Ansatzes für die Implementierung ▪ hoher Koordinationsaufwand ▪ erforderliche Zeit für die Implementierung ▪ erforderliche Änderungen zur Implementierung von Industrie 4.0 ▪ sinkende Produktivität in der Umstellungsphase ▪ Digitalisierungsstrategien selten vorhanden ▪ ... </td> </tr> </tbody> </table> </td> </tr> </tbody> </table>	Kulturell / Organisatorisch	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Digitale Vision und Kultur ▪ mangelnde Unterstützung durch das Top-Management ▪ restriktive Denkweise ▪ Unternehmensmerkmale (Organisationsstruktur einschließlich Größe, Art des Unternehmens) ▪ Akzeptanz der Mitarbeiter ▪ Interne Entscheidungsfindung ▪ Fokus auf das Tagesgeschäft ▪ Unklare Zuständigkeiten ▪ ... 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Implementierungsprozess</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarf an neuen Geschäftsmodelle ▪ Fehlen eines methodischen Ansatzes für die Implementierung ▪ hoher Koordinationsaufwand ▪ erforderliche Zeit für die Implementierung ▪ erforderliche Änderungen zur Implementierung von Industrie 4.0 ▪ sinkende Produktivität in der Umstellungsphase ▪ Digitalisierungsstrategien selten vorhanden ▪ ... </td> </tr> </tbody> </table>	Implementierungsprozess	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarf an neuen Geschäftsmodelle ▪ Fehlen eines methodischen Ansatzes für die Implementierung ▪ hoher Koordinationsaufwand ▪ erforderliche Zeit für die Implementierung ▪ erforderliche Änderungen zur Implementierung von Industrie 4.0 ▪ sinkende Produktivität in der Umstellungsphase ▪ Digitalisierungsstrategien selten vorhanden ▪ ...
Rechtliche Rahmenbedingungen											
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Datenschutzgrundverordnung ▪ mangelnde Unterstützung durch die Regierung ▪ Bürokratie ▪ bisherige Gesetze und Richtlinien nicht ausreichend ▪ Verantwortung, Zurechnung und Versicherbarkeit von Handlungen autonomer Systeme ▪ Kalkulation von Lizenzgebühren und Erlösen, sowie Steuern ▪ Schutz des geistigen Eigentums ▪ zeit- und kostenaufwendige Zulassungs- und Genehmigungsverfahren ▪ ... 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Technisch</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ IT-Sicherheit (unmittelbar, organisatorisch, personell) ▪ fehlende Standards ▪ Unsicherheit über die Zuverlässigkeit der Systeme ▪ schwache IT-Infrastruktur ▪ schwierige Interoperabilität / Kompatibilität der existierenden IT-Systeme ▪ mangelnde Breitbandversorgung v.a. im ländlichen Raum ▪ Auswahl einer geeigneten Technologie ▪ niedriger Reifegrad der erforderlichen Technologien ▪ Abhängigkeit von Technologien (Softwareausfall, Systemausfall) ▪ ... </td> </tr> </tbody> </table>	Technisch	<ul style="list-style-type: none"> ▪ IT-Sicherheit (unmittelbar, organisatorisch, personell) ▪ fehlende Standards ▪ Unsicherheit über die Zuverlässigkeit der Systeme ▪ schwache IT-Infrastruktur ▪ schwierige Interoperabilität / Kompatibilität der existierenden IT-Systeme ▪ mangelnde Breitbandversorgung v.a. im ländlichen Raum ▪ Auswahl einer geeigneten Technologie ▪ niedriger Reifegrad der erforderlichen Technologien ▪ Abhängigkeit von Technologien (Softwareausfall, Systemausfall) ▪ ... 								
Technisch											
<ul style="list-style-type: none"> ▪ IT-Sicherheit (unmittelbar, organisatorisch, personell) ▪ fehlende Standards ▪ Unsicherheit über die Zuverlässigkeit der Systeme ▪ schwache IT-Infrastruktur ▪ schwierige Interoperabilität / Kompatibilität der existierenden IT-Systeme ▪ mangelnde Breitbandversorgung v.a. im ländlichen Raum ▪ Auswahl einer geeigneten Technologie ▪ niedriger Reifegrad der erforderlichen Technologien ▪ Abhängigkeit von Technologien (Softwareausfall, Systemausfall) ▪ ... 											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Kulturell / Organisatorisch</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Digitale Vision und Kultur ▪ mangelnde Unterstützung durch das Top-Management ▪ restriktive Denkweise ▪ Unternehmensmerkmale (Organisationsstruktur einschließlich Größe, Art des Unternehmens) ▪ Akzeptanz der Mitarbeiter ▪ Interne Entscheidungsfindung ▪ Fokus auf das Tagesgeschäft ▪ Unklare Zuständigkeiten ▪ ... </td> <td style="vertical-align: top;"> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Implementierungsprozess</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarf an neuen Geschäftsmodelle ▪ Fehlen eines methodischen Ansatzes für die Implementierung ▪ hoher Koordinationsaufwand ▪ erforderliche Zeit für die Implementierung ▪ erforderliche Änderungen zur Implementierung von Industrie 4.0 ▪ sinkende Produktivität in der Umstellungsphase ▪ Digitalisierungsstrategien selten vorhanden ▪ ... </td> </tr> </tbody> </table> </td> </tr> </tbody> </table>	Kulturell / Organisatorisch	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Digitale Vision und Kultur ▪ mangelnde Unterstützung durch das Top-Management ▪ restriktive Denkweise ▪ Unternehmensmerkmale (Organisationsstruktur einschließlich Größe, Art des Unternehmens) ▪ Akzeptanz der Mitarbeiter ▪ Interne Entscheidungsfindung ▪ Fokus auf das Tagesgeschäft ▪ Unklare Zuständigkeiten ▪ ... 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Implementierungsprozess</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarf an neuen Geschäftsmodelle ▪ Fehlen eines methodischen Ansatzes für die Implementierung ▪ hoher Koordinationsaufwand ▪ erforderliche Zeit für die Implementierung ▪ erforderliche Änderungen zur Implementierung von Industrie 4.0 ▪ sinkende Produktivität in der Umstellungsphase ▪ Digitalisierungsstrategien selten vorhanden ▪ ... </td> </tr> </tbody> </table>	Implementierungsprozess	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarf an neuen Geschäftsmodelle ▪ Fehlen eines methodischen Ansatzes für die Implementierung ▪ hoher Koordinationsaufwand ▪ erforderliche Zeit für die Implementierung ▪ erforderliche Änderungen zur Implementierung von Industrie 4.0 ▪ sinkende Produktivität in der Umstellungsphase ▪ Digitalisierungsstrategien selten vorhanden ▪ ... 						
Kulturell / Organisatorisch											
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Digitale Vision und Kultur ▪ mangelnde Unterstützung durch das Top-Management ▪ restriktive Denkweise ▪ Unternehmensmerkmale (Organisationsstruktur einschließlich Größe, Art des Unternehmens) ▪ Akzeptanz der Mitarbeiter ▪ Interne Entscheidungsfindung ▪ Fokus auf das Tagesgeschäft ▪ Unklare Zuständigkeiten ▪ ... 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Implementierungsprozess</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarf an neuen Geschäftsmodelle ▪ Fehlen eines methodischen Ansatzes für die Implementierung ▪ hoher Koordinationsaufwand ▪ erforderliche Zeit für die Implementierung ▪ erforderliche Änderungen zur Implementierung von Industrie 4.0 ▪ sinkende Produktivität in der Umstellungsphase ▪ Digitalisierungsstrategien selten vorhanden ▪ ... </td> </tr> </tbody> </table>	Implementierungsprozess	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarf an neuen Geschäftsmodelle ▪ Fehlen eines methodischen Ansatzes für die Implementierung ▪ hoher Koordinationsaufwand ▪ erforderliche Zeit für die Implementierung ▪ erforderliche Änderungen zur Implementierung von Industrie 4.0 ▪ sinkende Produktivität in der Umstellungsphase ▪ Digitalisierungsstrategien selten vorhanden ▪ ... 								
Implementierungsprozess											
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarf an neuen Geschäftsmodelle ▪ Fehlen eines methodischen Ansatzes für die Implementierung ▪ hoher Koordinationsaufwand ▪ erforderliche Zeit für die Implementierung ▪ erforderliche Änderungen zur Implementierung von Industrie 4.0 ▪ sinkende Produktivität in der Umstellungsphase ▪ Digitalisierungsstrategien selten vorhanden ▪ ... 											

Abbildung 2-23: Herausforderungen bei der Digitalisierung von KMU (eigene Darstellung)

2.3.2 Aufbau der Transformationskonzepte

Transformationskonzepte dienen der Umsetzung von Veränderungsvorhaben in Unternehmen mit einem bestimmten Zweck, bspw. der Überführung eines Produktionssystems in ein CPPS. Hierfür können Methoden und Vorgehensweisen des Change- sowie des Projektmanagements herangezogen werden [Schl18], [Gatt00]. Das Changemanagement sowie die zugehörigen Methoden und Vorgehensweisen unterstützen bei der tiefgreifenden Veränderung, die eine Digitalisierung des Unternehmens und dessen Bereichen bedingt. Das Projektmanagement wiederum hilft bei der operativen Umsetzung einzelner Projekte und Maßnahmen zur Digitalisierung.

Im Rahmen des **Changemanagements** werden tiefgreifende Veränderungsprozesse auf Unternehmensebene initiiert, geplant, realisiert, reflektiert und stabilisiert [Kost09]. Das Changemanagement zielt auf mittel- bis langfristige Veränderungen in einem von ständigem Wandel geprägten Umfeld ab, für die eine ganzheitliche Betrachtung der Organisation notwendig ist

[Kost09]. Dabei werden nicht nur strategische Ausrichtungen, sondern auch die organisierte und systematische Anwendung von Wissen, Hilfsmitteln und Ressourcen berücksichtigt [Sche03]. Der Kernprozess des Changemanagements bietet Unternehmen eine methodische Unterstützung, um die angestrebten Veränderungen verwirklichen zu können und gleichzeitig wettbewerbs- und reaktionsfähig zu bleiben [Sche03]. Die Vorgehensweise im Rahmen des Changemanagements ist in Abbildung 2-24 dargestellt:

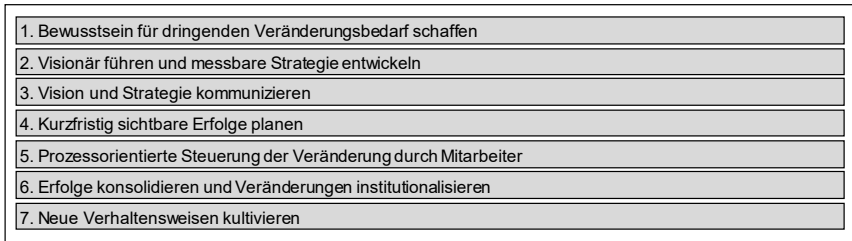


Abbildung 2-24: Vorgehensweise im Changemanagement nach [Kost09]

Einen Ansatz für das Changemanagement bietet der **Veränderungsprozess** nach THUL et al. Dieser ist Teil eines integrierten Metamodells und berücksichtigt die Organisation sowie den Menschen (Abbildung 2-25). Damit der Veränderungsprozess gelingt, müssen beide Aspekte synchronisiert werden, was einen produktiven und wechselseitigen Kontakt zwischen den Initiatoren des Veränderungsprozesses, der Organisation sowie den betroffenen Mitarbeitern erfordert. Um dies zu ermöglichen, besteht das Metamodell aus einem Veränderungs-, Integrations- und Interventionsmodell.

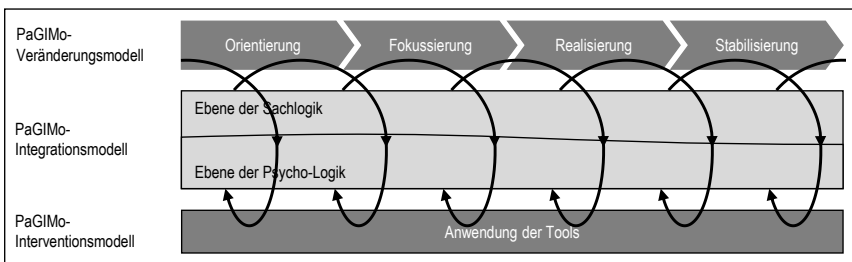


Abbildung 2-25: Changemanagement-Prozess nach [Thul15]

Das Veränderungsmodell beschreibt dabei den grundsätzlichen Ablauf des Veränderungsprozesses, während das Interventionsmodell den Prozessbegleitern die Sicherung der Prozess- und Ergebnisqualität der Veränderung bietet. Das Integrationsmodell beschreibt spezifische Eingriffe auf der Inhaltsebene mit dem Ziel, die psychologische und sachlogische Stimmigkeit der Umsetzung des Veränderungskonzepts sicherzustellen. Dementsprechend ist das Integrationsmodell in eine sachlogische und eine psychologische Ebene unterteilt, die eng miteinander verzahnt sind [Thul15].

Im Gegensatz zum Changemanagement, das eine tiefgreifende Veränderung darstellt, wird durch das **Projektmanagement** meist die Erstellung eines Produkts oder die Implementierung technischer Systeme auf operativer Ebene begleitet und dadurch eine kurzfristige Veränderung eines Zustandes erzielt. Das Projektmanagement stellt umfassende Standards und Anweisungen

zur praktischen Planung und Umsetzung von Projekten im ingenieurwissenschaftlichen Bereich zur Verfügung [Schl18]. Die Implementierung digitaler Technologien kann im Rahmen eines Projekts durchgeführt werden [Kust19]. Dieses beginnt mit der Projektinitialisierung und der Frage danach, warum es durchgeführt werden soll (Abbildung 2-26). Im nächsten Schritt werden das Ziel des Projekts definiert und die Projekteinhalte entsprechend abgegrenzt, sodass geklärt werden kann, was Inhalt des Projekts ist und was nicht [DIN09a]. Anschließend wird die Umsetzung des Projekts formal geplant. Hierzu zählen u. a. das Planen von Vorgängen und Arbeitspaketen, das Erstellen von Kosten- und Finanzmittelplan, die Analyse von Risiken und die Erarbeitung eines Ressourcenplans [DIN09c]. Die Steuerungsphase umfasst die Realisierung und Steuerung des Projekts. Dabei werden u. a. Termine, Ressourcen, Kosten und Finanzmittel mithilfe von Methoden des Projektcontrollings reguliert [DIN09b]. In der letzten Phase wird das Projekt abgeschlossen, indem u. a. ein Abschlussbericht sowie Nachkalkulationen erfolgen und die neuen Erfahrungen gesichert werden [DIN09c]. Die Steuerungsphase kann in weitere Phasen aufgeteilt werden, um die Projekte noch genauer umzusetzen [Timi17]: Dies kann sowohl prozessual mit den Phasen der Realisierung, des Testens und des Rollouts als auch iterativ anhand der Phasen Planung, Ausführung und Überwachung umgesetzt werden [Proj17]. Phasenübergreifende Prozesse bestehen u. a. im Change-, Kosten- oder Risikomanagement [Proj17], [Roth11].

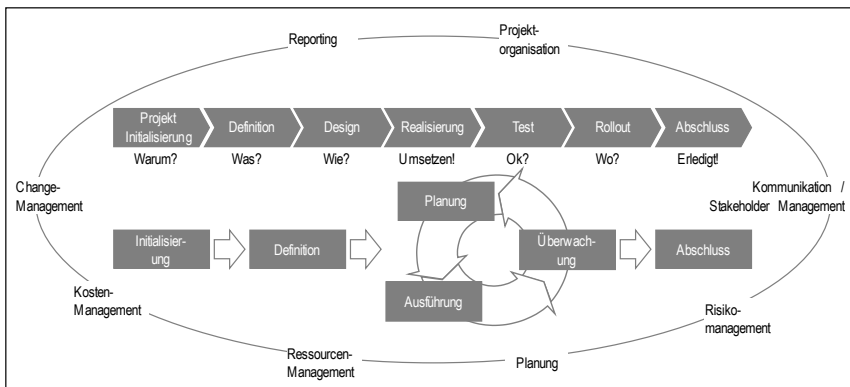


Abbildung 2-26: Projektmanagementphasen nach [Proj17]

Da die Digitalisierung eines Unternehmens nicht nur die technische Umsetzung der digitalen Technologien erfordert, sondern darüber hinaus Fragestellungen in Bezug auf Organisation und Mensch geklärt werden müssen, ist das Changemanagement auch bei **Digitalisierungsprojekten** zu berücksichtigen. Ein Ansatz, der das Vorgehen im Rahmen des Changemanagements mit demjenigen des Projektmanagements kombiniert, wurde von SCHLICHER et al. erarbeitet. Dieser hybride Ansatz beschreibt das Changemanagement im Rahmen von Digitalisierungsprojekten mithilfe der vier Phasen (1) Planung, (2) Umsetzung, (3) Stabilisierung und (4) Evaluation (Abbildung 2-27) [Schl18].

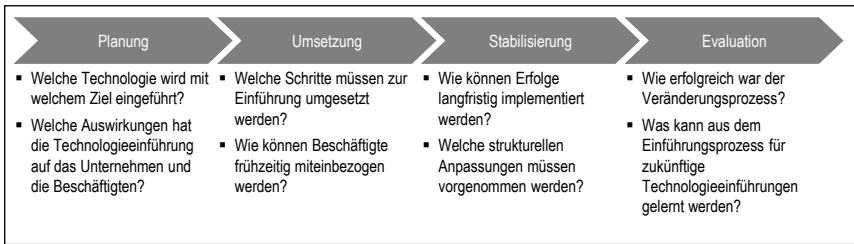


Abbildung 2-27: Phasen des Changemanagements in Digitalisierungsprojekten nach [Schl18]

Zwischenfazit

Insgesamt ist als **Zwischenfazit** festzuhalten, dass die Implementierung digitaler Technologien im Rahmen von Projekten durchgeführt werden kann, während die grundlegende Digitalisierung von Unternehmen und Unternehmensbereichen dem Changemanagement zugeordnet werden muss. Beide Ansätze umfassen verschiedene Vorgehensweisen, wie ein Transformationskonzept zur Digitalisierung von Unternehmen und Unternehmensbereichen aufzubauen ist. Um langfristig von der Implementierung digitaler Technologien profitieren zu können, muss das zu entwickelnde Transformationskonzept auch Charakteristika des Changemanagements beinhalten, z. B. eine Vision oder eine Evaluation nach Projektende. Eine hybride Lösung ist dementsprechend anzustreben.

2.3.3 Referenzmodelle von CPPS

Referenzmodelle stellen Sachverhalte allgemein dar und sind somit wiederverwendbar [Zürn10]. Durch eine Konkretisierung der Sachverhalte lassen sich die Referenzmodelle auf spezifische Anwendungsfälle übertragen [Binn10], [Fett04]. Referenzmodelle bilden dabei keinen endgültigen Zustand ab, sondern entsprechen der Grundlage für eine stetige Weiterentwicklung analog einer Blaupause [Zürn10]. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation besteht der Fokus auf der Entwicklung eines Referenzmodelles, das an das Produktionssystem des jeweils betrachteten KMU angepasst werden kann. Ein Referenzmodell ist zwar im ersten Schritt unabhängig von der Unternehmens- und Digitalisierungsstrategie, aber es kann als Bestandteil integriert werden.

Zur Digitalisierung von Produktionssystemen benötigen KMU eine Zielstellung und idealerweise ein **Zielbild eines digitalisierten Produktionssystems**. Dieses Zielbild stellt einen langfristigen Zielzustand dar, den Unternehmen bspw. mittels Digitalisierungsstrategien formulieren oder anhand von Referenzmodellen identifizieren und visualisieren können. **Digitalisierungsstrategien** sind dabei immer Teil der Unternehmensstrategie [Dupo20b]. Sie legen strategische Ziele fest, die durch digitale Technologien in einem festen Zeitraum erreicht werden sollen. Zudem definieren sie Maßnahmen zur mittel- bis langfristigen Umsetzung [Bitk18].

Für CPPS können z. B. der Ansatz der Digitalen Fabrik [VDI08], die Smart Factory [Luck08b] oder die 5C-Architektur [Lee15] als Referenzmodelle herangezogen werden. Die **Digitale Fabrik** stellt nach VDI 4499 [VDI08] ein umfassendes Netzwerk digitaler Modelle, Methoden und Werkzeuge dar, dessen Basis ein gemeinsames und durchgängiges Datenmanagement ist. Der Ansatz der Digitalen Fabrik strebt nach einer ganzheitlichen Planung, Evaluierung und kontinuierlichen Verbesserung aller Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik

[Kühn06]. Das Ziel ist eine Verkürzung der Planungs- und Inbetriebnahmedauer von Produktionsanlagen durch gemeinsam genutzte digitale Modelle, durch redundanzfreie, aktuelle und korrekte Daten sowie durch eine optimierte Kommunikation [VDI08]. Das durchgängige Datenmanagement stellt dazu Daten bereit und führt diese in Visualisierungswerkzeugen (z. B. Digital Mock-up) zusammen, die aus unterschiedlichen IT-Systemen stammen, etwa CAM, der Finite-Elemente-Methode oder CAD sowie der Layoutplanung, Materialflusssimulation oder Projektverwaltung. Erst im Zuge dieser Datenintegration entsteht eine Digitale Fabrik [Domb17b].

Das Modell der **Smart Factory** basiert auf dem Stuttgarter Modell [West09] der adaptiven, wandelbaren und virtuellen Fabriken [Luck08b]. Die Smart Factory ist eine Fabrik, die kontextabhängig Personen und Maschinen bei der Ausführung ihrer Aufgaben unterstützt. Dies wird durch sog. ‚Calm-Systeme‘ (Hardware) erreicht, die im Hintergrund arbeiten, und kontextsensitive Anwendungen [Luck08a]. Das Smart-Factory-Konzept ermöglicht die Echtzeit-Erfassung, die Verteilung und den Zugriff auf fertigungsrelevante Informationen zu jeder Zeit und an jedem Ort [West13a]. Sie stellt eine Echtzeit-Fertigungsumgebung dar, die Störungen in der Produktion mithilfe dezentraler Informations- und Kommunikationsstrukturen für ein optimales Management von Produktionsprozessen bewältigen kann. Die Voraussetzung für eine weiterreichende Unterstützung sind die horizontale und die vertikale Integration von Informationssystemen sowie die Zuordnung von Material- und Informationsfluss innerhalb eines Unternehmens. Die Einführung der Smart Factory basiert auf verschiedenen Technologien wie IKT, eingebetteten Systemen sowie Sensoren [Luck13].

Die **5C-Architektur** bietet eine Schritt-für-Schritt-Anleitung für die Entwicklung und den Einsatz mehrerer CPS in der Produktion. Die Architektur besteht aus den folgenden fünf Ebenen: (1) Intelligente Konnektivität (Connection), (2) Konvertierung von Daten zu Informationen (Conversion), (3) Digital (Cyber), (4) Kognition (Cognition) und (5) Konfiguration (Configure) (Abbildung 2-28). Auf der ersten Ebene werden Daten durch Maschinen und Komponenten erhoben. Diese können von Sensoren gemessen oder Controllern und IT-Systemen, wie Enterprise-Resource-Planning-(ERP)-Systemen oder Manufacturing-Execution-Systemen (MES), entnommen werden. Dabei sind für die verschiedenen Datentypen Methoden zur einheitlichen Datenerfassung, -übertragung und -verwaltung zu nutzen. Weiterhin ist die Auswahl geeigneter Sensoren für die Erfassung der gewünschten Daten notwendig. Auf der zweiten Ebene werden aus den Daten aussagekräftige Informationen abgeleitet. Gegenwärtig stehen verschiedene Werkzeuge und Methoden für die Konvertierung von Daten zu relevanten Informationen zur Verfügung, etwa Algorithmen oder maschinelles Lernen. Durch die Berechnung des Maschinenzustands, der geschätzten Restnutzungsdauer etc. ermöglicht die zweite Ebene der CPS-Architektur den Maschinen ein Selbstbewusstsein. Die Digital-Ebene fungiert in dieser Architektur als zentrale Informationsschnittstelle: Informationen werden von jeder angeschlossenen Maschine übertragen und zu einem Maschinennetzwerk zusammengeführt. Basierend auf den gesammelten Daten werden spezifische Analysen durchgeführt, um weitere Informationen, z. B. zum Status der Maschinen, zu erhalten, die einen Vergleich zwischen einzelnen Maschinen im Maschinennetzwerk erlauben. Darüber hinaus können Ähnlichkeiten zwischen der Maschinenleistung und früheren Anlagen (historische Informationen) identifiziert werden, um das zukünftige Verhalten der Maschinen vorherzusagen. Die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Ebenen werden dabei grafisch aufbereitet, um dem Nutzer als Entscheidungsgrundlage zu

dienen. Da sowohl vergleichende Informationen als auch individuelle Maschinenzustände zur Verfügung stehen, können Entscheidungen über die Priorität von Aufgaben zur Optimierung der Wartungsprozesse getroffen werden. Die Konfigurationsebene dient der Rückkopplung vom virtuellen in den physischen Raum und fungiert als übergeordnete Kontrollinstanz um Maschinen selbstkonfigurierend und selbstadaptiv zu machen. Diese Ebene stellt somit ein Resilienz-Kontrollsystem dar, um die korrigierenden und präventiven Entscheidungen, die auf der Kognitionsebene getroffen werden, auf das überwachte System anzuwenden [Lee15].

	Zielsetzung	Eigenschaften	Anwendungen
Konfiguration	Aktionen vermeiden	<ul style="list-style-type: none"> ▪ selbstkonfigurierend für Belastbarkeit ▪ Selbstjustierung für Variation ▪ Selbst-Optimierung bei Störungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Überwachungskontrolle → erforderliche Aktionen
Kognition	Entscheidungen priorisieren und optimieren	<ul style="list-style-type: none"> ▪ integrierte Simulation und Synthese ▪ Fernvisualisierung für Menschen ▪ kollaborative Diagnostik und Entscheidungsfindung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grafische Auswertungen
Cyber	Selbstvergleich	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Digitaler Zwilling für Komponenten und Maschinen ▪ Identifizierung und Speicherung von Variationen ▪ Clustering für Ähnlichkeit beim Data Mining 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maschinenpark ▪ adaptive Analyse ▪ gegenseitige Überwachung (Peer-to-Peer) ▪ Momentaufnahme der Maschinen
Konvertierung	Selbsterkenntnis	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Intelligente Analytik für den Zustand von Maschinenkomponenten und für mehrdimensionale Datenkorrelation ▪ Leistungsvorhersage 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Komponenten ▪ Maschinen
Konnektivität	Zustandsüberwachung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plug & Play ▪ tetherfreie Kommunikation ▪ Sensornetz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sensoren ▪ Effektive Sensor-Auswahl

Abbildung 2-28: 5C-Architektur nach [Lee15]

Die beschriebenen Referenzmodelle für CPPS variieren in ihrem Fokus und Detailgrad. Allerdings ist allen Referenzmodellen gemein, dass sie eine Vision bzw. ein Zielbild der Digitalisierung wiedergeben, an dem sich KMU orientieren können.

2.3.4 Reifegradmodelle zur Bestimmung des Digitalisierungsgrads

Zur Bestimmung des Umsetzungsstands der Digitalisierung in Unternehmen können Reifegradmodelle eingesetzt werden. Diese messen den Digitalisierungsgrad, also den Istzustand hinsichtlich der Digitalisierung im Unternehmen, und liefern dadurch einen Ausgangspunkt für eine zielgerichtete Digitalisierung. Im Hinblick auf die I4.0 ist es demnach notwendig, den spezifischen Digitalisierungsgrad einer Organisation zu bestimmen [Lanz16].

Reifegradmodelle bewerten unter Zuhilfenahme von Entwicklungsstufen den aktuellen Entwicklungszustand [Hers77] von Änderungen in Organisationen hinsichtlich einer festgelegten Thematik wie z. B. der Digitalisierung oder einer spezifischen (digitalen) Technologie [Mett10b]. Die aufeinander aufbauenden Entwicklungsstufen werden als ‚Reifegrade‘ bezeichnet [Hech14] und das Reifegradmodell dient als deren Bewertungsinstrument [Leyh16b]. Im Kontext der Digitalisierung können Unternehmen inhaltlich geeignete Reifegradmodelle nutzen, um ihre aktuelle Entwicklungsstufe zu bestimmen und so mögliche Probleme bezüglich

der digitalen Transformation von Arbeitssystemen zu identifizieren sowie durch einen iterativen Einsatz den Zwischenstand der Weiterentwicklung aufgezeigt zu bekommen [Hech14].

Die Entwicklungsstufen eines Reifegradmodells werden synonym als **Reifegrade oder Reifegradstufen** bezeichnet [Beck09b]. Dabei beschreibt und bewertet ein Reifegrad den Entwicklungsstand eines Systems bezogen auf eine bestimmte Grundfragestellung (z. B. den Grad der Automatisierung der Fertigung und Digitalisierung von Prozessen) auf der Basis einer systematischen Analyse sowie unter Verwendung quantitativer und qualitativer Kriterien innerhalb eines festgelegten Skalenbereichs. Der Skalenbereich wird bestimmt durch einen Anfangspunkt (den niedrigsten Entwicklungsgrad) und einen Endpunkt (den höchsten Entwicklungsgrad) [Leyh16a]. Sie beschreiben somit einen Entwicklungspfad für den gesamten Entwicklungsprozess von dessen Beginn bis zum Erlangen der größten Reife im betrachteten System. Sie bilden somit einen quasi evolutionären Prozess ab, der durchlaufen werden kann, um für das Bezugssystem des Reifegradmodells ein bestimmtes Ziel oder eine gewünschte Fähigkeit zu erreichen. Solche Bezugssysteme sind bspw. Technologien, Arbeitssysteme etc. [DIN16]. Ein Reifegrad beschreibt die Merkmale (**Indikatoren**) und deren **Ausprägungen**, die das jeweilige Bezugssystem aufweisen muss, um den entsprechenden Reifegrad zu erreichen. Diese Indikatoren können in sog. **Dimensionen** gruppiert werden. Diese wiederum ermöglichen eine multidimensionale Reifegraderhebung [Beck09b], [Leyh16a]. Ausgehend von der identifizierten Istsituation zeigen Reifegradmodelle Handlungsempfehlungen zur Erlangung der nächsthöheren Reifegradstufe auf [Beck09b]. Stehen Reifegradmodelle thematisch im Kontext der Digitalisierung, so werden die entsprechenden Reifegrade auch als ‚Digitalisierungsgrade‘ bezeichnet: Der **Digitalisierungsgrad** beschreibt den Reifegrad von bspw. Unternehmen, Produktionssystemen oder Technologien hinsichtlich der Digitalisierung [Sied20c].

Zusammenfassend besteht ein Reifegradmodell aus den folgenden **vier wesentlichen Bestandteilen**:

- einer festgelegten Anzahl beschriebener Reifegradstufen,
- einer bestimmten Anzahl an Indikatoren und deren Ausprägungen, ggf. gruppiert nach verschiedenen Dimensionen,
- der Zuordnung der Ausprägungen zu den Reifegradstufen, sodass diese dadurch beschrieben werden, und
- Handlungsempfehlungen zum Erreichen der einzelnen Reifegradstufen.

Ansätze zur Bestimmung des Digitalisierungsgrads von Unternehmen

Der Digitalisierungsgrad von Unternehmen kann mithilfe geeigneter Reifegradmodelle bestimmt und beschrieben werden. Im Folgenden wird eine Auswahl entsprechender Reifegradmodelle näher erläutert, die für diese Dissertation besonders relevant sind. Weitere, weniger relevante Reifegradmodelle sind in Kapitel 9.1.1 im Anhang beschrieben.

Der **Readiness Check „Digitalisierung“** dient der systematischen Erfassung von Chancen und Potenzialen der Digitalisierung für Unternehmen, insbesondere KMU. Zu diesem Zweck wurden die fünf Reifegradstufen Erkunder, Einsteiger, Fortgeschrittener, Experte und Vorreiter entwickelt, die auf die Dimensionen Strategie, Technologie, Produkte und Dienstleistungen, Organisation und Prozesse sowie Mitarbeiter angewandt werden [Hell18].

Der **acatech I4.0 Maturity Index** unterstützt Unternehmen bei ihrer Transformation in ein digitales, lernendes und agiles Unternehmen. Dabei werden technologische, organisatorische und kulturelle Aspekte sowie Unternehmensprozesse produzierender Unternehmen berücksichtigt. Die betrachteten Dimensionen sind die Ressourcen, Informationssysteme, organisatorische Strukturen und Kultur. Die Bewertung der Dimensionen wird auf die Unternehmensprozesse Entwicklung, Produktion, Logistik, Service sowie Marketing und Sales angewandt und in einem Spinnennetzdiagramm visualisiert [Schul7a].

Das **I4.0-Assessment** wurde zur Identifikation und Priorisierung von Umsetzungsmaßnahmen hinsichtlich der Digitalisierung in KMU entwickelt. Es berücksichtigt die Dimensionen Operations, Organisation, Kultur sowie Technologie und ordnet jeder ein I4.0-Konzept wie ein agiles Produktionssystem oder Cloud-Computing zu. Das jeweilige Konzept wird anhand seines Istzustands, Zielzustands und seiner Relevanz für die Digitalisierung von KMU bewertet. Basierend auf dem Ergebnis können vorgeschlagene standardisierte Strategien zur Priorisierung geeigneter I4.0-Maßnahmen ausgewählt und angewendet werden [Matt18], [Matt19], [Rauc20].

KNOSPE entwickelte einen **I4.0-Benchmark** basierend auf einem Reifegradmodell. Dieser Benchmark soll die Leistungssteigerung eines Unternehmens im Kontext von I4.0 ermöglichen. Dazu wird zunächst die Ausgangssituation mit Fokus auf den Dimensionen Technik, Business und Mensch ermittelt. Jeder Dimension sind vier Handlungsfelder mit spezifischen Kriterien zugeordnet, anhand derer die Leistungsfähigkeit des Unternehmens bezüglich I4.0 gemessen werden kann. Innerhalb eines Workshops werden die Kriterien evaluiert und anschließend, bspw. mithilfe von Prozess- und Wertschöpfungsanalysen, näher analysiert. Daraufhin werden I4.0-Umsetzungspfade vorgeschlagen, die die Erreichung des angestrebten Zielzustandes unterstützen [Knos18].

Der **Quick-Check** vom Kompetenzzentrum ‚Digital in NRW‘ unterstützt KMU bei der Ermittlung ihres Digitalisierungsgrads. Anhand von neun Dimensionen und zugehörigen Kriterien wird der Reifegrad der Automatisierung und Vernetzung des gesamten Unternehmens bewertet sowie in einem Spinnennetzdiagramm dargestellt. Der Digitalisierungsgrad der KMU wird in fünf Reifegradstufen eingeordnet. Mithilfe der Durchführung von Potenzialanalysen und Gestaltungsworkshops zur Ermittlung des Zielreifegrads können Umsetzungsmaßnahmen identifiziert und anschließend implementiert werden [Krau18].

Der **Digital Readiness Level 4.0** wurde zur Bestimmung der digitalen Bereitschaft italienischer KMU entwickelt und unterscheidet fünf Reifegradstufen. Er berücksichtigt zudem die Dimensionen Strategie, Mensch, Prozess, Technologie und Integration. Das entwickelte Reifegradmodell wurde durch den Einsatz in zwanzig verschiedenen KMU validiert und die Ergebnisse in Spinnennetzdiagrammen dargestellt. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse der zwanzig KMU genauer analysiert und die Herausforderungen der I4.0 für KMU sowie die Technologieadaptation betrachtet [Piro19].

Das **InAsPro-Reifegradmodell** bestimmt den Digitalisierungsgrad eines produzierenden Unternehmens. Es umfasst Kriterien und Indikatoren aus unternehmensübergreifender Sicht sowie aus der Perspektive der Entwicklung, Fertigung, Montage und des Aftersales sowie die vier Dimensionen MTO und Strategie. Seine Kriterien beinhalten z. B. die IT-Systemgestaltung, das Datenmanagement sowie die Unternehmenskultur. Jedem Kriterium sind Indikatoren zugeord-

net, die anhand einer vierstufigen Skala bewertet werden. Diese vier Stufen spiegeln die Reifegradstufen des berechneten Gesamtdigitalisierungsgrads des Unternehmens wider, der ausführlich durch die Dimensionen beschrieben ist [Sied20c].

Ansätze zur Bestimmung des Digitalisierungsgrads von Produktionssystemen

Der Digitalisierungsgrad eines Produktionssystems kann ebenfalls mithilfe von Reifegradmodellen bestimmt und beschrieben werden. Im Folgenden wird eine Auswahl dazu geeigneter Reifegradmodell aufgezeigt sowie kurz erläutert, die besonders relevant für die vorliegende Dissertation sind. Weitere, weniger relevante Reifegradmodelle werden in Kapitel 9.4.2 im Anhang vorgestellt.

Der Leitfaden I4.0 stellt Werkzeuge und Vorgehensweisen zur Umsetzung von I4.0-Geschäftsmodellen für KMU zur Verfügung, wobei der sog. **Werkzeugkasten I4.0** als Ausgangspunkt zur Einordnung der Kompetenzen der betrachteten Unternehmen dient. Im Rahmen des Werkzeugkastens werden verschiedene Anwendungsebenen der I4.0 bezüglich Produkt und Produktion aufbereitet und in jeweils fünf technologisch aufeinander aufbauende Entwicklungsstufen unterteilt. Die ausgewählten Entwicklungsstufen können in einem Kompetenzprofil grafisch dargestellt werden, sodass das Unternehmen auf dieser Grundlage Handlungsempfehlungen ableiten kann. Der Leitfaden I4.0 ordnet den einzelnen Entwicklungsstufen Technologieeigenschaften zu [Ande15].

Das **I4.0-Audit** evaluiert die Produktion sowie die angrenzenden Bereiche eines Unternehmens hinsichtlich des Digitalisierungsgrads. Den Dimensionen Mensch, Technik und Personal werden dabei Kriterien zugeordnet, die zwischen drei und acht Ausprägungen aufweisen. Das Reifegradmodell berücksichtigt Abhängigkeiten zwischen den Ausprägungen der Kriterien. So muss z. B. erst eine Ausprägung des ersten Kriteriums erreicht werden, bevor eine höhere Ausprägung eines zweiten Kriteriums erreicht werden kann. Über ein zugehöriges Softwaretool können so der Ist- sowie der Sollzustand der Digitalisierung der Produktion bewertet werden [Lein18a], [Lein18b], [Morl16].

Das **I4.0-Reifegradmodell** zielt auf die Evaluation der Produktion sowie produktionsnaher Bereiche ab, um unternehmensindividuelle Entwicklungspotenziale zu identifizieren und dadurch die Produktion zu verbessern [Hüb17]. Dies wird anhand der fünf Handlungsfelder Organisation und Administration, Produktionsplanung und -steuerung, Qualitäts- und Störungsmanagement, Arbeitsstation sowie Produkt durchgeführt. Dazu werden der Ist- und der Sollzustand auf einer Skala von eins bis vier bewertet und das Ergebnis in einem Spinnennetzdiagramm dargestellt [Hüb18].

Das Reifegradmodell **Produktionsassessment 4.0** beinhaltet eine Weiterentwicklung von Lean-Management- und I4.0-Methoden in der variantenreichen Serien- und Einzelfertigung im verarbeitenden Gewerbe [Hämm18]. Hierbei werden die Dimensionen Strategie, Personal, Organisation, Methoden & Tools sowie Prozesse & Wertstrom betrachtet. Jede dieser Dimensionen beinhaltet Teilbereiche (z. B. ‚digitales Abbild der Produktion‘ oder ‚Cloud-Nutzung‘), die wiederum aus sog. ‚Betrachtungspunkten‘ (z. B. ‚Transparenz der Materialflüssen in Echtzeit‘ oder ‚digitales Fabriklayout‘) bestehen. Das zweistufige Reifegradmodell bewertet zunächst die Betrachtungspunkte mit Fertigungsgraden (die im Kontext der vorliegenden Dissertation Reifegraden entsprechen) von eins bis vier und zeigt in einem zweiten Schritt den Migrationspfad zur I4.0 auf. Jeder Teilbereich wird den Kategorien Lean Management, I4.0 Fundamentals und

I4.0 Excellence zugeordnet. Das Lean Management bildet dabei die Ausgangsbasis und eine I4.0 Excellence den angestrebten Zielzustand für die identifizierten Migrationspfade [Poko17].

Das **Smart Manufacturing Adoption Framework** stellt ein Reifegradmodell zur Digitalisierung des Produktionssystems von KMU dar. Zur Bewertung der Kriterien der Dimensionen Finanzen, Mensch, Strategie, Prozess und Produkt werden die im Produktionssystem erhobenen Daten herangezogen. Das Reifegradmodell zeigt auf, ob Daten im Produktionssystem aufgenommen, übertragen, gespeichert oder analysiert werden. Dabei stellt die reine Aufnahme von Daten den niedrigsten Reifegrad und deren Analyse den höchsten Reifegrad der Digitalisierung dar. Zur Verbesserung der Datenverwendung werden anschließend Handlungsempfehlungen gegeben [Mitt20].

2.3.5 Technologietrends der Digitalisierung und I4.0

Die Identifikation geeigneter digitaler Technologien stellt eine signifikante Herausforderung für KMU dar (Kapitel 2.3.1). Um dieser Herausforderung zu begegnen, wird nachfolgend aufgezeigt, wie Technologietrends der Digitalisierung kategorisiert und somit leichter verständlich sowie zugänglich gemacht werden können. Auf dieser Basis können geeignete digitale Technologien zielgerichteter identifiziert und ausgewählt werden (Kapitel 2.3.6).

Die Schlagwörter, mittels derer versucht wird, die Technologietrends der Digitalisierung zu beschreiben und zu kategorisieren, variieren stark hinsichtlich ihres Detailgrads. Meist stehen eine Mischung aus einzelnen Technologien und Technologiegruppen im Fokus, die als I4.0 oder digitale Technologien gelten, wie bspw. Cloud Computing [Gaus17], künstliche Intelligenz [Müll17] oder Big Data [Schi17]. Außerdem werden einzelne digitale Technologien bezüglich ihres Verwendungszwecks unterteilt, z. B. zur Markt- und Wettbewerberanalyse, zur Produktionsoptimierung mit Maschinen- und Sensordaten oder zur Optimierung von Lieferketten [Urba12]. Ein weiterer Ansatz besteht in der Unterteilung in verschiedene Anwendungsszenarien, bspw. die auftragsgesteuerte Produktion, adaptive Logistik oder wandlungsfähige Fabrik [Dors16]. Überdies soll eine Zuordnung zu Anwendungsebenen, etwa einer Integration von Sensoren bzw. Aktoren, Mensch-Maschine-Schnittstellen oder der Effizienz bei kleinen Losgrößen [Ande15], mehr Klarheit im Bereich der Digitalisierung und I4.0 schaffen. Ein anderer Ansatz zur Kategorisierung der technologischen Trends basiert auf dem Zweck, die die technischen Komponenten erfüllen sollen, wie dem Unterstützen bei der Entwicklung neuartiger Geschäftsmodelle. Dazu werden u. a. die I4.0-Komponenten Internet der Dinge, Augmented Reality sowie selbstlernende Systeme festgelegt [Kauf15]. Die verwendeten Schlagwörter, mit denen eine Kategorisierung der Technologietrends der Digitalisierung sowie der I4.0 vorgenommen wird, sind beispielhaft in Abbildung 2-29 und ausführlich in Kapitel 9.6 dargestellt.

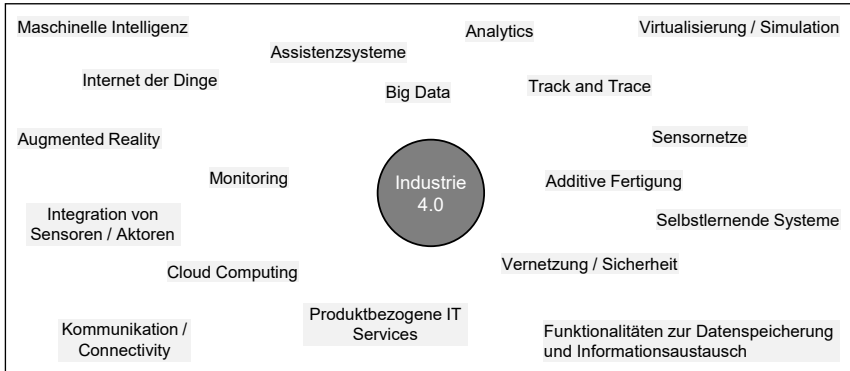


Abbildung 2-29: Technologietrends im Bereich Digitalisierung und I4.0 (Beispiele) (eigene Darstellung)

2.3.6 Identifikation und Implementierung digitaler Technologien

In diesem Kapitel werden Methoden zur Identifikation und zum Monitoring digitaler Technologien thematisiert. Anschließend werden weitere Methoden vorgestellt, die die Implementierung digitaler Technologien unterstützen, indem sie deren Zusammenhänge und Wechselwirkungen identifizieren. Das ist notwendig, um mögliche Inselfösungen in Produktionssystemen zu verhindern.

Identifikation und Monitoring digitaler Technologien

Zur Identifikation von (digitalen) Technologien können die Aktivitäten der **Technologiefrüherkennung** angewandt werden. Diese ist Teil des Technologiemanagements (Kapitel 2.1.5) und hat zum Ziel, technologische Potenziale zu analysieren und prognostizieren sowie die Leistungsgrenzen bestehender Technologien im jeweiligen Unternehmen zu bestimmen [Schu11]. Sie unterstützt somit die Technologieentscheidung basierend auf den Entwicklungen der für das Unternehmen strategisch relevanten Technologiefelder [Bull94]. Im Fokus der Technologiefrüherkennung stehen Produkt-, Produktions- und Materialtechnologien sowie die zugehörigen technologischen Informationen [Schö18a]. Die signifikante Menge an Informationen und Informationsquellen, die für die Technologiefrüherkennung berücksichtigt werden, macht deren Strukturierung erforderlich, um eine gezielte Suche nach geeigneten Technologien zu ermöglichen. Eine solche Strukturierung kann z. B. nach dem neuen St. Galler Management-Modell vorgenommen werden: Es unterteilt nicht nur die Umwelt in sog. Sphären wie die Gesellschaft, Natur, Technologie und Wirtschaft, sondern berücksichtigt auch Management-, Geschäfts- und Unterstützungsprozesse. Des Weiteren werden organisatorische Themen betrachtet [Rüeg17]. Zur Steigerung der Erfolgswahrscheinlichkeit der Technologiefrüherkennung werden bestimmte Systematiken eingesetzt, zu denen das **Scanning, Monitoring und Scouting** von Technologien zählen. Das Scanning stellt eine stetige, ungerichtete Suche nach Technologien dar [van 97], während Monitoring eine systematische Verfolgung von Technologien über einen festgelegten Zeitraum nach vordefinierten Suchfeldern beschreibt. Mittels Scouting wird der Wissensstand im Rahmen projektspezifischer Aufträge erweitert und vertieft [Schu14].

Zur **Visualisierung und Kategorisierung** der identifizierten Technologien können verschiedene Methoden wie z. B. Technologieportfolios, -radare, -kurven [Wars15] oder ein Technologieatlas eingesetzt werden. Das **Technologieportfolio** nach PFEIFFER analysiert und bewertet zukünftige technologische Aktivitäten [Klei06], indem diese über ein Punktebewertungsverfahren im Hinblick auf ihre Attraktivität im Verhältnis zur Ressourcenstärke des Unternehmens evaluiert werden. Die Technologieattraktivität wird anhand der Technologie-Potenzial-Relevanz und der Technologie-Bedarfs-Relevanz in die Kategorien niedrig, mittel und hoch eingeordnet [Pfei91], [Pfei90]. Der Portfolioansatz nach BOOZ, ALLEN & HAMILTON verknüpft Technologie-Investitionen mit der Unternehmensstrategie [Schu11]. Auf Basis des technologischen Istzustands im Unternehmensumfeld werden, abhängig von der Bedeutung der zu bewertenden Technologie und der relativen Technologie-Position, die Investitionsprioritäten ermittelt [Booz81]. Demgegenüber erfasst der Portfolioansatz von MCKINSEY auf Grundlage des sog. S-Kurven-Konzepts, das den Reifegrad einer Technologie darstellt, die Ausschöpfung des Technologiepotenzials quantitativ. Dabei wird ein integriertes Portfolio verwendet, das die Dimensionen Markt- sowie Technologiepriorität berücksichtigt und anhand dessen der Forschungs- und Entwicklungseinsatz der einzelnen Technologien für ein Unternehmen abgeleitet werden kann. Dieser Einsatz kann defensiv, selektiv oder aggressiv sein [Krub82], [Henz80], [Fost81].

Technologiekurven repräsentieren den Technologieentwicklungsprozess in Abhängigkeit von der Entwicklung der technologischen Wettbewerbs- oder der Leistungsfähigkeit [Mich90]. Anhand bestimmter Kriterien lässt sich so über einen definierten Zeitraum die Entwicklung einer oder mehrerer Technologien verfolgen, wodurch zukünftige Entwicklungen besser eingeschätzt werden können [Wars15].

Der **Technologieradar** ist ein Visualisierungswerkzeug, das eine größere Anzahl an Technologien bewertet und dabei drei Dimensionen (Reifegrad, Technologiefeld und Relevanz der Technologie) berücksichtigt [Gaus17], [Sied19b], [Wars15]. Er wird verwendet, um Technologien mit dem Ziel auszuwählen, einen Wettbewerbsvorteil zu gewinnen. Dieser Vorteil wird zum einen durch eine frühzeitige Identifizierung der Möglichkeiten und Risiken generiert, die durch Technologieentwicklungen entstehen können, und zum anderen mittels der Bereitstellung technologischer Optionen [Rohr10]. Der Technologieradar erlaubt eine Bewertung hinsichtlich der drei Dimensionen Technologiefeld, Grad der Ausschöpfung des Wettbewerbspotenzials und Technologieart. Zum einen wird er hierfür in Technologiefelder unterteilt [Wars15]; zum anderen kann die Position der Technologie im Radar bspw. den Grad der Ausschöpfung des Wettbewerbspotenzials darstellen. Je näher sich die Technologie zum Zentrum des Radars befindet, desto geringer ist der Grad der Ausschöpfung des Wettbewerbspotenzials (S-Kurve). Dadurch werden alle relevanten Schrittmacher-, Schlüssel- und Basistechnologien ersichtlich. Die dritte Dimension wird durch die Farbe bzw. Form der Technologiemarkierung ausgedrückt, die die Art der Technologie widerspiegelt [Gaus17].

Der **Technologieatlas** sammelt tabellarisch eine Vielzahl an Technologien. Im Gegensatz zum Technologieradar betrachtet der Technologieatlas jedoch mehrere Technologiefelder parallel [Sied19b], [Tafv18] und beinhaltet eine detaillierte Beschreibung der Technologien [Blum15]. Zudem können unternehmensspezifische Problemstellungen berücksichtigt, sowie Produktlebenszyklusphasen und Mitarbeiterziele integriert und betrachtet werden. Dies unterstützt Unternehmen bei der Auswahl geeigneter (Digitalisierungs-) Technologien zur unternehmensindividuellen Problemstellung [Dupo20a].

Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen digitalen Technologien bei der Implementierung

Bei der **Implementierung digitaler Technologien** ist darauf zu achten, dass in Produktionssystemen keine Insellösungen entstehen, die nicht mit anderen Lösungsansätzen benachbarter Bereiche kompatibel sind. Eine Insellösung entspricht einer in sich abgeschlossenen digitalen Technologie oder IT-Lösung, die nur in einem bestimmten Bereich des Produktionssystems oder Unternehmens bei spezifischen Aufgaben oder Prozessen eingesetzt wird [Groß19]. Des Weiteren sind Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen digitalen Technologien zu berücksichtigen, indem z. B. neue Technologien bereits bestehende als Voraussetzung erfordern, diese ersetzen, mit ihnen kombinierbar sind oder sich gegenseitig ausschließen [Dupo20a].

Im Allgemeinen beschreiben **Wechselwirkungen** Interaktionen zwischen Dingen, Personen oder Systemen, die gegenläufig oder widersprüchlich sein können [Brei97]. Zur Veranschaulichung kann das dritte newtonsche Axiom [Gros15], auch Wechselwirkungsprinzip bzw. -gesetz [Gros11], genannt werden: Es besagt, dass zu jeder Kraft eine gleichgroße Gegenkraft gehört, die in die entgegengesetzte Richtung wirkt.

Im Folgenden werden Ansätze zur Berücksichtigung der Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen digitalen Technologien, Methoden und Prozessen in Produktionssystemen näher betrachtet. Ergänzende grundlegende Ansätze zur Bestimmung von Wechselwirkungen werden in Kapitel 9.7 im Anhang erläutert.

Ein entsprechender Ansatz analysiert die **Wechselwirkungen von GPS und I4.0**. Als Basis dienen Fallstudien, von denen eine I4.0-Struktur abgeleitet wurde. Die Einteilung der Struktur erfolgt anhand von Prozesseigenschaften, Systemen und Technologien, während das GPS nach acht Gestaltungsprinzipien kategorisiert ist. Das Auftreten der Bestandteile der Industrie-4.0-Struktur sowie der GPS-Gestaltungsprinzipien in den betrachteten Anwendungsfällen wird quantitativ analysiert. Anschließend werden Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen GPS-Prinzipien und Technologien sowie Prozesseigenschaften der I4.0 abgeleitet [Domb17a].

Der fünfstufige Ansatz zur **Analyse von Wirkzusammenhängen von I4.0-Methoden** beschreibt die Vorgehensweise einer Wechselwirkungsanalyse beginnend mit einer Definition der Problemstellung sowie des Ziels. I4.0-Methoden sind in diesem Kontext planmäßige, systematische und durch Hilfsmittel unterstützte Vorgehen, um die Ziele eines Unternehmens durch den Einsatz neuer I4.0-Technologien zu erreichen. Jeder I4.0-Methode werden Zielgrößen und deren unternehmensspezifische Kennzahlen zugeordnet. Die anschließende qualitative Analyse basiert auf diesen Kennzahlen. Die verwendeten Methoden sowie deren Kennzahlen werden je nach Unternehmen ausgewählt und anschließend in einer Matrix dargestellt. Die Wechselwirkungen zwischen den I4.0-Methoden werden dabei in unterstützende und voraussetzende Methoden unterteilt. Im Rahmen der quantitativen Analyse erhalten die identifizierten Wechselwirkungen Werte, die hinsichtlich der Ausprägung der Methode variieren. Mittels Befragungen von Experten werden die Industrie-4.0-Methoden und Kennzahlen sowohl quantitativ als auch qualitativ bewertet. Abschließend werden die Ergebnisse in Form eines System-Dynamics-Modells simuliert und ausgewertet [Lieb18c].

Der Ansatz zur Identifikation von **Wechselwirkungen zwischen digitalen Technologien** fokussiert im ersten Schritt die Voraussetzungen der einzuführenden und der existierenden digitalen Technologien. Dabei wird unterschieden, ob die digitalen Technologien keinen, optionalen oder verpflichtenden Voraussetzungen zu ihrer Implementierung bedürfen. Den Kernbestandteil des Konzepts bildet eine fünfstufige Skala, die in einem Matrixdiagramm verwendet wird und den Zusammenhang der digitalen Technologien untereinander beschreibt: (1) identisch, (2) ergänzend, (3) neutral, (4) konkurrierend und (5) gegensätzlich (Antinomie). Abschließend erfolgt eine Zuordnung der identifizierten und bewerteten digitalen Technologien zu einzelnen Prozessschritten, die zur Entscheidungsunterstützung dienen kann [Sied19a].

Der Ansatz nach DUPONT et al. verwendet eine Vernetzungsmatrix zur Visualisierung von **Wechselwirkungen zwischen mehreren einzuführenden Digitalisierungslösungen**. Die Wechselwirkungen werden in vier Kategorien unterteilt: (1) zwischen den Digitalisierungslösungen gibt es keinen Zusammenhang, sie können parallel eingesetzt werden; (2) eine existierende Digitalisierungslösung ist eine Voraussetzung für die einzuführende; (3) die Digitalisierungstechnologien können miteinander kombiniert werden oder (4) aufgrund gleicher Funktionalitäten ersetzt eine Digitalisierungslösung eine andere [Dupo20a].

Die Ansätze zur Identifikation von Wechselwirkungen variieren hinsichtlich ihres Detailgrads und stellen oft nur subjektive Bewertungsverfahren dar. Jedoch können sie bspw. durch die geeignete Auswahl einer Bewertungsskala objektiver gestaltet werden.

2.3.7 Kennzahlen zur Kontrolle des Fortschritts der Digitalisierung von Produktionssystemen

Eine **Kennzahl** (ein Key Performance Indicator, KPI) ist definiert als ein quantitativer Grad der Erreichung eines kritischen Ziels [ISO14a]. Somit stellt ein KPI eine quantifizierbare und strategische Messung dar [ISO14b], die direkt oder durch eine mathematische Aggregationsfunktion von z. B. physikalischen Messungen, Daten und anderen KPIs abgeleitet werden kann [ISO14a]. KPIs können den kritischen Erfolg eines Unternehmens widerspiegeln und helfen bspw. dabei, die Fertigungsleistung zu verstehen und zu verbessern [ISO14b]. Beispiele für KPIs in der Fertigung sind z. B. die Durchsatzrate [Kang16], die OEE [Brun17], [Hon05] sowie der Ertrag des ersten Durchgangs (First Pass Yield, FPY) [Brun17], [Kang16].

Da zur Beschreibung der Fertigung eine Vielzahl von KPIs existieren, versuchen verschiedene Ansätze, sie nach unterschiedlichen Systematiken, sog. **Performance-Measurement-Systemen**, zu strukturieren. Die ISO 22400 teilt KPIs gemäß den Elementen Zeit, Logistik und Qualität ein. Ein Beispiel eines Zeitelements ist die Ist-Transportzeit (Actual Transportation Time, ATT), ein logistisches Element wird durch die produzierte Menge (Produced Quantity, PQ) dargestellt, während ein Qualitätselement dem Anteil an Gutteilen entspricht (Good Parts, GP) [ISO14b]. Eine weitere Systematik wurde von BRUNDAGE definiert und verwendet eine hierarchische Struktur, die zwischen Low-Level-Metriken, Mid-Level-Metriken und KPIs unterscheidet. Low-Level-Metriken sind messbare Werte, etwa die Anzahl an Gutteilen (Good Quantity, GQ), während Mid-Level-Metriken durch Low-Level-Metriken, z. B. PQ, berechnet werden. Die KPIs werden dann durch die Metriken auf mittlerer Ebene berechnet, z. B. FPY [Brun17]. Ein anderer Ansatz unterscheidet zwischen Leistungs- sowie Kostenindikatoren und dem Zielsystem. Indikatoren sind z. B. die Durchlaufzeit oder die Kosten des internen Trans-

ports, während das Zielsystem KPIs wie eine hohe Verfügbarkeit und niedrige Lagerhaltungskosten beinhaltet [VDI04]. KANG kategorisiert KPIs in drei Hierarchien: umfassende KPIs, Basis-KPIs sowie unterstützende Elemente. Darüber hinaus sind die KPIs auf jeder Ebene nach ihren Funktionen und Attributen gruppiert. Die unterstützenden Elemente repräsentieren die Daten, die während der Fertigung direkt erhoben werden. Auf dessen Grundlage können die Basis-KPIs berechnet werden [Kang16].

Der Ansatz von WAGNER [Wagn18] kombiniert **CPPS mit KPIs**. Dabei sind die KPIs in vier Kategorien gegliedert: (1) Prozesse, (2) Arbeiter, (3) Finanzen und (4) Kunden. Die Kategorie der Prozesse wird zusätzlich in die Bereiche Fertigung und Logistik unterteilt. Innerhalb der Fertigung werden KPIs zur Prozesseffizienz, z. B. Durchsatz, und zur Fertigungseffizienz, bspw. OEE, angegeben. Für jeden KPI werden sog. CPPS-Lösungen angegeben. Eine CPPS-Lösung stellt ein konkretes Anwendungsbeispiel dar, z. B. die intelligente Logistik mithilfe autonom geführter Fahrzeuge oder die Prozesssicherung in der vielseitigen, flexiblen Montage. Der Einfluss der CPPS-Lösung auf den jeweiligen KPI wird mit verschiedenen Symbolen visualisiert, um positive, negative oder keine Wirkung zu zeigen [Nöhr18].

Der Ansatz von SIEDLER et al. basiert auf dem Konzept nach KANG; er modelliert und simuliert mithilfe von System Dynamics die **Effekte des Einsatzes digitaler Technologien in Produktionssystemen auf KPIs**, um die Entscheidung zur Einführung einer digitalen Technologie zu erleichtern. Die dabei unterstützenden Elemente stellen gemessene Werte dar, die die Basis-KPIs beeinflussen, die wiederum Auswirkungen auf die umfassenden KPIs haben. Die Einflüsse sind im Modell anhand von Pfeilen visualisiert und durch eine Sensitivitätsanalyse sowie eine Monte-Carlo-Simulation quantifiziert. Der Einfluss einer digitalen Technologie auf ein unterstützendes Element wird dabei geschätzt und muss durch Versuche und Tests im realen Umfeld bestimmt werden, wodurch ein genaues Ergebnis erhalten werden kann [Sied20d].

Als **Zwischenfazit** ist festzuhalten, dass Kennzahlen den Fortschritt der Digitalisierung lediglich grob anzeigen, da eine genaue Angabe entsprechend zeitintensive Tests im realen Umfeld erfordern würde. Dennoch können bestehende Ansätze herangezogen werden, um eine erste Abschätzung zu erhalten.

2.4 Bewertung und Fazit zum Stand von Wissenschaft und Technik

Im Folgenden werden die vorangehenden Kapitel zusammengefasst und Anforderungen zur Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU definiert. Anschließend werden die bestehenden Ansätze zur Digitalisierung von Unternehmen und Produktionssystemen anhand der Anforderungen bewertet (Kapitel 2.4.1). Das Kapitel schließt mit einem Fazit zum Stand von Wissenschaft und Technik und zeigt die Forschungslücke auf (Kapitel 2.4.2).

2.4.1 Anforderungen an ein Konzept zur Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU

Basierend auf den Erkenntnissen aus den vorhergehenden Teilkapiteln werden Anforderungen (A1–A7) an ein Konzept zur Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU formuliert. Diese dienen zur Bewertung vorhandener Ansätze, zur Bestimmung des Digitalisierungsgrads eines Produktionssystems sowie zur Evaluation vorhandener Transformationskonzepte. Zusätzlich fungieren diese Anforderungen im weiteren Verlauf als Lastenheft zur Entwicklung eines unternehmensindividuellen Konzepts zur Digitalen Transformation eines Produktionssystems.

Es muss ein Transformationskonzept entwickelt werden, das den Herausforderungen begegnet, mit denen KMU bei der Digitalisierung ihrer Produktionssysteme konfrontiert sind (A1). Dazu müssen im ersten Schritt organisatorische und technische Herausforderungen betrachtet werden, etwa die Bildung einer Digitalen Vision sowie die Auswahl einer geeigneten digitalen Technologie. Die weiteren Herausforderungen knüpfen an diese organisatorischen und technischen sowie die entsprechenden Entscheidungen an und stehen daher nicht im Fokus der Dissertation.

Eine weitere Hürde für KMU ist das Fehlen eines methodischen Ansatzes zur Digitalisierung eines Produktionssystems (A2). Um dem zu begegnen, wird ein Transformationskonzept benötigt, das eine klare Vorgehensweise enthält. Diese muss ohne wesentliche Anpassungen oder Aufwand direkt durch ein KMU anwendbar sein. Der Fokus des Transformationskonzepts soll dabei auf dem Produktionssystem liegen und nicht auf dem gesamten Unternehmen (A3). Im Rahmen von Ansätzen zur Digitalisierung des gesamten Unternehmens wird zwar das Produktionssystem mitberücksichtigt, aber nicht in der Tiefe, die ein KMU zur Umsetzung benötigt.

Aus den Herausforderungen für KMU lässt sich die nächste Anforderung an das zu entwickelnde Transformationskonzept ableiten: KMU brauchen ein Zielbild eines digitalisierten Produktionssystems, um darauf basierend geeignete Maßnahmen ergreifen zu können (A4). Um Produktionssysteme zielgerichtet zu digitalisieren, ist es ebenfalls notwendig, den entsprechenden aktuellen Istzustand zu kennen (A5). Von dieser Grundlage können unter Berücksichtigung des Zielbilds des digitalisierten Produktionssystems konkrete Umsetzungsmaßnahmen in Form von Projektzielen abgeleitet werden.

Die Digitalisierung von Produktionssystemen erfordert die Implementierung digitaler Technologien. Diese stellt ebenfalls eine Herausforderung für KMU dar, da die Identifikation und Auswahl geeigneter digitaler Technologien wegen der Vielfalt verfügbarer digitaler Technologien schwierig ist. Um diese Herausforderung überwinden zu können, sollen Methoden bereitgestellt werden, die die Identifikation und Auswahl geeigneter Technologien unterstützen und auf diese Weise eine zielgerichtete Implementierung im Produktionssystem ermöglichen (A6).

Um den Fortschritt sowie die Auswirkungen der Digitalisierung in Produktionssystemen zu quantifizieren und somit aufzeigen zu können, werden geeignete Kennzahlen benötigt (A7). Darüber hinaus können mittels dieser die Zielerreichung des Zielbilds des digitalisierten Produktionssystems sowie der definierten Umsetzungsprojekte geprüft und gegebenenfalls angepasst werden.

Im Folgenden werden die genannten Anforderungen an ein Transformationskonzept genauer dargelegt sowie bestehende Ansätze zur Digitalisierung von Unternehmen und Produktionssystemen hinsichtlich ihres Erfüllungsgrads dieser Anforderungen bewertet.

□ A1: Berücksichtigung der Herausforderungen von KMU bei der Digitalisierung

KMU sind im Rahmen der Digitalisierung mit anderen Herausforderungen als Großunternehmen konfrontiert (vgl. Kapitel 2.1.1), sodass eine verschiedene Herangehensweise erforderlich ist. Dementsprechend soll ein Konzept zur Digitalisierung von KMU, im Speziellen derer Produktionssysteme, die besonderen Herausforderungen berücksichtigen. Nur wenige Ansätze zur Digitalisierung von Unternehmen bzw. Produktionssystemen wurden für KMU entwickelt. PETER, EL SAKKA et al. und SOPADANG et al. entwickelten Vorgehensweisen zur ganzheitlichen Digitalisierung von KMU bzw. des Mittelstands. KÖNIGS & ZELLER fokussierten sich auf die

Unternehmens-IT produzierender KMU und VON WASCINSKI et al. erarbeiteten ein Konzept zur Industrie-4.0-Readiness für KMU in der Textil- und Bekleidungsindustrie. JORDAN et al. entwickelten einen Katalog der Produktionssystem-Digitalisierung, der CPS zur Lösung von Digitalisierungsproblemen enthält. SCHULER stellte dem Mittelstand im Rahmen einer Toolbox Strategien, Methoden und Vorgehensweisen zur Analyse, Planung, Realisierung und Bewertung von Anwendungsfällen im Produktionssystem zur Verfügung. PEUKERT et al. verfolgten eine ähnliche Vorgehensweise, indem sie ein Prozessmodell zur Entwicklung und Implementierung von Anwendungsfällen im Produktionssystem schufen. Allerdings besteht bei ihrem Modell das Ziel, die Anwendungsfälle im Anschluss als Demonstrator der Plattform I4.0 zur Verfügung zu stellen.

Keine der genannten Ansätze ermöglichen eine ganzheitliche und zielgerichtete Digitalisierung von Produktionssystemen unter Berücksichtigung unternehmensindividueller Zielstellungen sowie Zielbilder hinsichtlich der Digitalisierung von KMU und deren konkreter Herausforderungen. Sie betreffen lediglich Teilbereiche und setzten konkrete Digitalisierungsvorhaben um. A1 fokussiert daher die Berücksichtigung technischer und organisatorischer Herausforderungen, die KMU bei der Digitalisierung ihres Produktionssystems bewältigen müssen (Kapitel 2.4). Herausforderungen sind z. B. die Auswahl einer geeigneten digitalen Technologie (A6) oder die Festlegung und Kommunikation eines Zielbilds des zu digitalisierenden Produktionssystems (A4). Des Weiteren soll eine ausführlich beschriebene Vorgehensweise den Transformationsprozess unterstützen (A2).

□ **A2: Verwendung einer ausführlich beschriebenen Vorgehensweise zur Digitalisierung**

Eine detaillierte Vorgehensweise zur Digitalisierung von KMU, bspw. basierend auf den Methoden des Projekt- und Changemanagements, ermöglicht es, geeignete Standards und Anweisungen zu verwenden. Dies reduziert u. a. den Einarbeitungsaufwand für KMU und gibt bereits einen organisatorischen Rahmen vor (vgl. Herausforderungen von KMU, Kapitel 2.1.1). Weiterhin sind Changemanagement-Methoden besonders für eine tiefgreifende Veränderung geeignet (vgl. Kapitel 2.3.2), die Digitalisierungsvorhaben darstellen. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation werden ausschließlich die technischen und organisatorischen Aspekte der Digitalisierung betrachtet. Die Ausführlichkeit der vorliegenden Ansätze hinsichtlich der Beschreibung der Schritte zur Digitalisierung des Unternehmens bzw. der Produktionssysteme variiert stark. JORDAN et al. entwickelten ein Tool zur Auswahl von CPS-Lösungen, jedoch keine Vorgehensweise zu deren Implementierung. BECHTHOLD et al. hingegen stellten mit dem Capgemini Framework sowie der entsprechenden Vorgehensweise eine Methode zur Digitalisierung von Unternehmen zur Verfügung; jedoch sind die einzelnen Schritte nicht ausführlich genug beschrieben, um das Framework direkt anzuwenden. Dieselbe Problematik liegt beim Ansatz von PLASS vor. APPELFELLER & FELDMANN, AURICH et al. sowie LANZA & NYHUIS konnten mit ihrem Vorgehensmodell, Transformationskonzept sowie Handlungsleitfäden ausführliche Beschreibungen zur Digitalisierung von Unternehmen erarbeiten, die direkt durch KMU anwendbar sind.

A2 verdeutlicht die Notwendigkeit einer ausführlich beschriebenen und verständlichen Vorgehensweise zur Digitalisierung der Produktionssysteme von KMU und begegnet dabei den KMU-spezifischen Herausforderungen (A1). Eine hybride Vorgehensweise, die sowohl die Eigenschaften des Projekt- als auch des Changemanagements beinhaltet, ist anzustreben (Kapitel

2.3.2), um eine Auswahl und Implementierung digitaler Technologien zu ermöglichen (A4 und A6). Darüber hinaus sollen Kennzahlen zur Kontrolle des Fortschritts verwendet werden (A7).

□ A3: Digitalisierung von Produktionssystemen

Zur Implementierung eines CPPS in KMU wird die Digitalisierung von Produktionssystemen berücksichtigt. In diesem Rahmen werden der Produktionsprozess, der Materialfluss sowie der Lagerprozess betrachtet (vgl. Kapitel 2.1.3). Dabei werden sowohl technische als auch organisatorische Aspekte wie PPS oder Datenmanagement einbezogen. Bekannte Ansätze ermöglichen bereits die Digitalisierung des Produktionssystems. Jedoch sind Konzepte, die eine ganzheitliche Digitalisierung des Unternehmens erfordern, z. B. nach SCHUMACHER et al. und AURICH et al., oft nicht detailliert genug für eine konkrete Anwendung im Produktionssystem. Weiterhin fokussieren Ansätze zur Digitalisierung von Produktionssystemen meist nur einen Teilaspekt des Produktionssystems und vernachlässigen somit die ganzheitliche Digitalisierung. So zielt etwa der Ansatz nach REINHART auf die Digitalisierung der Intra-logistik und Produktionsplanung ab, während ALBERS et al. die Qualitätssicherung betrachten. Eine ganzheitliche Digitalisierung wird demgegenüber bspw. von MORLOCK et al. berücksichtigt.

□ A4: Verwendung eines Referenzmodells, einer Strategie oder eines Zielbilds zur zielgerichteten Digitalisierung von Produktionssystemen

Ein Referenzmodell stellt ein Zielbild des zu digitalisierenden Produktionssystems dar. Basierend auf diesem Zielbild, das qualitativ und quantitativ beschreibbar ist, werden Projekte zur Umsetzung von Teilschritten definiert und implementiert. Durch dieses Referenzmodell wird eine zielgerichtete Digitalisierung ermöglicht. Der Großteil der Ansätze beinhaltet das Festlegen einer Strategie, eines Zielbilds bzw. eines Referenzmodells, z. B. die von SALMEN, AURICH et al. sowie MERZ & SIEPMANN. Jedoch existieren auch Ausnahmen, etwa die Ansätze nach VON WASCINSKI et al., SOPADANG et al. oder RUDOLF, die keinen Zielzustand festlegen. Die Konzepte gemäß NÖHRING et al., MORLOCK et al. und LANZA et al. definieren ihren Zielzustand anhand eines Reifegradmodells. Das ist zwar für eine kurz- und mittelfristige Planung geeignet, jedoch werden viele Faktoren einer langfristigen Planung, z. B. die Markt- oder Wettbewerbssituation, nicht berücksichtigt.

□ A5: Bestimmung bzw. Analyse des Istzustands der Digitalisierung von Produktionssystemen

Um den Istzustand eines Produktionssystems sowie den Fortschritt der Digitalisierung im Vergleich zum Zielbild (A4) sichtbar machen zu können, soll ein Reifegradmodell zur Bestimmung des Digitalisierungsgrads von Produktionssystemen verwendet werden (Kapitel 2.3.4). Der Reifegrad ermöglicht es Unternehmen, ihren Istzustand hinsichtlich der Digitalisierung zu bewerten und anhand dessen einen Zielzustand zu definieren, bspw. im Rahmen eines Umsetzungsprojekts. Auf dieser Grundlage können Unternehmen ihren Zielzustand erarbeiten und die Weiterentwicklungen überprüfen. Zur Bewertung des Reifegrads können technische, z. B. die Vernetzung der IT-Systeme, sowie organisatorische Aspekte, wie die Bereitstellung kontextbezogener Informationen, herangezogen werden. Die Bestimmung und die Analyse des Istzustands werden von den meisten Ansätzen berücksichtigt. So können z. B. die Reifegradmodelle angewandt werden, die von AURICH et al., BECHTHOLD et al., TERSTEGEN et al. oder APPELFELDER & FELDMANN beschrieben werden, sowie Prozess- bzw. Wirtschaftlichkeitsanalysen nach WEINERT et al., SEITER et al., SOPADANG et al. oder EL SAKKA et al.

□ **A6: Identifikation digitaler Technologien zur zielgerichteten Implementierung in Produktionssystemen**

Zur Digitalisierung von Produktionssystemen ist die Einführung digitaler Technologien unerlässlich. Aufgrund der Vielfalt und hohen Anzahl existierender sowie zukünftiger digitaler Technologien müssen KMU in die Lage versetzt werden, geeignete digitale Technologien für die jeweilige unternehmensindividuelle Problemstellung identifizieren und entsprechend einführen zu können (vgl. Kapitel 2.1.1). Dabei können die einzuführenden digitalen Technologien aus einzelnen oder Kombinationen mehrerer Technologien bestehen. Zur Identifikation geeigneter Technologien können die Methoden der Technologiefrüherkennung aus dem Technologiemanagement herangezogen werden, wie etwa Technologieradare. Nur wenige Ansätze, z. B. die von SEITER, AURICH et al. oder JORDAN et al., unterstützen eine konkrete Auswahl digitaler Technologien für einen Anwendungsfall. Weitere Ansätze, etwa nach WENZEL oder HÖPTNER et al., fokussieren bereits eine Art der digitalen Technologie, sodass eine zielgerichtete Vorauswahl erfolgt, die eine Lösung der unternehmensindividuellen Problemstellung stark einschränkt.

□ **A7: Verwendung von Kennzahlen zur Kontrolle des Fortschritts der Digitalisierung von Produktionssystemen**

Um den Fortschritt der Digitalisierung im Produktionssystem zu quantifizieren, sollen Kennzahlen herangezogen werden. Dabei können auf Grundlage der gemessenen Daten, z. B. der Zeit oder Stückzahl, die übergeordneten Kennzahlen wie der OEE berechnet werden. Dadurch können die Digitalisierung und die damit verbundene zielgerichtete Implementierung digitaler Technologien beeinflusst werden. Darüber hinaus kann das Zielbild des digitalisierten Produktionssystems überprüft und ausgerichtet werden (A4). Vorliegende Ansätze wie die von SEITER, AURICH et al. oder NÖHRING et al. verwenden wirtschaftliche bzw. operative Kennzahlen, um den Erfolg der Digitalisierung zu prüfen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der wiederholten Nutzung eines Reifegradmodells, wie in den Ansätzen nach MORLOCK et al. oder BECHTHOLD et al. umgesetzt.

Basierend auf den Anforderungen an ein Transformationskonzept zur Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU wurden die bekannten Ansätze bewertet. Tabelle 2-2 ist dementsprechend zu entnehmen, dass keiner von ihnen die definierten Anforderungen vollständig erfüllt. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wird versucht, die somit identifizierte Forschungslücke zu schließen.

Tabelle 2-2: Qualitative Bewertung der Transformationsansätze zur Digitalisierung von produzierenden Unternehmen und Produktionssystemen (Auszug aus Tabelle 9-4)

Nr. Ansätze		Anforderungen						
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Digitalisierung von Unternehmen	1 Capgemini Consulting Industry 4.0 Framework [Bech14]	○	◐	◑	●	●	○	○
	2 Roadmap I4.0 [Seit16]	○	●	○	◐	●	●	●
	3 Digitale Transformation in KMU [Pete17]	●	●	◐	●	●	◐	○
	4 Strategische Ausrichtung der Unternehmens-IT zur Umsetzung von Industrie-4.0-Konzepten [Köni17]	●	●	◐	●	●	○	○
	5 Vorgehensmodell zur Digitalen Transformation von Unternehmen [Appel18]	○	●	◐	●	●	○	○
	6 I4.0 für KMU in der Textil- und Bekleidungsindustrie [Wase18]	●	◐	○	○	○	◐	○
	7 Digitalisierung produzierender Unternehmen [Schu19]	○	●	●	●	●	○	○
	8 Digitalisierung des Mittelstands [EIS19]	●	●	◐	●	●	◐	○
	9 Modulares Transformationskonzept zur Digitalisierung produzierender Unternehmen [Auri20]	○	●	●	●	●	●	●
	10 Toolkit zur Einführung von I4.0 in KMU [Sopa20]	●	◐	○	○	●	○	●
Digitalisierung des Produktionssystemes	1 Vorgehensmodell zur Migration zum CPPS [Morl16]	○	●	●	◐	●	◐	◐
	2 Transformationsprozess zur intelligenten und vernetzten Fabrik [Wein17]	○	●	●	●	●	◐	○
	3 Menschenzentrierte CPS im Mittelstand [Schu18]	●	◐	●	●	●	○	◐
	4 Reifegradbasierter Handlungsleitfaden zur Einführung von IKT [Lanz18]	○	●	●	◐	●	●	○
	5 Modulare, sozio-technische Gestaltungs- und Einführungssystematik [Nöhr19]	○	◐	●	◐	●	○	◐
	6 Vorgehensmodell zur erfolgreichen Umsetzung von I4.0 in KMU [Peuk20]	●	●	●	●	○	○	○

Anforderung vollständig erfüllt
 Anforderung teilweise erfüllt
 Anforderung nicht erfüllt

2.4.2 Fazit zum Stand von Wissenschaft und Technik

Die Kapitel 2.2 und 9.1 zeigen, dass existierende Ansätze zur Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU die genannten Anforderungen nicht erfüllen. Nur wenige dieser Ansätze sind speziell auf KMU ausgerichtet (Kapitel 2.4.1) und berücksichtigen sowohl technische als auch organisatorische Herausforderungen, die KMU bewältigen müssen (Kapitel 2.3.1). Ein weiteres Problem besteht in der erschwerten Anwendung der existierenden Ansätze, da diese oft nur generisch beschrieben sind und eine Anpassung bzw. spezifisches Fachwissen voraussetzen (Kapitel 2.3.2). Eine ausführlich beschriebene Vorgehensweise zur Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU unter Berücksichtigung der Herausforderungen ist daher erforderlich.

Das zweite Defizit betrifft die Bereitstellung von Werkzeugen zur Identifikation des Ist- und des Zielzustands. Der Istzustand kann z. B. mithilfe von Reifegradmodellen bestimmt werden, allerdings ist die Auswahl geeigneter Reifegradmodelle aufgrund ihrer hohen Vielzahl, ihres divergierenden Fokus sowie der oft geringen Verständlichkeit und Anwenderfreundlichkeit schwierig (Kapitel 2.3.4). Die Festlegung des Zielzustands für ein digitalisiertes Produktionssystem stellt insofern eine Hürde für KMU dar, als die genaue Bedeutung eines ‚digitalisierten Produktionssystems‘ unklar ist. Diesbezüglich fehlt es oft an einer konkreten Vorstellung, an der KMU sich orientieren können (Kapitel 2.3.1). Dem kann bspw. durch ein geeignetes Referenzmodell wie der 5C-Architektur begegnet werden (Kapitel 2.3.3).

Das dritte Defizit der bestehenden Ansätze besteht im Kontext der Unterstützung der Identifikation digitaler Technologien sowie des Vermeidens von Insellösungen bei deren Implementierung. Als digitale Technologie wird in der Literatur von einem Sensor bis hin zu Big Data

alles bezeichnet und auch in viele Varianten kategorisiert (Kapitel 2.3.5). Diese Vielfalt und Unübersichtlichkeit erschweren die Identifikation geeigneter digitaler Technologien. Demnach muss eine verständliche Kategorisierung herangezogen werden, die sich bspw. in gängigen Methoden des Technologiemanagements zum Monitoring digitaler Technologien finden lässt (Kapitel 2.3.6). Darüber hinaus gibt es nur wenige Ansätze, die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen digitalen Technologien thematisieren. Es ist allerdings bei der Implementierung notwendig, diese zu berücksichtigen, um Insellösungen zu vermeiden und eine zielgerichtete Einführung zu ermöglichen (Kapitel 2.3.6).

Das vierte Defizit ist der Mangel an Werkzeugen zur zielgerichteten Digitalisierung von Produktionssystemen. Aufgrund ihrer Eigenschaften sind KPIs verständliche und messbare Werte, anhand derer KMU sich bei der Digitalisierung von Produktionssystemen im Sinne ihres Zielbilds orientieren können (Kapitel 2.3.7). Kein bestehender Ansatz zur Digitalisierung von Produktionssystemen hat KPIs vollständig in das Konzept integriert (Kapitel 2.4.1).

Auf Basis der Defizite, die die bereits existierenden Ansätze im Hinblick auf die Erfüllung der beschriebenen Anforderungen aufweisen, lassen sich nachfolgend die Ziele sowie eine konkrete Aufgabenstellung dieser Dissertation ableiten.

3 Zielsetzung und Aufgabenstellung

In diesem Kapitel werden die Ziele und die Aufgabestellung der folgenden Dissertation abgeleitet (Kapitel 3.1). Im Anschluss daran wird der Aufbau der Arbeit dargestellt (Kapitel 3.2).

3.1 Ziele und Aufgabenstellung

Auf Grundlage der Bewertung der bestehenden Ansätze sowie der identifizierten Defizite (Kapitel 2.4) lautet die **übergeordnete Forschungsfrage**: Wie kann die Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU unterstützt werden?

Ein Ansatz zur Beantwortung der Frage ist die Entwicklung eines Transformationskonzepts, das speziell für KMU entwickelt wird und dabei bekannte Methoden, z. B. aus dem Projekt-, Change-, oder Technologiemanagement, als Basis verwendet. Das Anknüpfen an bekannte Methoden erhöht die Umsetzbarkeit der Vorgehensweise und liefert gleichzeitig standardisierte Werkzeuge, die KMU bei der Anwendung helfen. Die Hauptanforderungen an ein entsprechendes Transformationskonzept bestehen darin, KMU bei der Festlegung eines Zielbilds bzw. eines Zielzustands zu unterstützen, den Istzustand der Digitalisierung im Produktionssystem zu bestimmen, die Auswahl geeigneter digitaler Technologien zu erleichtern und zielgerichtet die getroffenen Umsetzungsentscheidungen zu implementieren. Darüber hinaus müssen die technischen und organisatorischen Herausforderungen der KMU berücksichtigt werden.

Daraus ergibt sich folgende **spezifische Forschungsfrage**: Wie muss ein speziell auf KMU ausgerichtetes Transformationskonzept ausgestaltet sein, um eine unternehmensindividuelle Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU zu ermöglichen, das technische und organisatorische Herausforderungen, den individuellen Digitalisierungsgrad, die Identifikation und zielgerichtete Implementierung geeigneter digitaler Technologien sowie die Nutzung definierter Kennzahlen berücksichtigt?

Durch die Erarbeitung eines geeigneten Transformationskonzepts zur unternehmensindividuellen Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU wird somit dieses **Ziel** verfolgt: Die Dissertation zielt auf die Entwicklung eines generischen Transformationskonzepts zur Auswahl und Implementierung digitaler Technologien in Produktionssystemen produzierender KMU ab. Aus diesem Ziel leiten sich folgende **Aufgaben** ab:

□ Aufgabe 1: Festlegung des Aufbaus des Transformationskonzepts

Die Digitalisierung stellt eine langfristige Veränderung dar, für die Vorgehen des Changemanagements geeignet sind. Um langfristig von einer Implementierung digitaler Technologien profitieren zu können, muss daher das zu entwickelnde Transformationskonzept Charakteristika des Changemanagements wie ein Zielbild sowie eine Evaluation nach Projektende beinhalten. Die Implementierung digitaler Technologien auf operativer Ebene wird überwiegend im Rahmen einzelner Projekte mithilfe von Werkzeugen und Methoden des Projektmanagements durchgeführt. Es muss somit ein Aufbau des Transformationskonzeptes gewählt werden, der die Charakteristika beider Ansätze beinhaltet.

□ Aufgabe 2: Beschreibung eines Referenzmodells für CPPS in KMU

Referenzmodelle geben ein Zielbild der Digitalisierung wieder, an dem sich KMU orientieren können. Es ist ein Referenzmodell zu erarbeiten, das ein ausführliches und deutliches Zielbild eines CPPS darstellt. Dabei müssen die technischen und organisatorischen Herausforderungen von KMU berücksichtigt werden.

□ **Aufgabe 3: Entwicklung eines Reifegradmodells zur Bestimmung des Digitalisierungsgrads des Produktionssystems**

Ein Reifegradmodell muss entwickelt werden, das für Produktionssysteme in KMU geeignet ist und dabei im Sinne des systemtechnischen Modells den Produktionsprozess, den Materialfluss sowie den Lagerprozess betrachtet. Für das Reifegradmodell sind technische und organisatorische Kriterien sowie Indikatoren zu definieren, die die Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU näher charakterisieren. Die Reifegradstufen des zu entwickelnden Reifegradmodells müssen weiterhin mit dem Zielbild des Referenzmodells übereinstimmen, um so den Istzustand im Vergleich zum Zielbild bestimmen zu können. Um geeignete digitale Technologien identifizieren zu können, müssen diese den Reifegradstufen zugeordnet werden. Den jeweiligen Kriterien bzw. Indikatoren zugeordnete Kennzahlen unterstützen die Zielerreichung, da diese den Fortschritt der Digitalisierung quantifizieren und somit widerspiegeln bzw. visualisieren.

□ **Aufgabe 4: Bestimmung eines geeigneten Kennzahlensystems**

Es ist ein geeignetes Kennzahlensystem zu bestimmen, das den Produktionsprozess, den Materialfluss sowie den Lagerprozess berücksichtigt. Diese Kennzahlen visualisieren den Fortschritt und die Auswirkungen der Digitalisierung und unterstützen so die schrittweise Überführung eines Produktionssystems in ein CPPS. Des Weiteren sind die Kennzahlen anhand von Normen zu definieren und beschreiben, sodass sie leicht verständlich sind.

□ **Aufgabe 5: Auswahl einer Methode zur Identifikation digitaler Technologien**

Zur Identifikation digitaler Technologien ist eine geeignete Methode ihrer Visualisierung und Kategorisierung auszuwählen. Eine verständliche Kategorisierung der Technologietrends hinsichtlich ihres Verwendungszwecks oder ihrer Art unterstützt die Auswahl einer geeigneten digitalen Technologie.

□ **Aufgabe 6: Erarbeitung einer Herangehensweise zum Erkennen von sowie dem Umgang mit Zusammenhängen und Wechselwirkungen bei der Implementierung digitaler Technologien**

Um Insellösungen bei der Implementierung digitaler Technologien zu vermeiden, ist eine Vorgehensweise zu entwickeln bzw. auszuwählen, die Zusammenhänge und Wechselwirkungen systematisch bestimmt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Vorgehensweise einfach und intuitiv anwendbar ist, sodass sie eine direkte Anwendung in KMU ermöglicht.

□ **Aufgabe 7: Entwicklung einer softwaretechnischen Unterstützung**

Zur Unterstützung der Anwendung des Transformationskonzepts wird dieses softwaretechnisch umgesetzt. Dabei soll die softwaretechnische Unterstützung inkrementell durch das Transformationskonzept führen sowie die Eingabe von unternehmensindividuellen Daten und Informationen erlauben. Die softwaretechnische Unterstützung stellt somit einen methodischen Ansatz zur Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU vor, der direkt angewandt werden kann.

Abbildung 3-1 zeigt zusammenfassend die Motivation, Zielstellung und Aufgaben der Dissertation auf:

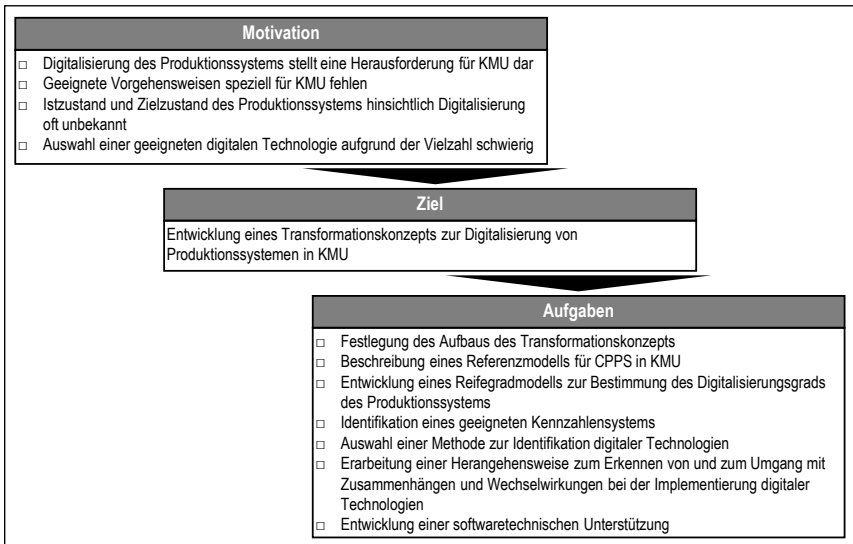


Abbildung 3-1: Ziel und Aufgaben dieser Arbeit (eigene Darstellung)

3.2 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Dissertation leitet sich aus den Zielen und Aufgaben ab und ist in Abbildung 3-2 dargestellt. In Kapitel 4 wird das Transformationskonzept zur Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU entwickelt. Hierfür wird in Kapitel 4.1 zunächst ein Überblick gegeben, bevor in den nachfolgenden Schritten das Konzept und seine Bestandteile im Detail erläutert werden. In Kapitel 4.2 wird ein Referenzmodell erarbeitet, das das Zielbild bzw. die Digitale Vision eines zu digitalisierenden Produktionssystems beschreibt. Zur Identifikation des Istzustands von Produktionssystemen hinsichtlich der Digitalisierung wird in Kapitel 4.3 ein Reifegradmodell entwickelt, das an das zuvor entwickelte Referenzmodell anschlussfähig ist. In Kapitel 4.4 werden konkrete Projektziele definiert, deren Umsetzung mithilfe von Methoden und Vorgehensweisen des Technologie- und Projektmanagements in Kapitel 4.5 geplant wird. In Kapitel 4.6 werden Methoden aufgezeigt, mittels derer die Projektumsetzung realisiert und gesteuert wird. Kapitel 4 schließt mit der Vorstellung von Methoden und Vorgehensweisen zur Prüfung der Erreichung der Projektziele sowie der Digitalen Vision (Kapitel 4.7).

In Kapitel 5 wird eine softwaretechnische Unterstützung für das zu entwickelnde Transformationskonzepts vorgestellt. Die zugehörigen Anforderungen werden in Kapitel 5.1 erläutert und die realisierte softwaretechnische Unterstützung in Kapitel 5.2 beschrieben.

In Kapitel 6 erfolgt die Validierung des Konzepts anhand eines KMU aus dem Industriesektor Maschinenbau. Zunächst wird hierfür das Anwendungsbeispiel näher erläutert (Kapitel 6.1), bevor das Transformationskonzept angewandt wird (Kapitel 6.2). Das Kapitel schließt mit einer Darlegung der im Zuge der Validierung gewonnenen Erkenntnisse (Kapitel 6.3).

Die Dissertation endet mit einer Zusammenfassung der Arbeit sowie einem Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten (Kapitel 7).

Kapitel 4 Entwicklung eines Transformationskonzepts	
4.1 Überblick über das entwickelte Transformationskonzept	
4.2 Entwicklung eines Referenzmodells zur Definition einer Digitalen Vision	4.3 Erarbeitung eines geeigneten Reifegradmodells und Integration in das Transformationskonzept
4.4 Definition konkreter Projektziele zur Digitalisierung von Produktionssystemen	4.5 Planung der einzelnen Umsetzungsprojekte
4.6 Realisierung und Steuerung des Umsetzungsprojekts	4.7 Prüfung der Zielerreichung des Projekts und hinsichtlich der Digitalen Vision
Kapitel 5 Softwaretechnische Umsetzung	
5.1 Anforderungen an die softwaretechnische Unterstützung	
5.2 Realisierung der softwaretechnischen Unterstützung	
Kapitel 6 Anwendungsbeispiel	
6.1 Beschreibung des Anwendungsbeispiels	
6.2 Anwendung des Transformationskonzepts	
6.3 Erkenntnisse aus der Validierung	
Kapitel 7 Zusammenfassung und Ausblick	

Abbildung 3-2: Aufbau der Arbeit (eigene Darstellung)

4 Entwicklung eines Transformationskonzepts zur Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU

Im Folgenden werden der Geltungsbereich sowie der Aufbau des Transformationskonzepts vorgestellt (Kapitel 4.1). Daraufhin werden die sechs Schritte erläutert, die bei der Anwendung durchlaufen werden: Im ersten Schritt wird eine Vision bzw. ein Zielbild für das Produktionssystem bestimmt (Kapitel 4.2), bevor im zweiten Schritt der Istzustand analysiert wird (Kapitel 4.3). Im dritten Schritt werden konkrete Umsetzungsziele definiert (Kapitel 4.4), anschließend wird ihre Implementierung geplant (Kapitel 4.5), woraufhin sie zuletzt realisiert werden (Kapitel 4.6). Das Transformationskonzept schließt mit dem sechsten und letzten Schritt, der Prüfung der Zielerreichung (Kapitel 4.7).

4.1 Überblick über das entwickelte Transformationskonzept

Das entwickelte Transformationskonzept ist so ausgestaltet, dass es besonders geeignet für die Digitalisierung produzierender KMU ist. Der **Geltungsbereich** zur Anwendung des Transformationskonzepts ist das bereits bestehende Produktionssystem eines KMU, wobei ein spezieller Fokus auf Produktionsprozesse, den Materialfluss und Lagerprozesse gelegt wird. Bereits existierende Produktionssysteme in KMU bestehen u. a. aus analogen sowie digitalen (CNC-) Maschinen, Anlagen und Transportmitteln, die meist nicht vernetzt sind (Abbildung 4-1). Eine Fokussierung auf den genannten Geltungsbereich ermöglicht eine skalierbare und punktuelle Digitalisierung, die zur ganzheitlichen Digitalisierung (horizontale und vertikale Integration) beiträgt.

Das zu entwickelnde Transformationskonzept verfolgt einen **partizipativen Ansatz**, der verschiedene Blickwinkel berücksichtigt. Für seine Anwendung werden interdisziplinäre Teams aus verschiedenen Fachabteilungen und Hierarchiestufen hinzugezogen, denn nur so kann die digitale Transformation des Produktionssystems und einzelner Teilvorhaben gelingen. Weiterhin ist es sinnvoll, bei einzelnen Umsetzungsmaßnahmen weitere Verantwortlichkeiten bzw. Experten aus den Bereichen Recht, Finanzen oder IT einzubinden. Deren Fachwissen und Erfahrungswerte, z. B. hinsichtlich der Datensicherheit oder des verfügbaren Budgets, tragen zur Auswahl und zielgerichteten Implementierung digitaler Technologien bei.

Für eine ganzheitliche Digitalisierung des Produktionsprozesses, des Materialflusses sowie des Lagerprozesses müssen verschiedene Ebenen betrachtet werden: die Maschinen-, die Produktionssystemebene sowie die Infrastruktur (Abbildung 4-2). Auf der **Maschinenebene** wird die Digitalisierung von Maschinen und Anlagen sowie ihrer Komponenten fokussiert. Dabei ist nicht nur ein Austausch bestehender analoger Maschinen und Anlagen durch kommunikationsfähige möglich, sondern auch ein Aufrüsten, z. B. mit Prozessoren und Speicherchips. Die eingebetteten Prozessoren oder Speicherchips nehmen über Sensoren Daten auf und steuern mittels Aktoren die Maschinen und Anlagen. Das Ziel der Digitalisierung der Maschinen und Anlagen besteht darin, einen möglichst autonom agierenden Produktionsprozess zu erreichen, der in der Lage ist, eine hohe Variantenvielfalt in niedriger Stückzahl bis hin zur Losgröße 1 herzustellen. Eine digitalisierte Maschinenebene ist eine Voraussetzung zur ganzheitlichen Digitalisierung der Produktionssystemebene.

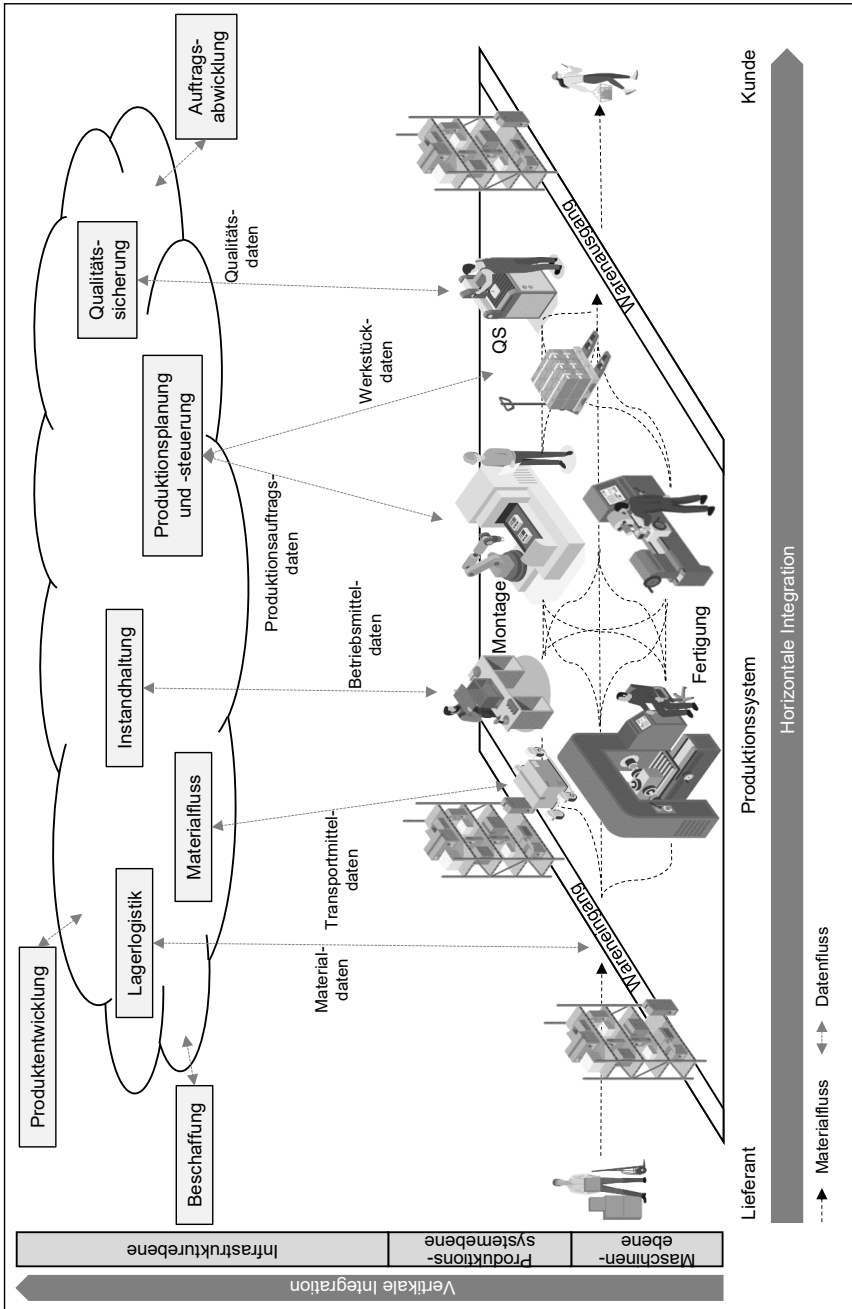


Abbildung 4-1: Beispielhafte Darstellung eines Produktionssystems in KMU (eigene Darstellung)

Die **Produktionssystemebene** fokussiert die physikalischen Eigenschaften und Merkmale des Produktionssystems sowie der Produkte. Hierzu gehören der **Produktionsprozess**, der **Materialfluss**, die PPS sowie die Arbeits- und **Lagerprozesse**. Die Digitalisierung der Produktionsebene kann u. a. zur Verwendung von IT-Systemen, zum Einsatz von Assistenzsystemen und letztlich zur Realisierung Digitaler Zwillinge (siehe hier bspw. [Glat20]) führen. Assistenzsysteme unterstützen dabei die Mitarbeiter in ihren Tätigkeiten. Beispielsweise ermöglicht ein etwaiger mobiler Zugriff auf IT-Systeme und die zugehörigen Daten eine flexible sowie ortsunabhängige Durchführung dieser Tätigkeiten. Die Digitalisierung von Produkten erfolgt bspw. durch die Verwendung von Prozessoren und Speicherchips wie Mikrocontrollern oder Mikro-speicherchips. Dadurch können die Produkte mit den Maschinen und Anlagen sowie den Transportmitteln im Materialfluss kommunizieren, wodurch die PPS unterstützt wird bzw. ein autonomer Materialfluss realisiert werden kann. Außerdem können durch die Digitalisierung von Produkten neue Dienstleistungen für Kunden entwickelt und angeboten werden, was wiederum zur Entwicklung neuer Geschäftsmodelle führen kann. Das Hauptziel der Digitalisierung der Produktionssystemebene ist die Steigerung der Effizienz im Produktionssystem durch die Verbesserung der Prozesse sowie eine IT-Unterstützung.

Auf der **Infrastrukturebene** werden die notwendigen IT-Systeme und das Datenmanagement berücksichtigt. IT-Systeme bilden die Basis der digitalen Transformation. Sie sollten ganzheitlich eingeführt werden, sodass keine Insellösungen entstehen. Durch die Vernetzung von IT-Systemen können die Prozesse auf der Produktionssystemebene unterstützt und somit effizienter sowie schneller abgewickelt werden. Weiterhin werden nicht nur IT-Systeme miteinander vernetzt, sondern dienen auch als Kommunikationsmittel für Maschinen und Anlagen, Werkstücke sowie Transportmittel. Zudem können die IT-Systeme so ausgestaltet werden, dass ein mobiler Einsatz möglich wird. Das zielt auf eine ortsunabhängige Arbeitsweise der Mitarbeiter ab, sofern diese zweckmäßig ist. Die Vernetzung von IT-Systemen sowie der Elemente im Produktionssystem (z. B. Maschinen und Anlagen) bewirkt eine gemeinsame Datenbasis. Daten werden durch die Digitalisierung in deutlich größerem Umfang als zuvor digital erfasst, verarbeitet und gespeichert. Die Digitalisierung schafft die Grundlage, Daten in Echtzeit zu erfassen, diese etwa durch Algorithmen auszuwerten, als Metadaten abzuspeichern und Mitarbeitern kontextbezogen zur Verfügung zu stellen.

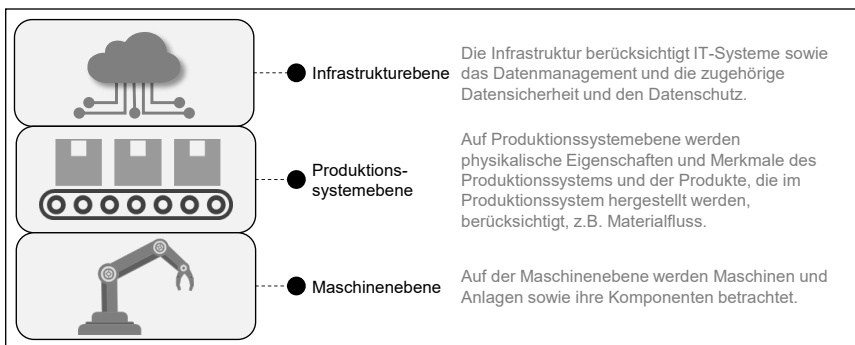


Abbildung 4-2: Berücksichtigte Ebenen im Transformationskonzept (eigene Darstellung)

Der **Aufbau des Transformationskonzepts** orientiert sich an den Vorgehensweisen des Change- und Projektmanagements (Kapitel 2.3.2). Während die operative Implementierung digitaler Technologien im Rahmen von Projekten durchgeführt werden kann, erfordert die Digitalisierung als langfristiges Ziel ebenso die Berücksichtigung der Methoden des Changemanagements. Um langfristig von der Implementierung digitaler Technologien profitieren zu können, muss das zu entwickelnde Transformationskonzept deshalb sowohl Charakteristika des Changemanagements, etwa eine Vision oder Evaluation nach Projektende, als auch des Projektmanagements beinhalten. Dementsprechend wurde eine hybride Lösung gewählt.

Das Transformationskonzept beschreibt ein Vorgehen, das aus sechs sequenziellen bzw. iterativen Hauptphasen besteht: (1) Ermittlung der Digitalen Vision bzw. des Zielbilds, (2) Situationsanalyse, (3) Definition der Projektziele, (4) Umsetzungsplanung, (5) Realisierung und Steuerung sowie (6) Prüfung der Zielerreichung (Abbildung 4-3). In der ersten Phase, der Digitalen Vision, wird ein Zielbild des zu digitalisierenden Produktionssystems erarbeitet. Zur Orientierung wird dazu ein Referenzmodell als Basis herangezogen. Im zweiten Schritt wird der *Istzustand* im betrachteten Bereich *analysiert*. Hierfür wird ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Reifegradmodell verwendet. Anschließend werden Umsetzungsprojekte zur Digitalisierung des Produktionssystems und dessen Bereichen initialisiert (Kapitel 2.3.2). In der dritten Phase wird die *Umsetzung* der initiierten Projekte genauer *definiert* und der konkrete Zielzustand mithilfe von KPIs sowie ausgewählten digitalen Technologien festgelegt. In der vierten Phase, der *Umsetzungsplanung*, werden Konzepte oder Roadmaps zur Planung der Umsetzung verwendet. Diese Planung dient als Basis für die *Realisierung* der geplanten Projekte in der fünften Phase, die sowohl die Implementierung als auch Tests bzw. das Rollout der geplanten digitalen Technologien im Rahmen der Umsetzungsprojekte beinhaltet. In der letzten Phase wird mithilfe der KPIs *geprüft*, ob die gesetzten *Ziele erreicht* wurden. Dabei wird das Resultat nicht nur mit den konkreten Projektzielen abgeglichen, sondern auch mit dem Zielbild, die in der ersten Phase definiert wurde.

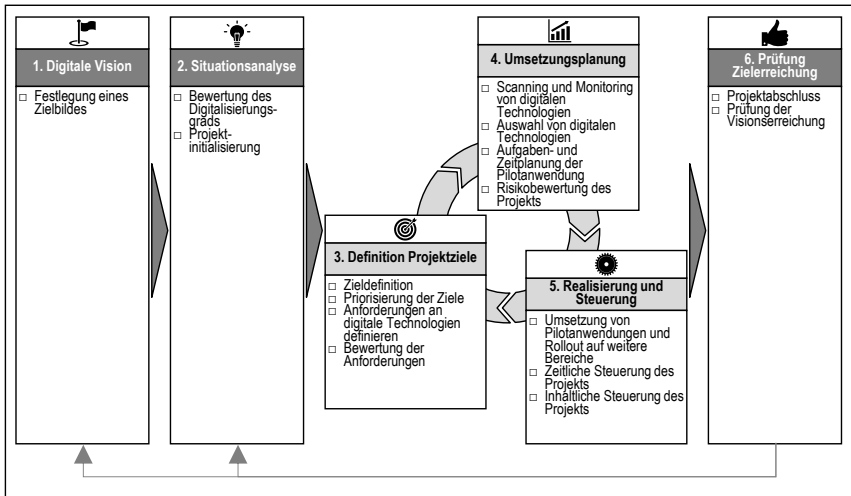


Abbildung 4-3: Transformationskonzept in sechs Schritten (eigene Darstellung)

4.2 Entwicklung eines Referenzmodells zur Definition einer Digitalen Vision

Zur Entwicklung eines Referenzmodells, das die Bestimmung einer Digitalen Vision bzw. eines Zielbilds ermöglicht, werden im ersten Schritt Anforderungen definiert (Kapitel 4.2.1). Anschließend wird der Aufbau des Referenzmodells erläutert (Kapitel 4.2.2) sowie dessen Anwendung im Rahmen des Transformationskonzepts beschrieben (Kapitel 4.2.3).

4.2.1 Anforderungen an ein Referenzmodell

Im Rahmen der Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU wird zunächst ein Zielbild benötigt, das ein langfristiges Ziel des Unternehmens darstellt (Kapitel 2.3.3). Das Referenzmodell beschreibt dabei einen Archetyp eines digitalisierten Produktionssystems. Anhand dessen können KMU ein zweckmäßiges und realistisches Zielbild ihres spezifischen Systems definieren. Eine **Anforderung** an das Referenzmodell besteht darin, dass es die verschiedenen Bestandteile, Fähigkeiten und Eigenschaften digitalisierter Produktionssysteme (CPPS) beinhaltet (Kapitel 2.1), die somit berücksichtigt werden müssen (Tabelle 4-1). Es ist eine weitere Anforderung, dass das zu entwickelnde Referenzmodell explizit Produktionsprozesse, den Materialfluss und Lagerprozesse einbezieht und dadurch konkrete Idealtypen zur Orientierung bereitstellt. Somit müssen die Eigenschaften dieser Prozesse ebenfalls vom Referenzmodell abgedeckt werden (Kapitel 2.1.4). Weiterhin werden technische und organisatorische Aspekte ins Referenzmodell integriert (Kapitel 2.1.1 und 2.3.1).

Tabelle 4-1: Bestandteile und Eigenschaften von CPPS in Anlehnung an [Meis20]

Bestandteile und Fähigkeiten	Eigenschaften
<input type="checkbox"/> Dezentrale Steuerung <input type="checkbox"/> Vernetzung (horizontal und vertikal) <input type="checkbox"/> Kommunikation <input type="checkbox"/> Datenauswertung <input type="checkbox"/> Digitale Technologien <input type="checkbox"/> Sensoren und Aktoren	<input type="checkbox"/> Flexibel <input type="checkbox"/> Echtzeitfähig <input type="checkbox"/> Autonom <input type="checkbox"/> Selbstoptimierend <input type="checkbox"/> Identifizierbar

Die in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Referenzmodelle werden hinsichtlich der Erfüllung dieser festgelegten Anforderungen analysiert und bewertet. Sie variieren zwar in ihrem Fokus und Detailgrad, jedoch ist allen gemein, dass sie eine Vision bzw. ein Zielbild der Digitalisierung wiedergeben, an dem sich auch KMU orientieren können. Von den betrachteten Referenzmodellen eignet sich die **5C-Architektur** aufgrund der ausführlich beschriebenen Zielsetzung, Eigenschaften und Anwendungsbeispiele je Ebene am ehesten als Grundlage für ein Referenzmodell für Produktionssysteme [Lee15]. Die 5C-Architektur beschreibt in fünf Stufen den Aufbau eines CPS. Dieser Ansatz lässt sich unter Berücksichtigung der genannten Anforderungen erweitern und anpassen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Stufen der 5C-Architektur für die Entwicklung des Reifegradmodells ebenfalls als Grundlage herangezogen werden können, sodass ein in sich schlüssiges Transformationskonzept entsteht.

4.2.2 Aufbau des Referenzmodells

Der **Aufbau des Referenzmodells** für ein CPPS ist in Abbildung 4-4 dargestellt. Hierbei werden drei Dimensionen berücksichtigt: (1) Bestandteile und Fähigkeiten von CPPS, (2) Produktionsprozesse, Materialfluss und Lagerprozesse und (3) technische und organisatorische Aspekt. Hinsichtlich der Bestandteile und Fähigkeiten von CPPS wurde die 5C-Architektur um die Ebene ‚analog‘ erweitert. Der Digitalisierungsgrad steigt dementsprechend von der Ebene

,analog‘ bis hin zu ,adaptiv‘ an. Im Folgenden werden die einzelnen Ebenen und deren Zielsetzungen bezüglich der Digitalisierung erläutert.

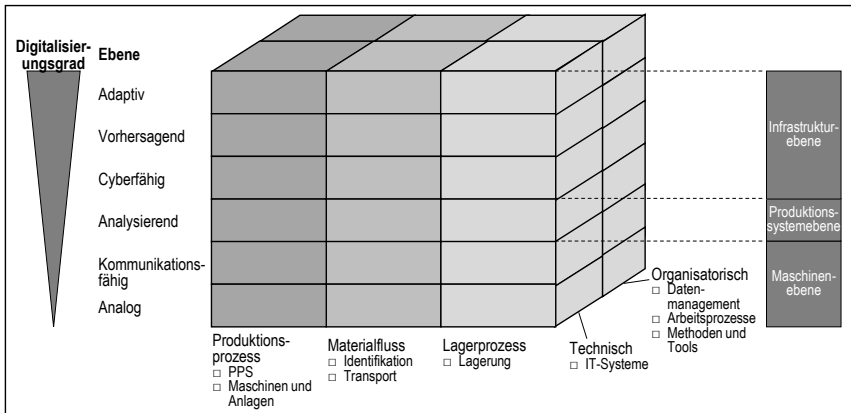


Abbildung 4-4: Referenzmodell für ein CPPS (in Anlehnung an [Lee15])

- ❑ **Analog:** Die analoge Ebene repräsentiert eine Ausgangssituation, in der keinerlei Digitalisierung eines Produktionssystems vorliegt. Auf der analogen Ebene erfolgt dementsprechend keiner der Prozesse im Produktionssystem digital. Stattdessen werden diese Prozesse papierbasiert durchgeführt und Daten – wenn überhaupt – papierbasiert erhoben. Teilweise sind die analog erhobenen Daten oder Informationen mangelhaft und können deshalb weder zur Prozessanalyse noch zur Optimierung herangezogen werden. Die analoge Ebene wird der Maschinenebene zugeordnet.
- ❑ **Kommunikationsfähig:** Befindet sich ein Produktionssystem bereits auf der Ebene der Kommunikationsfähigkeit, so ist es zu einer Zustandsüberwachung des Produktionssystems oder zumindest bestimmter Teile dessen in der Lage. Um diese Ebene zu erreichen, können u. a. Sensornetze oder Plug-&-Play-Technologien verwendet werden, die einzelne noch analoge Maschinen, Komponenten oder Transportmittel kommunikationsfähig machen. Die Ebene der Kommunikationsfähigkeit wird der Maschinenebene zugeordnet und dient als Basis für die Digitalisierung der Produktionssystemebene.
- ❑ **Analysierend:** Hat ein Produktionssystem die Ebene der Analyse erreicht, so ist es bereits in der Lage, selbstständig Analysen durchführen zu können. Dabei ist das gesamte Produktionssystem inklusive der Maschinen, Anlagen, Komponenten und Transportmittel mit Sensoren ausgestattet und vollständig kommunikationsfähig. Der individuelle Zustand jedes Bestandteils des Produktionssystems kann intelligent analysiert werden und basierend darauf sind Leistungsvorhersagen möglich. Beispiele hierfür sind Vorhersagen des Werkzeugverschleißes oder eines Maschinenausfalls. Die Ebene der Analyse wird der Produktionssystemebene zugeordnet.
- ❑ **Cyberfähig:** Auf der Ebene der Cyberfähigkeit ist das Produktionssystem vollständig vernetzt und es kann ein digitaler Zwilling abgebildet sowie verwendet werden. Daten von Maschinen, Komponenten, Transportmitteln und Prozessen werden gespeichert sowie ana-

lysiert. Basierend auf den analysierten Daten können Vergleiche durchgeführt und die Prozesse entsprechend angepasst werden. Die Ebene der Cyberfähigkeit stellt den Übergang von der Produktionssystemebene zur Infrastrukturebene dar.

- ❑ **Vorhersagend:** Produktionssysteme, die die Ebene der Vorhersagefähigkeit erreicht haben, sind in der Lage, die erhobenen Daten kollaborativ durch vorhandene IT-Systeme zu analysieren sowie für den Menschen verständlich aufzubereiten und zu visualisieren. Durch in die IT-Systeme integrierte Simulationen und Datensynthesen werden Handlungsalternativen identifiziert und anschließend priorisiert. So wird bspw. über grafische Auswertungen die Entscheidungsfindung zur Optimierung der Prozesse im Produktionssystem unterstützt. Diese Ebene wird der Infrastrukturebene zugeordnet.
- ❑ **Adaptiv:** Produktionssysteme, die die Ebene der Adaptivität erreicht haben, sind dazu in stande, das Ziel der Selbstoptimierung zu verfolgen. Im Gegensatz zur Ebene der Vorhersagefähigkeit werden die identifizierten Handlungsalternativen auf der Ebene der Adaptivität automatisiert umgesetzt. Das Produktionssystem passt sich z. B. hinsichtlich der Auftragslage oder der Auslastung einzelner Maschinen und Anlagen selbst an und ergreift eigenständig Maßnahmen im Falle von Störungen. Zudem überwacht es sich durchgängig und dauerhaft selbst, sodass es auch in der Lage ist, notwendige Maßnahmen zu veranlassen, um einen reibungslosen und optimierten Produktionsablauf aufrechtzuerhalten. Die Ebene der Adaptivität ist Teil der Infrastrukturebene.

Des Weiteren werden Produktionsprozesse, der Materialfluss sowie Lagerprozesse berücksichtigt (Abbildung 4-4). Jedem dieser Prozesse können gemäß der sechs Ebenen des Referenzmodells unterschiedliche Eigenschaften zugeordnet werden. Dadurch lässt sich die Digitalisierung jeweils schrittweise definieren und beschreiben.

- ❑ **Produktionsprozesse:** Produktionsprozesse werden u. a. von Maschinen und Anlagen ausgeführt sowie durch die PPS gesteuert und werden hier im Speziellen betrachtet. Die Digitalisierung der Maschinen und Anlagen bildet die Grundlage für digitalisierte Produktionsprozesse, die durch die PPS geplant und gesteuert werden. In Tabelle 4-2 sind beispielhaft die ‚Kommunikationsfähigkeit von Maschinen und Anlagen‘ sowie die ‚PPS‘ in den sechs Ebenen des Referenzmodells aufgezeigt:

Tabelle 4-2: Beispielhafte Ausprägungen des betrachteten Aspekts ‚Produktionsprozess‘ auf den jeweiligen Ebenen des Referenzmodells

Ebenen	Kommunikationsfähigkeit von Maschinen und Anlagen	PPS
Adaptiv	Maschinen und Anlagen kommunizieren untereinander und optimieren den Produktionsprozess selbstständig.	Die PPS erfolgt selbstoptimierend.
Vorhersagend	Maschinen und Anlagen kommunizieren untereinander und unterstützen bei der kollaborativen Diagnostik und Entscheidungsfindung.	Die PPS erfolgt IT-basiert und Optimierungsempfehlungen werden gegeben.
Cyberfähig	Maschinen und Anlagen kommunizieren untereinander (gegenseitige Überwachung).	Die PPS erfolgt vollständig IT-basiert und ist mit weiteren IT-Systemen im Unternehmen vernetzt.
Analysierend	Alle Maschinen und Anlagen sind kommunikationsfähig. Die erfassten Daten werden analysiert.	Die PPS erfolgt vollständig IT-basiert. Die erfassten Daten werden analysiert.
Kommunikationsfähig	Maschinen und Anlagen sind kommunikationsfähig. Daten werden erfasst und gespeichert.	Die PPS erfolgt teilweise IT-basiert.
Analog	Maschinen und Anlagen sind analog.	Die PPS erfolgt papierbasiert.

- Materialfluss:** Der Materialfluss kann in den Transport von Materialien und Komponenten sowie in deren Identifikation unterteilt werden. Eine lückenlose Identifikation der Materialien und Komponenten im Materialfluss ermöglicht eine transparente sowie flexible Steuerung dieses Prozesses. Durch geeignete Transportmittel können Transportgüter dann zielgerichtet und autonom zu ihrem definierten Zielort, z. B. einer Maschine zur Weiterverarbeitung, oder ins Lager gebracht werden. Für beide Aspekte ist in Tabelle 4-3 beispielhaft die Einordnung in die Ebenen des Referenzmodells aufgezeigt. Die Identifikation von Materialien und Komponenten hat ihre höchste Digitalisierungsstufe auf der Cyberebene erreicht. Handlungsempfehlungen sowie eine Selbstoptimierung der Identifikation sind diesbezüglich nicht erreichbar.

Tabelle 4-3: Beispielhafte Ausprägungen des betrachteten Aspekts ‚Materialfluss‘ auf den jeweiligen Ebenen des Referenzmodells

Ebenen	Identifikation von Materialien und Komponenten	Transport
Adaptiv	-	Transport erfolgt automatisiert durch Transportmittel mit digitalen Komponenten und die Wahl des Transportmittels optimiert sich selbst.
Vorhersagend	-	Transport erfolgt automatisiert durch Transportmittel mit digitalen Komponenten und Optimierungsempfehlungen zur Wahl des Transportmittels werden gegeben.
Cyberfähig	Materialien sind vollständig digital identifizierbar. Die zugehörigen Daten werden analysiert und an IT-Systeme im Unternehmen weitergegeben.	Transport erfolgt durchgängig durch digitale Transportmittel. Die analysierten Daten werden an andere IT-Systeme im Unternehmen weitergegeben.
Analysierend	Materialien sind vollständig digital identifizierbar. Die zugehörigen Daten werden von einem IT-System analysiert.	Transport erfolgt durch Transportmittel mit digitalen Komponenten. Ein IT-System analysiert die Transportbewegungen.
Kommunikationsfähig	Materialien sind teilweise digital identifizierbar.	Transport erfolgt durch Transportmittel mit teilweise digitalen Komponenten.
Analog	Materialien sind papierbasiert identifizierbar.	Transport erfolgt durch analoge Transportmittel.

- Lagerprozesse:** Im Rahmen von Lagerprozessen wird die Lagerung, genauer die Vorkommissionierung, das Einlagern und Entnehmen sowie das Bestandsmanagement, betrachtet. Die Vorkommissionierung ermöglicht im Produktionsprozess die Verringerung von Fehlern wie einer falschen Materialauswahl durch den Mitarbeiter. Die Digitalisierung des Einlagerns sowie Entnehmens von Materialien und Komponenten aus dem Lager reduziert ebenfalls Fehler und kann die in diesem Kontext benötigte Zeit minimieren. Auf Basis eines digitalen Bestandsmanagements sowie einer durchgängigen Identifikation können Materialien und Komponenten schneller erfasst und katalogisiert werden. In Tabelle 4-4 sind beispielhaft die Vorkommissionierung und das Bestandsmanagement in die sechs Ebenen des Referenzmodells eingeordnet:

In der dritten Dimension des Referenzmodells werden **technische und organisatorische Aspekte** betrachtet, die für alle oben genannten Prozesse gelten (Abbildung 4-4). Im Rahmen der technischen Aspekte stellen IT-Systeme, bspw. MES oder ERP-Systeme, die Grundlage für alle Prozesse sowie alle Ebenen des Referenzmodells dar. IT-Systeme ermöglichen nicht nur eine Standardisierung und Modularisierung der Prozesse [Zarn07]; sie sind auch dazu in der Lage, alle Unternehmensbereiche und die zugehörigen Prozesse miteinander zu vernetzen [Ober19]. Für das Produktionssystem werden MES verwendet. Diese überwachen, steuern und optimieren Prozesse im Produktionssystem [Meye09]. Die von den MES bereitgestellten Informationen helfen Entscheidungsträgern, zu verstehen, wie die an der Produktion beteiligten Subsysteme

miteinander verknüpft sind. Dieses Wissen kann die kontinuierliche Verbesserung des Produktionssystems unterstützen. MES ermöglichen zudem eine Verknüpfung der Betriebsabläufe auf Unternehmensebene mit der Steuerung von Stationen auf Werkstattebene und unterstützen dadurch auch den Datenaustausch mit der Automatisierungsebene [Jask20].

Tabelle 4-4: Beispielhafte Ausprägungen des betrachteten Aspekts ‚Lagerprozess‘ auf den jeweiligen Ebenen des Referenzmodells

Ebenen	Vorkommissionierung	Bestandsmanagement
Adaptiv	Die Vorkommissionierung erfolgt durchgängig digital und selbstoptimierend.	Das Bestandsmanagement erfolgt durchgängig digital und selbstoptimierend.
Vorhersagend	Die Vorkommissionierung erfolgt durchgängig digital. Die Daten werden analysiert, ausgetauscht und es werden Handlungsempfehlungen gegeben.	Das Bestandsmanagement erfolgt durchgängig digital. Die Daten werden analysiert, ausgetauscht und es werden Handlungsempfehlungen gegeben.
Cyberfähig	Die Vorkommissionierung erfolgt durchgängig digital. Die Daten werden mit weiteren IT-Systemen im Unternehmen ausgetauscht.	Das Bestandsmanagement erfolgt digital. Die Daten werden mit weiteren IT-Systemen im Unternehmen ausgetauscht.
Analysierend	Die Vorkommissionierung erfolgt digital. Die Daten werden mithilfe eines IT-Systems analysiert.	Das Bestandsmanagement erfolgt digital. Die Daten werden mithilfe eines IT-Systems analysiert.
Kommunikationsfähig	Die Vorkommissionierung erfolgt teilweise digital.	Das Bestandsmanagement erfolgt teilweise digital.
Analog	Die Vorkommissionierung erfolgt papierbasiert.	Das Bestandsmanagement erfolgt papierbasiert.

Die prozessspezifischen technischen Aspekte, bspw. IT-Systeme, wurden bereits erläutert. Organisatorische Aspekte, die für alle Prozesse gelten, sind u. a. das Datenmanagement, die Arbeitsprozesse sowie produktionsspezifische Methoden und Tools. Das Datenmanagement beschreibt dabei die Erfassung, Speicherung, Verarbeitung und Bereitstellung von Daten und Informationen. Weiterhin werden Konzepte zur Gewährleistung der Datenqualität und -sicherheit betrachtet. Im Bereich der Arbeitsprozesse werden deren Definition, Dokumentation sowie Automatisierung fokussiert. Produktionsspezifische Methoden und Tools sind bspw. die Produktionsnivellierung, die Standardisierung von Prozessen, die Nutzung eines digitalen Zwillings und der Einsatz von Kennzahlen wie der OEE oder der Produktivität. In Tabelle 4-5 sind beispielhaft der technische Aspekt der IT-Systeme sowie der organisatorische Aspekt des Datenmanagements den Ebenen des Referenzmodells zugeordnet:

Tabelle 4-5: Beispielhafte Ausprägungen technischer und organisatorischer Aspekte auf den jeweiligen Ebenen des Referenzmodells

Ebenen	IT-Systeme	Datenmanagement
Adaptiv	IT-Systeme und Programme sind über das Produktionssystem hinaus vernetzt und werden durchgängig verwendet. Basierend auf den analysierten Daten werden Handlungsempfehlungen gegeben und direkt umgesetzt.	Daten werden digital erhoben, adaptiv analysiert und darauf basierende Handlungen werden selbstoptimierend ausgeführt.
Vorhersagend	IT-Systeme und Programme sind über das Produktionssystem hinaus vernetzt und werden durchgängig verwendet. Basierend auf den analysierten Daten werden Handlungsempfehlungen gegeben.	Daten werden digital erhoben, analysiert und Optimierungsempfehlungen werden gegeben.
Cyberfähig	IT-Systeme und Programme sind im Produktionssystem vernetzt und werden durchgängig verwendet. Erfasste Daten werden analysiert.	Daten werden digital erhoben, analysiert und erste Vorhersagen werden getroffen.
Analysierend	IT-Systeme und Programme werden verwendet und sind teilweise vernetzt.	Daten werden digital erhoben, gespeichert und analysiert.
Kommunikationsfähig	Einzelne IT-Systeme und Programme werden verwendet.	Daten werden digital erhoben und gespeichert.
Analog	IT-Systeme und Programme werden kaum eingesetzt.	Daten werden nicht digital erhoben, gespeichert oder analysiert.

4.2.3 Nutzung des Referenzmodells zur Festlegung einer Digitalen Vision

Im Rahmen des Durchlaufens des Transformationsprozesses (vgl. Abbildung 4-3) wird in der ersten Phase mithilfe des Referenzmodells ein **Zielbild** für Produktionsprozesse, Materialflüsse und/oder Lagerprozesse festgelegt. Dieses Zielbild wird im Rahmen eines Workshops in einem interdisziplinären Team erarbeitet, sodass eine Entscheidung über einen Konsens bezüglich verschiedener Alternativen getroffen werden kann. Abbildung 4-5 kann dabei als eine Orientierungshilfe zur Festlegung eines Zielbilds eines zu digitalisierenden Produktionssystems verwendet werden. Im ersten Schritt zur Definition der Digitalen Vision werden die drei allgemeinen Fragestellungen beantwortet, was, wann und womit die Digitalisierung erreicht werden soll. Für das *Was* wird eine Ebene des Referenzmodells für Produktionsprozesse, Materialflüsse und Lagerprozesse ausgewählt, die für jeden der betrachteten Prozesse variieren kann. Anschließend wird für das *Wann* ein erster Zeithorizont festgelegt, der mittel- oder langfristig sein kann. Ein kurzfristiger Zeithorizont ist hingegen nicht sinnvoll, da die Digitalisierung als eine strategische Unternehmensentscheidung anzusehen ist und daher nur mittel- bis langfristige Zielsetzungen zu einer nachhaltigen Umsetzung beitragen können. Weiterhin wird anhand von *Womit* ein erster Kostenrahmen zur Zielerreichung festgelegt.

Allgemeine Fragestellungen		Spezifizierung	
Was soll erreicht werden?	Auswahl einer Ebene im Referenzmodell, z. B. Cyberebene für den Produktionsprozess	Qualität, Funktionalität, Umfang	Konkretisierung der Vision – organisatorisch – technisch
Wann soll es erreicht werden?	Auswahl eines Zeithorizonts – mittelfristig: 1-3 Jahre – langfristig: über 3 Jahre	Zeitliche Begrenzung	Konkrete Jahresangaben für einzelne Prozesse
Womit soll es erreicht werden?	Abschätzung des Budgets, das zur Digitalisierung des Produktionssystems zur Verfügung steht	Kostenrahmen	Grobe Aufteilung des Budgets hinsichtlich der definierten Visionen

Abbildung 4-5: Orientierungshilfe zur Festlegung einer Digitalen Vision eines zu digitalisierenden Produktionssystems nach [Kust19]

Im zweiten Schritt zur Definition der Digitalen Vision werden die allgemeinen Fragestellungen hinsichtlich der gewählten Ebenen im Referenzmodell, des gewählten Zeithorizonts und der Abschätzung des Budgets genauer spezifiziert. Die festgelegte Ebene im Referenzmodell wird für jeden betrachteten Prozess im Hinblick auf Qualität, Funktionalität und Umfang ausformuliert. Diesen **Zielstellungen** werden anschließend konkrete Jahresangaben zugeordnet, die im Rahmen des zuvor definierten Zeithorizonts liegen. Die Jahresangaben können je Zielstellung und daraus abgeleitetem Umsetzungsprojekt variieren. Außerdem wird der abgeschätzte Kostenrahmen mit zugeordneten Zielen auf die einzelnen Umsetzungsprojekte aufgeteilt.

4.3 Erarbeitung eines geeigneten Reifegradmodells und Integration in das Transformationskonzept

Um den Digitalisierungsgrad von Produktionssystemen zu bestimmen, kommt im Transformationskonzept ein Reifegradmodell zum Einsatz. Wie in Kapitel 4.3.1 gezeigt wird, existiert kein geeignetes Reifegradmodell, das alle geforderten Anforderungen erfüllt, sodass im Rahmen dieser Dissertation ein neues Reifegradmodell entwickelt werden muss. Zur Erarbeitung des Reifegradmodells wird eine Vorgehensweise genutzt, die auf Methoden nach DE BRUIN [Brui05], BECKER [Beck09b], AKKASOGLU [Akka13] und KÜBEL [Kübe13] basiert (Kapitel

9.5). In Kapitel 4.3.1 werden die identifizierten Reifegradmodelle hinsichtlich der definierten Anforderungen bewertet. Nachfolgend werden konkrete Zielstellungen an ein zu entwickelndes Reifegradmodell erläutert (Kapitel 4.3.1) und daraufhin der Aufbau des Reifegradmodells näher beschrieben (Kapitel 4.3.2). Das Kapitel schließt mit der Anwendung des Reifegradmodells im Rahmen des Transformationskonzepts (Kapitel 4.3.3).

4.3.1 Bewertung bestehender Reifegradmodelle für die Nutzung im Transformationskonzept

Wie bereits erläutert (Kapitel 2.3.4), dienen Reifegradmodelle der Bewertung des Istzustands u. a. von Unternehmen, Produktionssystemen, Prozessen sowie Technologien und geben Handlungsempfehlungen zur Erhöhung des Reifegrads ab. Um den Istzustand eines Produktionssystems hinsichtlich seiner Digitalisierung bestimmen zu können, bedarf es eines Reifegradmodells, das die spezifischen Herausforderungen von KMU berücksichtigt.

Das Reifegradmodell soll die Digitalisierung von Produktionssystemen betrachten (A1) und dabei speziell auf KMU anwendbar sein (A2). Dadurch wird den technischen und organisatorischen Herausforderungen von KMU begegnet, etwa der Unterstützung der internen Entscheidungsfindung oder dem Fehlen eines auf sie zugeschnittenen methodischen Ansatzes (A5). Eine weitere Herausforderung betrifft die Zeit zur Implementierung digitaler Technologien und die damit verbundenen Kosten: Um den Aufwand der Datenaufnahme und -bewertung im Rahmen des Reifegradmodells zu reduzieren, muss dieses daher transparent und leicht verständlich sein (A3). Zudem sind aufwendige Modelle und Algorithmen bei der Bestimmung des Digitalisierungsgrads zu vermeiden, da sie den Zeitaufwand der Anwendung erhöhen und somit die Kosten steigern würden. Eine weitere Anforderung an das Reifegradmodell ist das Vorhandensein der vier wesentlichen Bestandteile eines Reifegradmodells (A4): Erst dann ist das Reifegradmodell vollständig beschrieben.

Die bestehenden Reifegradmodelle (vgl. Kapitel 2.3.4) werden hinsichtlich der Erfüllung festgelegter Anforderungen bewertet, um ihre Eignung für eine Integration im Transformationskonzept zu prüfen. Alle bewerteten Reifegradmodelle werden im Anhang in den Kapiteln 9.4.1 bis 9.4.4 näher erläutert; die gesamte Evaluierung ist in Kapitel 9.4.5 zu finden. Ein Auszug ist in Tabelle 4-6 dargestellt.

□ A1: Betrachtungsobjekt des Reifegradmodells ist die Digitalisierung des Produktionssystems

Das zu verwendende Reifegradmodell muss für die Bestimmung des Digitalisierungsgrads von Produktionssystemen geeignet sein. Diese Anforderung ist vollständig erfüllt, wenn ein Reifegradmodell speziell für Produktionssysteme entwickelt wurde, z. B. das von POKORNI et al. oder HÜBNER et al. Sie ist nur teilweise erfüllt, wenn Bestandteile eines Produktionssystems wie Prozesse oder Maschinen betrachtet werden (siehe hierzu Ansätze in Kapitel 9.4.3) oder wenn ein Produktionssystem im Rahmen eines ganzheitlichen Reifegradmodells zur Bewertung der Digitalisierung eines Unternehmens herangezogen wird, etwa bei MATT et al. oder SIEDLER et al.

□ A2: Das Reifegradmodell wurde speziell für die Anwendung bei KMU entwickelt

Ein geeignetes Reifegradmodell muss mit Fokus auf die Anwendung bei KMU entwickelt worden sein und somit die spezifischen Herausforderungen berücksichtigen (Kapitel 2.1.1), mit

denen sich KMU bei der Digitalisierung der Produktionssysteme konfrontiert sehen. Für die Bewertung der Digitalisierungsreife von KMU entwickelten u. a. HELLGE et al., KNOSPE et al. sowie PIROLA et al. Reifegradmodelle, die das gesamte Unternehmen hinsichtlich verschiedener Kriterien bewerten und ein zusammenfassendes Ergebnis liefern. ANDERL & FLEISCHER sowie MITTAL et al. stellten Reifegradmodelle zur Bewertung der Digitalisierung von Produktionssystemen speziell für KMU zur Verfügung. ANDERL & FLEISCHER fokussierten dabei die Produktion und das Produkt, während der Ansatz von MITTAL et al. die Verwendung der erhobenen Daten berücksichtigt.

□ **A3: Das Reifegradmodell ist einfach verwendbar hinsichtlich Datenaufnahme, Bewertungsaufwand, Transparenz und Verständnis der Sachverhalte**

Um den Aufwand bei der Datenaufnahme und -bewertung zu reduzieren, muss das Reifegradmodell transparent und dadurch leicht verständlich sein. Zudem sind aufwendige Modelle und Algorithmen bei der Bestimmung des Digitalisierungsgrads zu vermeiden, da dies den Zeitaufwand der Anwendung erhöhen und somit die Kosten steigern würde. Beide Aspekte sind insbesondere in KMU kritische Faktoren. Die Bewertung des Digitalisierungsgrads erfolgt häufig durch Fragebögen, so z. B. nach HELLGE et al. oder SIEDLER et al., oder mithilfe von Skalen, wie bei MATT et al. oder MORLOCK et al. Übersichtliche Matrizen, etwa die von ANDERL, stellen eine weitere Alternative dar. Allerdings können Reifegradmodelle auf Unternehmensebene überaus komplex werden, da hier versucht wird, möglichst viele Faktoren zu berücksichtigen. Die Vielzahl an Faktoren mindert bspw. bei SCHUH et al. und PIROLA et al. die Transparenz und Übersichtlichkeit.

□ **A4: Das Reifegradmodell beinhaltet die vier grundlegenden Bestandteile**

Das Reifegradmodell muss der Anforderung entsprechen, dass alle vier grundlegenden Bestandteile gemäß Kapitel 2.3.4 (Reifegradstufen, Indikatoren und Ausprägungen, den Reifegradstufen zugeordnete Ausprägungen sowie Handlungsempfehlungen) enthalten sind. Die Handlungsempfehlungen leiten die Steigerung des Digitalisierungsgrads im Produktionssystem an und können an verschiedene Unternehmensbereiche gerichtet sein. Die betrachteten Reifegradmodelle beinhalten weitgehend alle vier grundlegenden Bestandteile, jedoch fehlt z. B. in den Ansätzen von ANDERL und LEINWEBER et al. die Beschreibung der finalen Reifegradstufe hinsichtlich der Digitalisierung. Bei KRAUT et al., HELLGE et al. und PIROLA et al. fehlen die Handlungsempfehlungen.

□ **A5: Technische und organisatorische Indikatoren werden berücksichtigt**

Die Integration technischer sowie organisatorischer Indikatoren im Reifegradmodell ermöglicht eine gezielte Steigerung des Digitalisierungsgrads. Größtenteils beinhalten die bestehenden Reifegradmodelle sowohl technische als auch organisatorische Aspekte und erweitern diese um die Aspekte Mensch, Strategie sowie Finanzen. Dennoch fokussieren sich einige wenige lediglich auf technische Indikatoren und die damit einhergehende Implementierung digitaler Technologien, so z. B. ANDERL.

Als **Zwischenfazit** ist festzuhalten, dass ein Vergleich aller bestehender Reifegradmodelle zeigt, dass keines in der Lage ist, alle der definierten Anforderungen zugleich vollständig zu erfüllen (Tabelle 4-6). Dementsprechend ist es erforderlich, ein neues Reifegradmodell zu entwickeln, das allen genannten Anforderungen gerecht wird. Die Vorgehensweise zur Entwicklung des Reifegradmodells wird in Kapitel 9.5 genauer erläutert.

Tabelle 4-6: Qualitative Bewertung der Reifegradmodelle (Auszug)

Bewertungsgegenstand	Nr. Ansätze	Anforderungen				
		A1	A2	A3	A4	A5
Unternehmen	1	Readiness-Check ‚Digitalisierung‘ [Boss17], [Hell18]				
	2	Maturity Index [Schu17a]				
	3	I4.0-Assessment [Matt18], [Matt19], [Rauc20]				
	4	I4.0-Benchmark [Knos18]				
	5	Quick-Check [Krau18]				
	6	Digital Readiness Level 4.0 (DRL 4.0) [Piro19]				
	7	InAsPro-Reifegradmodell [Sied20c], [Zeih20]				
Produktionssystem	1	Werkzeugkasten I4.0 [Ande15]				
	2	Industrie-4.0-Audit [Mor116], [Lein18a], [Lein18b]				
	3	Quick-Check [Hüb17], [Hüb18], [Lanz18]				
	4	Produktionsassessment 4.0 [Poko17]				
	5	SM Adoption Framework [Mitt20]				

Anforderung vollständig erfüllt
 Anforderung teilweise erfüllt
 Anforderung nicht erfüllt

Das zu entwickelnde Reifegradmodell muss so gestaltet sein, dass es Produktionsprozesse, Materialflüsse sowie Lagerprozesse in Produktionssystemen einbezieht. Die individuelle Betrachtung dieser Prozesse ermöglicht eine gezielte Situationsanalyse und somit eine zielgerichtete Bewertung des jeweiligen Istzustands der Digitalisierung. Zusätzlich soll ein übergreifender Digitalisierungsgrad für das gesamte Produktionssystem bestimmt werden, da es auch als Ganzes verstanden werden muss, in dem Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Prozessen besteht.

Inhaltlich soll das Reifegradmodell sowohl technische als auch organisatorische Kriterien berücksichtigen, die die Herausforderungen für KMU widerspiegeln (Kapitel 2.3.1). In Analogie zum Referenzmodell soll auch das Reifegradmodell sowohl technische Kriterien wie Maschinen, Anlagen oder PPS als auch organisatorische Kriterien wie Datenmanagement oder Prozesse berücksichtigen. Dies ermöglicht ein durchgängiges und schlüssiges Transformationskonzept. Als weitere Anforderung soll das Reifegradmodell einfach zu verstehen und anwendbar sein, um den Herausforderungen von KMU bei der Digitalisierung begegnen zu können. Mit einem geringen Aufwand soll ein nachvollziehbares Bewertungsergebnis erzielt werden, das auf Grundlage realistischer Handlungsempfehlungen als Basis zur Definition von Umsetzungsmaßnahmen herangezogen werden kann. Die Ziele des Reifegradmodells sind in Abbildung 4-6 dargestellt. Unter Orientierung an diesen Zielsetzungen sowie unter Einsatz der in Kapitel 9.5.2 veranschaulichten Vorgehensweise wurde ein neues Reifegradmodell entwickelt, das nachfolgend erläutert wird.

Zielsetzung	
<input type="checkbox"/>	Digitalisierungsgrad bestimmen
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Produktionssystem
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Produktionsprozess
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Materialfluss
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Lagerprozess
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Momentaufnahme
<input type="checkbox"/>	Leicht anzuwenden / geringer Aufwand bei der Anwendung
<input type="checkbox"/>	Anschlussfähigkeit zum Referenzmodell
<input type="checkbox"/>	Technische und organisatorische Kriterien berücksichtigen
<input type="checkbox"/>	Referenzmodell bildet die Grundlage
<input type="checkbox"/>	Verständliche Ergebnisdarstellung

Abbildung 4-6: Ziele und Anforderungen an das Reifegradmodell (in Anlehnung an [Sied20c])

4.3.2 Aufbau des Reifegradmodells

Das neu entwickelte Reifegradmodell wird im Folgenden als ‚CPPS-Reifegradmodell für KMU‘ bezeichnet. Es bewertet den Digitalisierungsgrad des definierten Betrachtungsobjekts mithilfe einer Unterscheidung in sechs Reifegradstufen. Die **Reifegradstufen** des Reifegradmodells entsprechen dabei den sechs Ebenen des Referenzmodells, sodass das Gesamtkonzept insgesamt konsistent und schlüssig ist (Kapitel 4.2.2): (1) analog, (2) kommunikationsfähig, (3) analysierend, (4) cyberfähig, (5) vorhersagend und (6) adaptiv. Die Stufen bauen dabei jeweils auf ihrem Vorgänger auf, wobei der Digitalisierungsgrad des Produktionssystems mit jeder Stufe ansteigt. Eine kurze Erläuterung der Stufen sowie des zugehörigen Wertebereichs des resultierenden Digitalisierungsgrads DG_{total} sind in Abbildung 4-7 angegeben:

	Analog	Kommunikationsfähig	Analysierend	Cyberfähig	Vorhersagend	Adaptiv
Produktionssystem	Alle Maschinen, Anlagen und Prozesse im Produktionssystem sind analog bzw. sind papierbasiert	Bestandteile des Produktionssystems, wie z.B. Maschinen und Anlagen, sind kommunikationsfähig	Das Produktionssystem ist kommunikationsfähig und der Zustand der Bestandteile wird analysiert	Das Produktionssystem ist kommunikationsfähig und vollständig vernetzt. Daten werden gespeichert und analysiert.	Kollaborative Analyse von Daten aus dem Produktionssystem und Visualisierung von Handlungsalternativen	Auswahl und automatisierte Umsetzung der besten Handlungsalternative. Das Produktionssystem konfiguriert sich selbst.
Wert DG_{total}	$1,0 \leq DG_{total} \leq 1,4$	$1,5 \leq DG_{total} \leq 2,4$	$2,5 \leq DG_{total} \leq 3,4$	$3,5 \leq DG_{total} \leq 4,4$	$4,5 \leq DG_{total} \leq 5,4$	$5,5 \leq DG_{total} \leq 6,0$

Abbildung 4-7: Reifegradstufen des Reifegradmodells (eigene Darstellung)

Das Reifegradmodell unterscheidet zwischen den spezifischen **Fokusbereichen** Produktionsprozess, Materialfluss und Lagerprozess. Somit können sowohl der Digitalisierungsgrad je Fokusbereich als auch der Gesamtdigitalisierungsgrad für das Produktionssystem bestimmt werden (Abbildung 4-8). Innerhalb jedes Fokusbereichs werden technische und organisatorische Kriterien betrachtet, die durch die beiden Dimensionen Technik und Organisation repräsentiert werden. Einige der technischen Kriterien unterscheiden sich je nach Fokusbereich, z. B. Maschinen und Anlagen oder Lagerung, während alle anderen technischen Kriterien durchgehend in allen Fokusbereichen gleich verwendet werden, z. B. IT-Systeme. Organisatorische Kriterien sind für alle Fokusbereiche im Produktionssystem identisch, z. B. Datenmanagement oder Prozesse.

		Fokusbereiche		
		Produktionsprozess	Materialfluss	Lagerprozess
Dimensionen	Technik	Produktionsplanung und -steuerung Maschinen und Anlagen IT-Systeme	Identifikation, Steuerung und Transport IT-Systeme	Lagerung IT-Systeme
	Organisation	Qualitätsmanagement Datenmanagement Arbeitsplatz Prozesse Methoden und Tools	Datenmanagement Arbeitsplatz Prozesse Methoden und Tools	Datenmanagement Arbeitsplatz Prozesse Methoden und Tools

Abbildung 4-8: Fokusbereiche, Dimensionen und Kriterien des Reifegradmodells (eigene Darstellung)

Kriterien werden mittels **Indikatoren** genauer beschrieben. Die Auswahl und Festlegung der Indikatoren erfolgte während der Entwicklung des Reifegradmodells anhand der Analyse der bestehenden Reifegradmodelle sowie der festgelegten Anforderungen. Beschrieben werden die einzelnen Indikatoren in Form von Aussagesätzen, die die jeweilige Ausprägung der Indikatoren anhand der sechs Stufen aus dem Referenzmodell spezifizieren (Tabelle 4-7). Dabei wird die erste Stufe durch Indikatoren repräsentiert, die einen niedrigen Digitalisierungsgrad anzeigen, während der sechsten Stufe Indikatoren entsprechen, die eine vollumfängliche Digitalisierung implizieren.

Tabelle 4-7: Auszug an Kriterien, Indikatoren und ihrer Ausprägungen

Adaptiv	Digital und selbstoptimierend	Durchgängig und selbstoptimierend	Digital und selbstoptimierend	Digital und selbstoptimierend	Digital und selbstoptimierend	Digital und selbstoptimierend
Vorhersagend	Durchgängig digital und intelligent analysiert	Durchgängig und intelligent analysiert	Durchgängig digital und intelligent analysiert	Durchgängig digital und intelligent analysiert	Durchgängig digital und intelligent analysiert	Durchgängig digital und intelligent analysiert
Cyberfähig	Durchgängig digital und analysiert	Durchgängig und analysiert	Durchgängig digital und analysiert	Durchgängig digital und analysiert	Durchgängig digital und analysiert	Durchgängig digital und analysiert
Analysierend	Durchgängig digital	Durchgängig	Durchgängig digital	Durchgängig digital	Durchgängig digital	Durchgängig digital
Kommunikationsfähig	Teilweise digital	Teilweise	Teilweise digital	Teilweise digital	Teilweise digital	Teilweise digital
Analog	Analog	Nicht	Analog	Analog	Analog	Analog
Indikator	Maschinen und Anlagen werden ... in Betrieb genommen	IT-Systeme sind ... in die übergeordneten Unternehmenssysteme integriert (vertikale Integration)	Die Steuerung des Materialflusses erfolgt ...	Daten werden ... ausgewertet	Die Einlagerung und Entnahme von Materialien erfolgt ...	Arbeitsplätze erhalten ... Informationen
Kriterium	Maschinen und Anlagen	IT-Systeme	Identifikation, Steuerung und Transport	Datenmanagement	Lagerung	Arbeitsplatz
Dimension	Technik	Organisation	Technik	Organisation	Technik	Organisation
Ebene	Produktionsprozess		Materialfluss		Lagerprozess	

Die **Berechnung** des Digitalisierungsgrads folgt dem Aufbau des Reifegradmodells. Sie wird vom InAsPro-Reifegradmodell übernommen [Sied20c]. Für jeden Fokusbereich sowie für jedes Kriterium wird mithilfe mehrerer Indikatoren jeweils ein individueller Digitalisierungsgrad berechnet. Zum einen können dadurch die Fokusbereiche miteinander verglichen werden und zum anderen ist auch eine Vergleichbarkeit der Kriterien über die Fokusbereiche hinweg gewährleistet. Der Digitalisierungsgrad je Kriterium $DG_{Kriterium}$ wird anhand des Mittelwerts der Indikatorwerte i_n berechnet und berücksichtigt dabei die Gesamtanzahl an Indikatoren $N \in \{1,2,3, \dots\}$:

$$DG_{Kriterium} = (1/N) \sum_{n=1}^N i_n \quad (1)$$

Irrelevante Indikatoren können aus der Bewertung ausgeschlossen werden, da nicht jeder Indikator in jedem Produktionssystem vorhanden ist und damit berücksichtigt werden muss. Werden Indikatoren dementsprechend als ‚nicht relevant‘ gekennzeichnet und somit nicht bewertet, so werden sie nicht bei der Berechnung des Digitalisierungsgrads des jeweiligen Kriteriums berücksichtigt. Der Reifegrad der Dimensionen Technik und Organisation wird analog zu den Reifegraden der einzelnen Kriterien $DG_{Kriterium}$ als Mittelwert aus allen der jeweiligen Dimension zugeordneten Kriterien ($DG_{Kriterium D}$) und abhängig von der Gesamtanzahl der tatsächlich bewerteten Kriterien $K \in \{1,2,3, \dots\}$ wie folgt berechnet:

$$DG_{Dimension} = (1/K) \sum_{k=1}^K DG_{Kriterium D} \quad (2)$$

Der Digitalisierungsgrad der Fokusbereiche ergibt sich aus der Summe der Mittelwerte aller je Fokusbereich berücksichtigten Kriterien ($DG_{Kriterium E}$). Dementsprechend gilt für die Fokusbereiche analog:

$$DG_{Ebene} = (1/K) \sum_{k=1}^K DG_{Kriterium E} \quad (3)$$

Der gesamte Digitalisierungsgrad wird durch die Summe der Mittelwerte aller Fokusbereiche berechnet. Die zugehörige Formel lautet:

$$DG_{total} = (1/Q) \sum_{q=1}^Q DG_{Ebene} \quad (4)$$

wobei $Q \in \{1,2,3\}$ die Gesamtanzahl an bewerteten Fokusbereichen angibt.

Anhand der Identifikation des Digitalisierungsgrads lassen sich Fokusbereiche, Kriterien sowie Indikatoren ermitteln, die bereits signifikanter bzw. weniger stark digitalisiert sind. Die Fokusbereiche mit einem niedrigeren Digitalisierungsgrad dienen als Ausgangspunkt der Ableitung von Umsetzungsmaßnahmen zur Erhöhung des Digitalisierungsgrads.

4.3.3 Identifikation von Umsetzungsmaßnahmen zur Digitalisierung von Produktionssystemen anhand der Ergebnisse der Anwendung des Reifegradmodells

Die **Bewertung des Digitalisierungsgrads** erfolgt zustandsorientiert; das bedeutet, dass das Reifegradmodell erneut angewandt wird, sobald ein Zielzustand oder ein Zwischenziel erreicht wurde [Akka13]. Dadurch können der Fortschritt bzw. die Zielerreichung überprüft und folglich neue Handlungsfelder identifiziert werden.

Wie beim Referenzmodell erfolgt auch die **Anwendung des Reifegradmodells** im Team unter Berücksichtigung verschiedener Personengruppen und Hierarchieebenen. So wird sichergestellt, dass zum einen Spezialisten an der Bewertung teilnehmen und zum anderen die Bewertung dennoch objektiv erfolgt, da verschiedene Vorstellungen und Wahrnehmungen mit ein-

fließen. Das Reifegradmodell wird bei der Anwendung vollständig durchlaufen. Das dazu genutzte Erhebungsinstrument ist ein Fragebogen mit Multiple-Choice-Fragen, wobei für jeden Indikator zwischen sieben verschiedenen Ausprägungen gewählt werden kann, von denen eine zum Ausschluss des Indikators als ‚nicht relevant‘ dient. Die restlichen sechs Ausprägungen repräsentieren die sechs Stufen des Reifegradmodells. Folglich wird beim Ausfüllen des Erhebungsinstruments (Abbildung 4-9) für jeden Indikator die Ausprägung dessen Digitalisierungsgrads festgelegt. Indikatoren, die nicht bei der Bewertung berücksichtigt werden sollen, weil sie bspw. im Produktionssystem des KMU nicht vorkommen, werden als ‚nicht relevant‘ gekennzeichnet. Weiterhin wird bei der Anwendung nicht nur der Istzustand der Indikatoren hinsichtlich der Digitalisierung bewertet, sondern es wird für jeden Indikator auch ein Sollzustand bestimmt. Dieser wird mit hinzugefügten Notizen begründet.

Produktionsplanung und -steuerung									
Nr. Indikator	Nicht relevant	Analog	Teilweise digital	Durchgängig digital	Durchgängig digital und analysiert	Durchgängig digital und intelligent analysiert	Digital und selbstoptimierend	Sollzustand	Notizen
1 Kennzahlen werden ... erfasst	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Durchgängig digital	
2 Die Arbeitsplan-erstellung und -anpassung erfolgt ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Digital und selbstoptimierend	

Abbildung 4-9: Auszug aus dem Erhebungsinstrument des Reifegradmodells (eigene Darstellung)

Die **Ergebnisse** der Anwendung des Reifegradmodells werden in mehreren Radardiagrammen dargestellt. Diese ermöglichen einen schnellen Überblick über Kriterien, Dimensionen und Fokusbereiche. Der Ist- und der Sollzustand werden in einem gemeinsamen Radardiagramm übereinandergelegt, sodass Abweichungen schnell identifiziert und behoben werden können [Klum19]. Der übergeordnete Gesamtdigitalisierungsgrad wird zur zielgerichteten Auswertung sowohl hinsichtlich der Fokusbereiche als auch der Kriterien aufgeschlüsselt und in einzelnen Radardiagrammen dargestellt (Abbildung 4-10).

Weiterhin werden für jede Ebene Radardiagramme erstellt, die eine genaue Aufschlüsselung der jeweiligen Kriterien beinhalten. Anhand dieser Radardiagramme können Schwächen und Stärken in Bezug auf die Digitalisierung identifiziert werden. So spiegeln niedrige Ausprägungen des Digitalisierungsgrads eines Kriteriums oder eines Fokusbereichs einen Ansatzpunkt zur weiteren Digitalisierung des jeweiligen Kriteriums oder Fokusbereichs wider. Um auf Ansatzpunkte für schnelle Digitalisierungserfolge aufmerksam zu machen, wird deshalb vom Reifegradmodell zusätzlich auf die Ebene und das Kriterium mit dem niedrigsten Digitalisierungsgrad hingewiesen. Dadurch wird eine Empfehlung ausgesprochen, für welches Kriterium und welche Ebene erhöhter Handlungsbedarf hinsichtlich der Digitalisierung besteht. Ein hoher Digitalisierungsgrad dagegen stellt eine Stärke des Unternehmens dar.

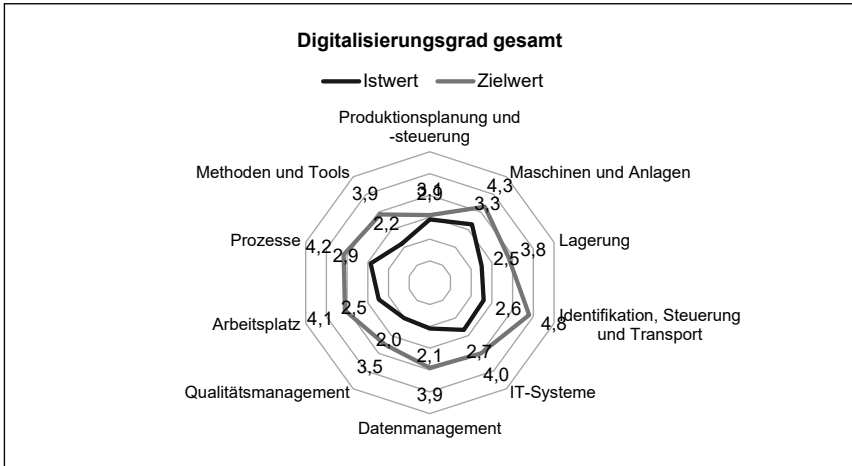


Abbildung 4-10: Beispiel: Aufschlüsselung des Gesamtdigitalisierungsgrads anhand von zehn Kriterien (eigene Darstellung)

Die Ergebnisse des Reifegradmodells dienen dazu, anschließend einzelne Projekte zu definieren. Dabei wird zwischen kurzfristigen Umsetzungs- und längerfristigen Strategieprojekten unterschieden: Kurzfristige Umsetzungsprojekte zielen darauf ab, mit möglichst geringem Zeitaufwand den gewählten Sollzustand zu erreichen, während längerfristige Strategieprojekte dazu dienen, die festgelegte Digitale Vision (Kapitel 2.3.2) mittel- bis langfristig zu realisieren. Im Rahmen der **Projektinitialisierung** der Umsetzungsprojekte werden die Fragen *was, wo, warum, wann, wer, wie viel* und *wie* geklärt [Proj17], [DIN09b]. Die Beantwortung dieser Fragen erfolgt in Projektsteckbriefen (Abbildung 4-11), die einzeln für jedes Umsetzungsprojekt erstellt werden. Sie beinhalten einen Projektüberblick sowie Details zum jeweiligen Projekt und dessen Teamzusammensetzung. Außerdem werden die Meilensteine sowie das Projektbudget und die erwarteten Projektergebnisse aufgezeigt. Das Ausfüllen des Projektsteckbriefs wird inkrementell in den Kapiteln 4.4 und 4.5 vorgestellt.

Projektsteckbrief																			
Projektüberblick		Meilensteine	Projekt Budget																
Zweck des Projekts: ... Zielziele: ... Hintergrund und Umfang: ... Erwartete Ergebnisse: ...		Projektstart: ● Meilenstein 1: ① Meilenstein 2: ② Meilenstein 3: ③ Meilenstein 4: ④ Projektende: ●	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Qualität</th> <th>Kosten</th> <th>Gesamt</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ressourcen</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Hilfsmittel</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Gesamt</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Qualität	Kosten	Gesamt	Ressourcen				Hilfsmittel				Gesamt			
	Qualität		Kosten	Gesamt															
Ressourcen																			
Hilfsmittel																			
Gesamt																			
Was? Wo? Warum?		Wie viel?																	
Projektmanagement	Projekt Team	Wann? Wie?	Projektergebnisse																
Projektname: Kunde: Stakeholder: Projekt Manager:	Abteilung 1: Name: Abteilung 2: Name:	Wer?	Kostensparnisse: Verbesserung der Qualität: Zeiterparnisse:																
			Warum?																

Abbildung 4-11: Projektsteckbrief (eigene Darstellung)

4.4 Definition konkreter Projektziele zur Digitalisierung von Produktionssystemen

Nach der Definition der Digitalen Vision sowie der Identifikation des Istzustands der Digitalisierung werden Projekte basierend auf den Kriterien initialisiert, die einen geringen Digitalisierungsgrad aufweisen. Zur Erhöhung dieses Digitalisierungsgrads werden anschließend Maßnahmen definiert und umgesetzt. KPIs können herangezogen werden, um das Produktionssystem sowie das Umsetzungsprojekt zu überwachen (Kapitel 2.3.7): Die umgesetzten Digitalisierungsmaßnahmen können sich auf KPIs im Produktionssystem auswirken (positiv, negativ oder neutral). Deswegen werden nachfolgend die Zusammenhänge zwischen Reifegradindikatoren und KPIs identifiziert (Kapitel 4.4.1). Anhand der Information, wie sich die Erhöhung des Digitalisierungsgrads auf KPIs auswirkt, können die Projektziele genauer definiert werden (Kapitel 0). Anschließend wird eine Anforderungsanalyse an zu implementierende digitale Technologien durchgeführt (Kapitel 4.4.3).

4.4.1 Auswirkungen von Reifegradindikatoren auf Kennzahlen eines Produktionssystems

Zur Definition geeigneter Projektziele, die der Digitalen Vision des zu digitalisierenden Produktionssystems entsprechen, werden KPIs herangezogen. Im Allgemeinen werden KPIs durch Normen definiert und beschrieben, wodurch sie leicht verständlich sind (Kapitel 2.3.7) und somit den Herausforderungen der KMU begegnen (Kapitel 2.3.1). KPIs zeigen den Fortschritt der Digitalisierung an, allerdings ist eine genaue Angabe nur durch entsprechende zeitintensive Tests im realen Umfeld möglich. Dennoch ermöglicht der Ansatz nach SIEDLER et al. [Sied20d], der auf dem Kennzahlensystem von KANG et al. [Kang16] basiert, eine erste Abschätzung der Zusammenhänge und kann somit als Basis herangezogen werden. Dieser Ansatz wird deshalb in das zu entwickelnde Transformationskonzept integriert.

Als Grundlage zur Auswahl geeigneter KPIs wird das **Kennzahlensystem** nach KANG et al. verwendet [Kang16]. Es nutzt die in der Norm ISO 22400-2 [ISO14b] definierten KPIs und strukturiert sie hierarchisch in unterstützende Elemente, Basis-KPIs sowie umfassende KPIs. Das Ziel dieses Kennzahlensystems ist es, ein nützliches Werkzeug für das Management des Fertigungsbetriebs und dessen kontinuierliche Verbesserung bereitzustellen (Abbildung 4-12). Die strukturierten KPIs spiegeln die Betriebsleistung eines Produktionssystems wider, indem sie zwischen Qualität, Produktivität, Instandhaltung sowie Zeit und Menge unterscheiden.

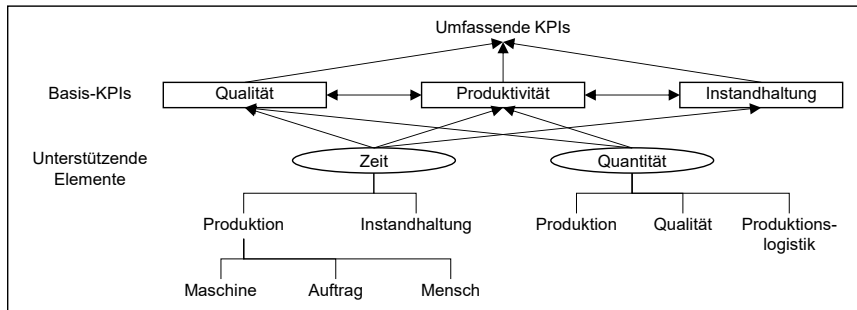


Abbildung 4-12: Qualitative Darstellung des Kennzahlensystem nach [Kang16], [Sied20d], [ISO14b]

- ❑ **Unterstützende Elemente:** Unterstützende Elemente sind messbare Größen, die während der Herstellung überwacht und direkt erfasst werden, z. B. die tatsächliche Wartezeit (Actual Queuing Time, AQT). Die unterstützenden Elemente werden weiter in Herstellung, Wartung und Qualität unterschieden.
- ❑ **Basis-KPIs:** Basierend auf den unterstützenden Elementen können Basis-KPIs durch einfache Berechnungen abgeleitet werden. Alle Basis-KPIs spiegeln z. B. die Leistung einer Maschine oder einer Gruppe von Maschinen wider. Sie sind in drei Gruppen unterteilt, die Aspekte der Herstellung, Qualität und Wartung abbilden. Ein Beispiel ist die Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen (Availability, A).
- ❑ **Umfassende KPIs:** Umfassende KPIs wie der OEE stellen die Gesamtleistung eines Fertigungssystems dar. Sie werden durch die mathematische Verknüpfung von Basis-KPIs berechnet.

Anhand der Formeln nach KANG et al. sowie der ISO-Norm 22400-2 können die unterstützenden Elemente eindeutig identifiziert werden [Kang16], [ISO14b]. Diese sind messbare Größen im Produktionssystem und werden nicht durch andere Elemente berechnet. Die Zusammenhänge zwischen den unterstützenden Elementen, Basis-KPIs und umfassenden KPIs können bspw. durch ein **System-Dynamics-Modell** [Forr61] visualisiert sowie analysiert werden [Sied20d]. System Dynamics ist ein computergestützter Ansatz zur Analyse und zum Entwurf von Entscheidungen. Er basiert auf komplexen, dynamischen Problemstellungen wie etwa sozialen, geschäftlichen, wirtschaftlichen oder ökologischen Systemen [Forr61]. System Dynamics kann mit dem Programm Vensim™ durchgeführt werden. Vensim™ ist eine Simulationssoftware, die eine kontinuierliche Simulation (Systemdynamik) mit ereignisdiskreten und agentenbasierten Modellierungsmöglichkeiten ermöglicht [Vent15]. Mithilfe des entwickelten Modells (Kapitel 9.8.1) lassen sich somit die **unterstützenden Elemente** identifizieren, die in Abbildung 4-13 aufgezeigt und in Kapitel 9.8.2 erläutert sind.

1	Tatsächliche Produktionszeit	↓	12	Sonstige Verluste	↓
2	Tatsächliche Wartezeit	↓	13	Betriebszeit zwischen Ausfällen	↑
3	Tatsächliche Transportzeit	↓	14	Geplante Ausfallzeit	↓
4	Tatsächliche Ausfallzeit der Einheit	↓	15	Geplante Herstellzeit je Einheit	↓
5	Tatsächliche Rüstzeit der Einheit	↓	16	Geplante Ausschussmenge	↓
6	Stillstandszeit	↓	17	Geplante Rüstzeit der Einheit	↓
7	Bestand an Verbrauchsmaterial	↓	18	Bestand an Rohmaterial	↓
8	Verbrauchtes Material	↑	19	Nacharbeitsmenge	↓
9	Ausfallereignis	↓	20	Ausschussmenge	↓
10	Fertigwarenbestand	↓	21	Lagerungs- und Transportverluste	↓
11	Gutmenge	↑	22	Ausfallzeit	↓

Abbildung 4-13: Kennzahlen der Kategorie ‚unterstützende Elemente‘ und ihre Zielstellung (↑: Erhöhung der Kennzahl; ↓: Senkung der Kennzahl) (eigene Darstellung)

Die Zielstellung der einzelnen Kennzahlen ist über ein Pfeilsymbol visualisiert. So besteht bspw. ein Ziel der Fertigungssystemoptimierung darin, die Stillstandszeiten von Maschinen und Anlagen im Produktionsprozess zu reduzieren bzw. gering zu halten. Im Gegensatz dazu soll die produzierte Gutmenge erhöht werden, um eine möglichst geringe Nacharbeits- und Ausschussmenge zu produzieren.

Zur Unterstützung der Zieldefinition von Projekten werden die **Zusammenhänge der Reifegradindikatoren mit den KPIs** identifiziert. Hierfür wird eine Einflussmatrix verwendet, die zwischen den Ausprägungen der Einflüsse anhand der Skala ‚+‘ (erhöht die Kennzahl), ‚0‘ (keine Auswirkung bzw. gleichbleibend) und ‚-‘ (verringert die Kennzahl) unterscheidet. Einen Auszug aus dieser Einflussmatrix zeigt Tabelle 4-8, die gesamte Matrix ist in Kapitel 9.8.3 dargestellt.

Demnach kann z. B. die tatsächliche Ausfallzeit einer Maschine oder Anlage verringert werden, wenn diese zunächst virtuell in Betrieb genommen wird. Dadurch kann die Zeit zur Inbetriebnahme verkürzt und die Qualität von Software sowie Hardware abgesichert werden, sodass es zu weniger Ausfällen kommt [Wüns08], [Zäh06]. Folglich kann die Steigerung der Indikatorausprägung durch geeignete Maßnahmen implizit auch zu einer positiven Entwicklung des jeweiligen Indikators führen. Die Einlagerung und Entnahme von Materialien erfolgt digital, was sich u. a. auf die Lagerungs- und Transportverluste positiv auswirkt: Diese können reduziert werden, da durch die Automatisierung im Zuge der Digitalisierung Fehler vermieden werden. Eine Umsetzung erfolgt mittels automatisierter Lagersysteme [Homp05] oder Assistenzsysteme wie z. B. Pick-by-Light oder Head-up-Displays [Guo14].

Die identifizierten Zusammenhänge zwischen den Reifegradindikatoren und den KPIs dienen hierbei als Orientierung und sind vom Projektteam entsprechend dem im Unternehmen verwendeten Kennzahlensystem anzupassen. Eine allgemeingültige Quantifizierung der Auswirkungen ist hingegen nicht möglich. Aufgrund dessen sind die Eintragungen in der Einflussmatrix anhand der Erfahrungen aus z. B. Pilotanwendungen und Demonstratoren, des Stands der Forschung sowie der unternehmensindividuellen Situation zu prüfen und anzupassen.

4.4.2 Definition von Projektzielen unter Verwendung der KPIs

Im nächsten Schritt werden die Ziele der Umsetzungsprojekte im Projektteam klar definiert und in die jeweiligen Projektsteckbriefe eingetragen (Kapitel 4.3.3). Dazu muss zunächst das **Projektteam je Umsetzungsprojekt** festgelegt werden. Es unterteilt sich meist in ein Kernteam sowie ein erweitertes Team. Das Kernteam des Projekts besteht aus den Teammitgliedern sowie der Projektleitung, wobei die optimale Größe bei fünf bis sieben Teammitgliedern liegt. Die Kernteam-Mitglieder begleiten das Projekt vom Beginn bis zum Abschluss. Ihre Aufgabe ist es, während eines begrenzten Zeitraums interdisziplinär auf das gemeinsame Ziel hinzuarbeiten. Dem erweiterten Team werden Mitglieder zugeordnet, deren Expertise nur temporär benötigt wird, so z. B. Spezialisten aus der Rechtsabteilung oder dem Betriebsrat [Kust19].

Die **Definition von Zielen** ist bedeutend, da diese zum einen eine Richtung vorgeben und zum anderen dabei helfen, den Fortschritt zu kontrollieren und dadurch den Erfolg zu messen. Darüber hinaus sorgen eindeutige Ziele für ein gemeinsames Verstehen und vermeiden eine kreative Interpretation der gesetzten Ziele [Proj17]. Die Zieldefinition erfolgt anhand der Methodik zur Definition SMARTer Ziele, die besagt, dass Ziele „**S**pecific, **M**easurable, **A**ttainable, **R**elevant und **T**ime-bound“ sein müssen, um effektiv und effizient verfolgt werden zu können [Dora81], [Heag16], [Proj17], [Kaur19]:

- ❑ **Specific / Spezifisch:** Es findet eine Festlegung statt, welches Teammitglied im Projekt was macht, warum und wo. Dazu gehören auch die Voraussetzungen für das Erreichen eines Ziels und die Probleme, die bei der Umsetzung voraussichtlich zu lösen sein werden.
- ❑ **Measurable / Messbar:** Um den Erfolg der Zielerreichung messen zu können, werden idealerweise bereits existierende KPIs ausgewählt oder neue definiert. Es kann sich um technische, organisatorische oder Finanzkennzahlen handeln, die als Zielwert verwendet werden.
- ❑ **Attainable / Realistisch:** Die Ziele sollen realistisch und erreichbar sein.
- ❑ **Relevant / Attraktiv:** Die Gründe für das Projekt – also das *Warum* – sowie die Voraussetzungen (Aufwand, Zeit und Umfeld) müssen zweckmäßig und lohnend sein.
- ❑ **Time-bound / Terminiert:** Zur Zielerreichung ist ein bestimmter Zeitrahmen festzulegen und im Erfolgsfall einzuhalten.

Nach der initialen Definition der Ziele werden diese in Muss-, Soll- und Kann-Ziele unterschieden. Basierend darauf erfolgt die **Priorisierung der Ziele** (Abbildung 4-14). Muss-Ziele sind zwingend zu erreichen, damit das Projekt erfolgreich ist und die damit verbundenen Lösungen sinnvoll bzw. brauchbar sind. Hierzu zählen z. B. Gesetze, Sicherheitsvorschriften und Normen. Soll-Ziele sind Ziele, die erreicht werden sollen, aber nicht müssen. Sie können verändert oder gestrichen werden, bspw. eine Zusatzfunktion eines IT-Systems. Kann-Ziele sind Ziele, die zwar das Projektergebnis insgesamt verbessern würden, aber für den grundlegenden Erfolg eines Projektes nicht entscheidend sind und diesen an sich nicht beeinflussen [Walt20], [Kust19].

	Indikator	Istzustand	Zielzustand	SMARTes Ziel	Muss-Ziel	Soll-Ziel	Kann-Ziel	Betroffene KPI
Ziel 1	Maschinen und Anlagen werden ... in Betrieb genommen	Analog	Cyber	Reduktion der tatsächlichen Ausfallzeit um 5% durch die Erstellung eines digitalen Modells der Maschine X und einer anschließenden virtuellen Inbetriebnahme dieser bis zum 31.03.2021.	X	-	-	ADOT
Ziel 2	...	...	...	...	...	...	...	...
Ziel x	...	...	...	...	...	...	...	...

Abbildung 4-14: SMARTe Ziele (eigene Darstellung)

4.4.3 Anforderungen an eine digitale Technologie auf Basis der definierten Projektziele

Auf Grundlage der definierten Projektziele werden **Anforderungen** an eine oder mehrere digitale Technologien ermittelt, durch deren Implementierung die Projektziele potenziell erreicht werden können. Anforderungen an das Projekt und die digitalen Technologien werden vonseiten des Auftraggebers, weiterer Stakeholder sowie durch das Projektumfeld gestellt. Sie liefern dadurch direkt oder indirekt Informationen über Ziele, Rahmenbedingungen sowie Risiken der notwendigen digitalen Technologien [Balz09]. Diese Aspekte werden in die Liste der Anforderungen an die potenziell geeigneten digitalen Technologien aufgenommen.

Das **Projektumfeld** ist das bestehende räumliche und organisatorische Umfeld, in dem das Projekt durchgeführt wird. Es beeinflusst das Projekt und umgekehrt [DIN09c]. Dazu gehören u. a. bestehende Prozesse im Unternehmen, Normen, Standards sowie gesellschaftliche und kulturelle Gegebenheiten [Balz09]. Um die von den Projekten betroffenen Prozesse im Projektumfeld zu identifizieren, wird eine Potenzialanalyse durchgeführt [Dupo19]. Deren Zielsetzung besteht zunächst darin, die bedeutsamsten sowie weitere potenziell zu digitalisierende Prozesse zu identifizieren. Für diese Prozesse ist daraufhin zu bewerten, ob ihre Digitalisierung bezüglich des anfallenden Aufwands, des erwarteten Nutzens sowie der Auftretenshäufigkeit rentabel ist. Abschließend sind die Einflüsse zwischen den Prozessen und dem Projekt zu ermitteln, um mögliche Schnittstellen hinsichtlich der Anforderungsdefinitionen an eine oder mehrere digitale Technologien berücksichtigen zu können. Dadurch werden Insellösungen vermieden [Sied20e]. All diese Schritte erfolgen im Idealfall im Rahmen eines gemeinsamen, interdisziplinären Workshops aller relevanten Beteiligten, in dessen Zuge Ideen gesammelt werden, welche Prozesse im Betrachtungsbereich digitalisiert werden können (Abbildung 4-15). Beispiele für solche Prozesse sind die „Schnittstelle von Produktion zu Versand zur Übertragung von Informationen zu Packmaßen und Gewichten“ [Batz20], [Dupo19] sowie die „Bereitstellung von maschinenspezifischen Daten vom Prüfstand“ [Pier20], [Stub20]. Nach der Bewertung wird geprüft, ob der jeweilige zu digitalisierende Prozess das Projekt beeinflusst oder selbst durch das Projekt beeinflusst wird. Ergänzt wird dies durch spezifische Potenziale für die Organisation.

Prozess	Häufigkeit des Prozesses	Erwarteter Nutzen	Aufwand	Einfluss auf die Prozesse der Pilotanwendung	Richtung und Größe des Einflusses hinsichtlich der Pilotanwendung	Potenziale für die Organisation
Prozess 1 Prozess 2 ... Prozess n	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einmal pro Jahr ▪ Einmal pro Halbjahr ▪ Einmal pro Quartal ▪ Monatlich ▪ Wöchentlich ▪ Täglich ▪ Mehrmals täglich ▪ Stündlich ▪ Mehrmals stündlich 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gering ▪ Mittel ▪ Hoch 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mit vorhandenen digitalen Technologien erreichbar ▪ Mit am Markt verfügbaren digitalen Technologien erreichbar ▪ Mit emergenten digitalen Technologien erreichbar 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Technisch ▪ Organisatorisch ▪ Kein Einfluss ▪ Technisch / Organisatorisch 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sehr stark beeinflussend ▪ Stark beeinflussend ▪ Neutral ▪ Wird stark beeinflusst ▪ Wird sehr stark beeinflusst 	<ul style="list-style-type: none"> Potenzial 1 Potenzial 2 ... Potenzial n

Abbildung 4-15: Schema zur Identifikation und Bewertung potenziell zu digitalisierender Prozesse (eigene Darstellung)

Im nächsten Schritt werden die Anforderungen an digitale Technologien identifiziert, kategorisiert und bewertet. Die identifizierten Anforderungen werden in **funktionale und nicht funktionale Anforderungen** kategorisiert (Abbildung 4-16).

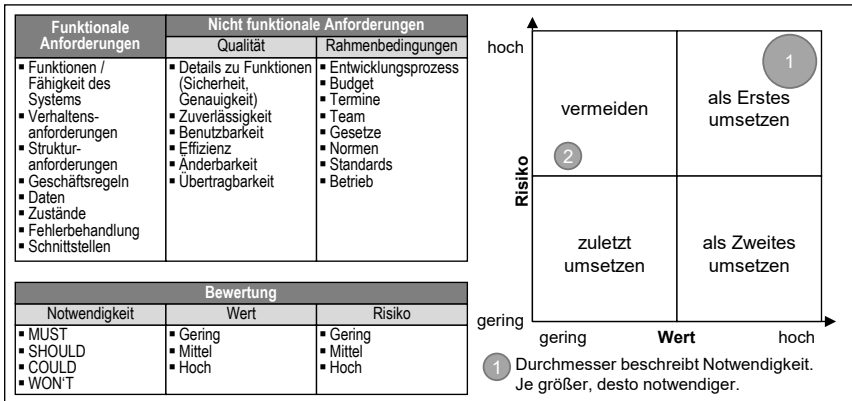


Abbildung 4-16: Anforderungen identifizieren, kategorisieren und priorisieren (in Anlehnung an [Kust19])

Funktionale Anforderungen sind z. B. Funktionen bzw. Fähigkeiten des IT-Systems, Daten sowie Schnittstellen. Nicht funktionale Anforderungen können in Qualitätsanforderungen und Rahmenbedingungen unterteilt werden. Qualitätsanforderungen sind u. a. Zuverlässigkeit, Übertragbarkeit sowie Details zu den Funktionen (Sicherheit oder Genauigkeit). Rahmenbedingungen können technischer oder organisatorischer Natur sein und schränken den Lösungsraum ein. Beispiele hierfür sind Normen, Standards und Gesetze [Kust19].

Anschließend wird die **Notwendigkeit der jeweiligen Anforderung an digitale Technologien** mittels der MoSCoW-Priorisierung definiert, die aus den Aspekten *MUST*, *SHOULD*, *COULD* und *WON'T* besteht. *MUST*-Anforderung sind zwingend erforderlich und müssen im Projekt umgesetzt werden. *SHOULD*-Anforderungen müssen ebenfalls umgesetzt werden, sind aber noch veränderbar. *COULD*-Anforderungen werden nur umgesetzt, falls nach der Umsetzung von *MUST*- und *SHOULD*-Anforderungen noch Ressourcen zur Verfügung stehen. *WON'T*-

Anforderungen werden im aktuellen Projekt nicht umgesetzt, sondern im Ideenpool für nachfolgende Projekte gespeichert [Ahma17], [Achi14]. Nach dieser Einordnung werden die Anforderungen hinsichtlich ihres Wertes und des Umsetzungsrisikos bewertet. Ziel ist es, *MUST*-Anforderungen, die einen hohen Wert, aber auch ein hohes Risiko aufweisen, am Anfang des Projekts zu adressieren und direkt umzusetzen. Dies verhindert ein Verschieben der Umsetzung kritischer, aber notwendiger Anforderungen. Die gesammelten und priorisierten Anforderungen können in einem Lastenheft für das Projekt zusammengeführt werden [Kust19].

4.5 Planung der einzelnen Umsetzungsprojekte

Nachdem im vorangegangenen Kapitel Umsetzungsprojekte und ihre zugehörigen Ziele definiert wurden, wird an dieser Stelle des Verlaufs der Anwendung des Transformationskonzepts dessen Umsetzung geplant. Im ersten Schritt werden digitale Technologien mithilfe eines Technologieradars identifiziert und kategorisiert (Kapitel 4.5.1), bevor anschließend eine oder mehrere digitale Technologien ausgewählt werden, die die Anforderungen erfüllen können (Kapitel 4.5.2). An diese Auswahl schließt die Aufgabenplanung zur Umsetzung der Teilprojekte an (Kapitel 4.5.3), die um eine Risikoanalyse bezüglich der Umsetzung aller Projekte ergänzt wird (Kapitel 4.5.4).

4.5.1 Technologieradar zur Identifikation digitaler Technologien

Zur Identifikation, Kategorisierung und Visualisierung digitaler Technologien werden die Methoden des Technologiemanagements verwendet. Grundsätzlich sind alle dieser Methoden für das Transformationskonzept geeignet (Kapitel 2.3.6). Aufgrund der Visualisierbarkeit einer hohen Anzahl an Technologien in einem einzigen Schaubild ist der Technologieradar zur Integration in das zu entwickelnde Transformationskonzept den anderen Methoden allerdings vorzuziehen. Weiterhin ermöglicht der Technologieradar die Einordnung von Technologien anhand ihrer Reife, ihres Potenzials, ihrer Technologiefelder sowie ihrer Relevanz und stellt somit ein übersichtliches Werkzeug für das Monitoring der digitalen Technologien dar [Wars15]. Aus diesen Gründen wird die Methode des Technologieradars in das zu entwickelnde Transformationskonzept integriert.

Zur Darstellung der digitalen Technologien in einem Technologieradar werden diese den Technologietrends der Digitalisierung, einem Fokusbereich im Produktionssystem sowie einem Technologiereifegrad zugeordnet (Abbildung 4-17). Die zusammengeführten Technologietrends werden nachfolgend beschrieben.

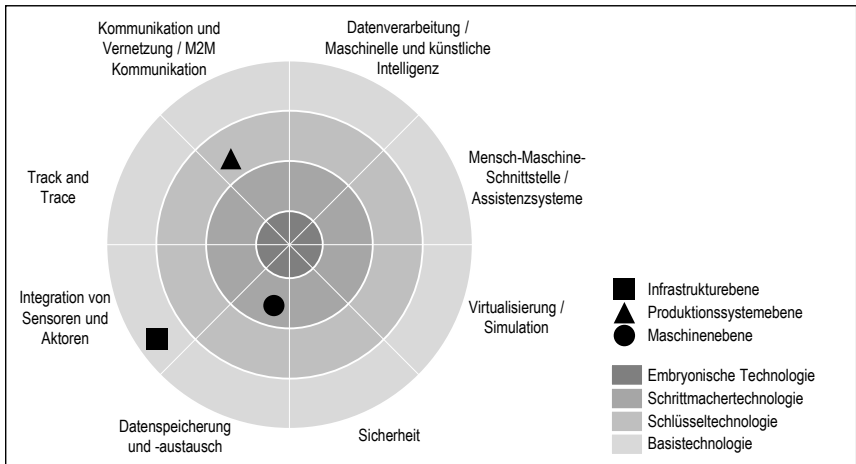


Abbildung 4-17: Technologieradar nach [Ande15] und [Gaus17]

Die identifizierten **Technologietrends** (Kapitel 2.3.5 und 9.6) werden zu acht Kategorien zusammengeführt, die sich hauptsächlich an den Einteilungen nach ANDERL & FLEISCHER sowie GAUSEMEIER et al. orientieren (Abbildung 4-18). Diese beiden Ansätze ähneln einander und ordnen den Kategorien bereits konkrete digitale Technologien zu. Das erleichtert eine Anschlussfähigkeit an Reifegrad- sowie Referenzmodell. Im Folgenden werden diese Kategorien kurz erläutert:

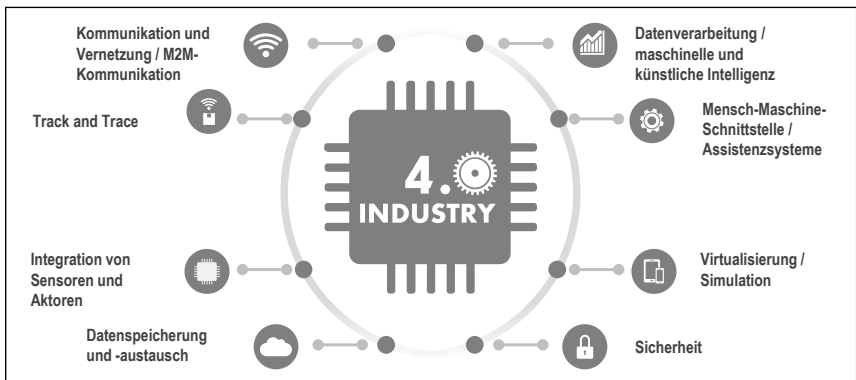


Abbildung 4-18: Aggregierte Trends im Bereich Digitalisierung und I4.0 nach [Ande15] und [Gaus17]

- ❑ **Kommunikation und Vernetzung / Machine-to-Machine-(M2M)-Kommunikation:** Maschinen und Anlagen sind in der Lage, einfache Signale untereinander auszutauschen. Im Rahmen der Digitalisierung wandeln sich diese Kommunikation und die zugehörigen Kommunikationsschnittstellen zu einem direkten Internetzugang jeder einzelnen Maschine und Anlage. Dadurch werden eine einfache, sichere, zuverlässige und unabhängige Kommunikation sowie Verwaltung zwischen den vernetzten Geräten ermöglicht, z. B. Tablets.

- ❑ **Track and Trace:** Durch Track-and-Trace-Technologien werden eine eindeutige Identifikation sowie Rückverfolgung von Materialien im Produktionsprozess, Materialfluss sowie Lagerprozess ermöglicht.
- ❑ **Integration von Sensoren und Aktoren:** Daten werden mittels Sensoren und Aktoren, etwa direkt an der Maschine oder am Produkt, erfasst, kommuniziert und verarbeitet. Das Ziel ist eine eigenständige Reaktion auf die verarbeiteten Informationen, wie z. B. im Rahmen der Steuerung und Überwachung von Systemen.
- ❑ **Datenspeicherung und -austausch:** Die Datenspeicherung kann sowohl direkt an Produkten durch z. B. Barcodes oder RFID erfolgen als auch in Datenbanken und IT-Systemen, die cloudbasiert sein können. Der Austausch erfolgt bspw. über zentrale Datenserver oder internetbasierte Kommunikationsportale.
- ❑ **Datenverarbeitung / maschinelle und künstliche Intelligenz:** Im Rahmen der Datenverarbeitung werden große und unstrukturierte Datenmengen ausgewertet. Das beinhaltet einfache Datendokumentationen, die zur Prozessüberwachung verwendet werden können, wie auch Auswertungen mittels maschineller Intelligenz, z. B. mit der Zielstellung, eine autonome PPS zu erreichen.
- ❑ **Mensch-Maschine-Schnittstelle / Assistenzsysteme:** Lokale Anzeigegeräte sowie Tablets und Datenbrillen stellen Mensch-Maschine-Schnittstellen bzw. Assistenzsysteme dar und unterstützen die Mitarbeiter in verschiedenen Situationen während ihrer Tätigkeiten. Der Fokus dieser digitalen Technologien liegt auf Sicherheits-, Komfort- sowie Produktivitätsaspekten.
- ❑ **Virtualisierung / Simulation:** Durch die Mischung der physischen und virtuellen Welt können bspw. Prototypen dreidimensional entwickelt und geprüft sowie Maschinen und Anlagen zur Fehlervermeidung virtuell in Betrieb genommen werden.
- ❑ **Sicherheit:** Der Bereich der Sicherheit wird in ‚Safety‘ (Funktionssicherheit) und ‚Security‘ (Informationssicherheit) unterteilt. Die Funktionssicherheit überwacht, ob sich ein System hinsichtlich der definierten Funktionalitäten konform verhält. Die Informationssicherheit fokussiert den Schutz der verarbeiteten Daten in einem sicheren System, wodurch eine Datenmanipulation verhindert wird [Ecke12]. Die Norm IEC TS 62443 legt Regelungen und Hilfestellungen zur Cybersecurity in der Industrieautomatisierung für Betreiber, Integratoren und Hersteller dar [Loub19], [DIN20b], [DKE09].

Die Anordnung einer digitalen Technologie im Technologieradar wird durch ihren **Technologiereifegrad** bestimmt, also ihre Position auf der S-Kurve nach McKinsey [Fost86], [Gaus01]. Dabei wird zwischen (1) embryonischer Technologie, (2) Schrittmachertechnologie, (3) Schlüsseltechnologie und (4) Basistechnologie unterschieden [Schu1]. Mit jeder Stufe steigen der Reifegrad und dadurch die Leistungsfähigkeit sowie Einsatzbereitschaft der digitalen Technologie. Der innere Kreis im Technologieradar beinhaltet embryonische Technologien, der äußere Basistechnologien. Embryonische Technologien befinden sich noch in der Entwicklung. Es ist unklar, ob sie sich in der Industrie durchsetzen werden, weshalb sie kaum von Unternehmen berücksichtigt werden. Schrittmachertechnologien werden bereits für industrielle Anwendungen eingesetzt und stehen an der Schwelle zur Marktreife. Technologien, die sich bereits auf dem Markt durchgesetzt haben und in einigen Branchen als Kerntechnologien gelten, werden als Schlüsseltechnologien bezeichnet. Das Leistungspotenzial von Basistechnologien ist bereits ausgeschöpft; ein Austausch durch eine neue Technologie erfolgt zeitnah [Schu1].

Für jede identifizierte digitale Technologie wird ein **Technologiesteckbrief** erstellt [Gaus17], [Sied20a], [Herd18], [Kemp19], der eine kurze Beschreibung der Technologie enthält und so einen Überblick über ihre Eigenschaften liefert (Abbildung 4-19). Eine einheitliche Beschreibungssystematik ermöglicht dabei einen schnellen und einfachen Vergleich zwischen den digitalen Technologien. Weiterhin erfolgt eine Zuordnung der Fokusbereiche Produktionsprozess, Materialfluss und Lagerprozess sowie der Kategorien, der Technologieart und des Reifegrads des Technologieradars. Anschließend werden die digitalen Technologien den Ebenen des Referenzmodells (analog, kommunikationsfähig, analysierend, cyberfähig, vorhersagend und adaptiv) zugeordnet, sodass die Auswahl einer konkreten digitalen Technologie für die definierten Anforderungen erleichtert werden kann (Kapitel 4.2.2). Zusätzlich werden neben Anwendungsmöglichkeiten auch Potenziale und Risiken für den Einsatz im Produktionssystem aufgezeigt. Diese können anhand verschiedener Kriterien identifiziert und beschrieben werden, z. B. des Mengenoptimums (u. a. Produktivität, Stückzahl, Ausschussmenge), der Flexibilität (u. a. Erweiterungs- sowie Anpassungsfähigkeit), der Qualität (u. a. Produktqualität, Fehlerquoten) sowie der Zeit (u. a. Lieferzeit, Rüstzeit) [Zahn96].

Technologiesteckbrief	
Technologie:	
Beschreibung der Technologie:	
Technologiekategorie:	Technologiereifegrad:
Fokusbereich im Produktionssystem:	Infrastruktur-, Produktionssystem- oder Maschinenebene:
Ebenen im Referenzmodell:	Dimension (technisch / organisatorisch):
Voraussetzungen zur Implementierung der digitalen Technologie: <input type="checkbox"/> Hardware: <input type="checkbox"/> Software:	
Potenziale der digitalen Technologie:	Risiken der digitalen Technologie:
Anwendungsbeispiele:	Beeinflusste KPIs:

Abbildung 4-19: Technologiesteckbrief (eigene Darstellung)

Um die Vielzahl digitaler Technologien einzugrenzen, werden im nächsten Schritt die Technologiekategorien fokussiert, die die gesetzte Zielstellung lösen und die Anforderungen erfüllen können. Basierend auf der Zielstellung sowie den festgelegten Anforderungen je Umsetzungsprojekt kann somit eine **Vorauswahl an potenziell geeigneten digitalen Technologien** getroffen werden. Diese Vorauswahl basiert auf verschiedenen Randbedingungen wie der Technologiestrategie des Unternehmens oder der Zukunftsfähigkeit der Technologien. Im Rahmen eines Workshops entscheidet das interdisziplinäre Team, welche digitalen Technologien weiterverfolgt werden sollen. Als Grundlage für die Diskussion und Entscheidung dienen das Zielbild (Kapitel 4.2.3), die konkrete Zielstellung des jeweiligen Projekts, die betroffenen KPIs (Kapitel 0) sowie die definierten Anforderungen (Kapitel 4.4.3) (Abbildung 4-20).

Zielstellung							
Indikator	Istzustand	Zielzustand	SMARTes Ziel			Muss- / Kann- / Soll-Ziel	Betroffene KPIs
Maschinen und Anlagen werden ... in Betrieb genommen	Analog	Cyber	Reduktion der tatsächlichen Ausfallzeit um 5% durch die Erstellung eines Digitalen Modells der Maschine X und einer anschließenden virtuellen Inbetriebnahme dieser bis zum 31.03.2021.			Muss-Ziel	ADOT, FE, STT
Anforderungen					Technologie-kategorie	Potenzielle digitale Technologie	
Anforderungsart	Beschreibung	Notwendigkeit	Wert	Risiko			
...	
...	
...	

Abbildung 4-20: Schema zur Identifikation potenzieller digitaler Technologien (eigene Darstellung)

4.5.2 Auswahl geeigneter digitaler Technologien zur Zielerreichung

Nach der Vorauswahl wird eine finale Auswahl getroffen, die als Entscheidungsgrundlage die **Wechselwirkungen** zwischen den digitalen Technologien verwendet [Sied19a], [Kolb15]. Die Identifizierung dieser Wechselwirkungen hilft Unternehmen dabei, Technologien klar zu strukturieren, sowohl im Rahmen vorhandener Technologien innerhalb eines Prozesses als auch potenziell zukünftig implementierbarer Technologien. Außerdem können durch die Identifikation von Wechselwirkungen zwischen digitalen Technologien Insellösungen vermieden werden, so dass potenziell weniger Medienbrüche innerhalb von Prozessen entstehen. Darüber hinaus lassen sich die Auswirkungen neuer digitaler Technologien auf andere Technologien oder Prozesse treffender beurteilen. Ein Ansatz zur Identifizierung der Wechselwirkungen zwischen digitalen Technologien bietet daher nicht nur eine Entscheidungshilfe, sondern verhindert auch, dass Unternehmen mehr Prozesse als notwendig digitalisieren. Die bestehenden Ansätze zur Identifikation von Wechselwirkungen variieren in ihrem Detailgrad und stellen oft subjektive Bewertungsverfahren dar (Kapitel 2.3.6). Allerdings können sie durch die geeignete Auswahl einer Bewertungsskala objektiver gestaltet werden. Als Grundlage dazu können die Ansätze nach SIEDLER et al. [Sied19a] sowie DUPONT et al. [Dupo20a] herangezogen werden. Das im Folgenden beschriebene Vorgehen orientiert sich am Ansatz von SIEDLER et al.:

Zunächst müssen die **vorhandenen digitalen Technologien** innerhalb des betrachteten Fokusbereichs identifiziert und jedem Prozessschritt individuell zugeordnet werden. Dabei ist zu beachten, dass eine einzelne digitale Technologie mehrfach verwendet werden kann und ein Prozessschritt mehr als eine digitale Technologie enthalten kann. Nachdem die Anforderungen an die benötigten Technologien definiert wurden (Kapitel 4.4.3), kann eine spezifische Technologieidentifikation durchgeführt werden. Das Ziel der Technologiesuche ist die Identifizierung digitaler Technologien, die die definierten Anforderungen erfüllen. Dazu können bereits vorhandene Methoden aus dem Technologiemanagement genutzt werden.

Die Bestimmung der **Vorbedingungen**, die erfüllt sein müssen, um digitale Technologien zu implementieren, ist ein essenzieller Schritt: Sie zeigt auf, ob die potenzielle neue digitale Tech-

nologie direkt auf der Grundlage der bestehenden (digitalen) Technologien bzw. der vorhandenen Infrastruktur umgesetzt werden kann oder nicht. Dazu wird eine Vernetzungsmatrix erstellt (Kapitel 9.7), die Technologien sowohl mit als auch ohne Vorbedingungen identifiziert. Die Skala ist in drei Kriterien unterteilt: keine Vorbedingung (0), optionale Vorbedingung (1) und zwingende Vorbedingung (2).

Anschließend werden anhand eines Matrixdiagramms die **Beziehungen zwischen den digitalen Technologien** identifiziert (Kapitel 9.7). Die Beziehungen zwischen den verwendeten und den potenziellen neuen digitalen Technologien können, wie in Tabelle 4-9 dargestellt, kategorisiert werden. Das dient dem Zweck, mögliche Wechselwirkungen zwischen digitalen Technologien zu identifizieren, und erleichtert die Entscheidung, welche eingesetzt werden sollen. Diese Entscheidung wird schließlich in Abhängigkeit der zuvor definierten Anforderungen und derer Priorisierung umgesetzt.

Tabelle 4-9: Kategorisierte Beziehungen zwischen digitalen Technologien für die Verwendung im Matrixdiagramm [Sied19a]

Skala	Symbol	Beschreibung	Auswirkung	Beispiel
Identisch	++	Der Verwendungszweck der digitalen Technologie ist derselbe wie der einer anderen	Eine digitale Technologie kann ersetzt werden	Drehmaschine und CNC-Drehmaschine
Ergänzend	+	Die Anwendung einer bestimmten digitalen Technologie unterstützt auch eine andere	Weitere digitale Technologien könnten einfacher implementiert werden	Virtuelle Realität und CAD-Programm
Neutral	0	Die digitalen Technologien beeinflussen sich nicht gegenseitig	Keine Auswirkungen	Sensor und Messinstrument; Gestensteuerung und RFID
Konkurrierend	-	Die Verwendung einer digitalen Technologie behindert die Verwendung einer anderen	Der Einsatz konkurrierender digitaler Technologien kann zu Risiken führen	Datenerfassung und unzureichender Datentransfer durch z. B. WiFi
Antinomie	--	Die verwendeten digitalen Technologien haben den gleichen Verwendungszweck, schließen sich aber z. B. aufgrund von Medienbrüchen gegenseitig aus	Die ausgewählten digitalen Technologien müssen unter Berücksichtigung der Anforderungen überdacht werden	Barcode und RFID-Etikett

Zuletzt werden dem Fokusbereich und seinen Prozessschritten die ausgewählten digitalen Technologien, deren Vorbedingungen sowie Zusammenhänge zugeordnet. Mithilfe der Domain-Mapping-Matrix (DMM) (Kapitel 9.7) können die Beziehungen zwischen den digitalen Technologien sowie deren Einordnung in die betrachteten Prozessschritte innerhalb einer Matrix dargestellt werden (Abbildung 4-21). Zur Visualisierung der Zusammenhänge zwischen den digitalen Technologien und den Prozessschritten kann ein Flussdiagramm verwendet werden.

Die **Ergebnisse der Analyse der Vorbedingungen und Zusammenhänge** dienen als Entscheidungsgrundlage, um eine oder ggf. mehrere geeignete digitale Technologien auszuwählen. Idealerweise können diese Technologien durchgängig im Prozess eingesetzt werden, wodurch der Implementierungsaufwand reduziert wird. Weiterhin sollten die Auswirkungen der potenziellen auf die existierenden Technologien und andersherum neutral, ergänzend oder identisch sein, sodass der Implementierungsaufwand gering gehalten bzw. die Anschlussfähigkeit an vorhandene Technologien und Infrastrukturen gewährleistet werden kann. Zur eindeutigen Identifizierung der geeignetsten digitalen Technologie kann basierend auf der DMM ein Ranking erstellt werden: Dazu wird die Skala (Tabelle 4-9) in Werte von +2 bis -2 übertragen und am Ende jeder Zeile aufsummiert. Der höchste Gesamtwert zeigt die geeignetste digitale Technologie auf (Abbildung 4-21).

Die Ergebnisse der vorangegangenen Schritte werden abschließend in einem Pflichtenheft dokumentiert. Dieses enthält die Summe aller Lösungskonzepte und beschreibt, wie die Anforderungen aus dem Lastenheft erreicht werden können. Eine nachträgliche Änderung des Lastenhefts kann allerdings zu wesentlich abweichenden Lösungskonzepten führen und sich entsprechend auf Kosten- sowie Terminfolgen auswirken. Sie ist dementsprechend zu vermeiden [Kust19].

	Drehbank	CNC Drehbank	Scanner (Arbeitsschritte)	Barcode	RFID	Gewichtssensor	Tablet für Arbeitsanweisungen	Robotik	Messchieber	Digitaler Messchieber	Summe	Priorisierung
Drehbank		++	0	0	0	0	0	-	0	0	1	4
CNC Drehbank	++		0	0	0	0	0	0	0	0	2	3
Scanner (Scannen von Arbeitsschritten)	0	+		+	+	0	+	+	0	+	6	1
Barcode	0	0	+		-	0	0	+	0	0	0	5
RFID	0	0	+	-		0	0	+	0	0	0	5
Gewichtssensor	0	0	0	0			+	+	0	0	2	3
Tablet für Arbeitsanweisungen	0	+	0	0	0			-	0	+	1	4
Robotik	0	+	0	0	+	+		-	-	+	2	3
Messchieber	0	0	0	0	0	0	0	0		++	2	3
Digitaler Messchieber	0	+	0	0	0	0	+	+	++		5	2
	Identisch (++) Ergänzend (+) Neutral (0) Konkurrierend (-) Antonomiy (-)											
Prozessschritt												
(1)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
(2)			X	X	X	X	X	X				
(3)			X	X	X	X	X	X				
(4)			X	X	X	X	X	X				
(5)			X	X	X	X	X	X				

Abbildung 4-21: Beispielhaft ausgefüllte Domain-Mapping-Matrix und Priorisierung der digitalen Technologien (eigene Darstellung)

4.5.3 Aufgaben- und Zeitplanung der Umsetzungsprojekte

Nachdem eine oder mehrere geeignete digitale Technologien ausgewählt wurden, die die Zielstellung des jeweiligen Teilprojekts und die entsprechenden Anforderungen erfüllen, wird die **Projektumsetzung** der (Teil-) Projekte geplant. Hierzu gehören u. a. eine Aufgabenplanung, ein Meilensteinplan sowie eine Risikoanalyse [Proj17]. Im Folgenden wird die Aufgabenplanung inklusive des Aufbaus eines Zeitplans und der Definition der zugehörigen Meilensteine erläutert [Masc15]. Auf die ergänzende Risikoanalyse wird in Kapitel 4.5.4 näher eingegangen.

Die Aufgabenplanung hat zum Ziel, diese Fragen zu beantworten [Masc15]:

- Welche Aufgaben müssen erledigt werden?
- Wer soll die Aufgaben durchführen?
- Wie viel Zeit wird für die Aufgaben benötigt?
- Wann sollen die Aufgaben erledigt werden?
- Gibt es Abhängigkeiten zwischen den Aufgaben?

Zur Beantwortung dieser Fragen wird die **Aufgabenplanung** in den folgenden vier Schritten durchgeführt [Masc15], [Sied20e]:

- Aufgaben mit Dauer festlegen und in einen Zeitplan einordnen,

- ❑ Abhängigkeiten zwischen Aufgaben identifizieren,
- ❑ den kritischen Pfad identifizieren und
- ❑ das Parallelisieren der ‚externen‘ und ‚internen‘ Aufgaben auf dem kritischen Pfad (Abbildung 4-22).

Es werden (1) Aufgaben zur Umsetzung der zu implementierenden digitalen Technologien ausformuliert. Diese werden verantwortlichen Personen zugeordnet, die die entsprechenden Kompetenzen besitzen müssen. Diese Experten schätzen anschließend die Umsetzungsdauer ihrer Aufgaben ein und kommunizieren, von welchen weiteren Tätigkeiten die Implementierung abhängig ist. Die Aufgaben werden daraufhin chronologisch geordnet und zugehörige Meilensteine definiert [Kust19].

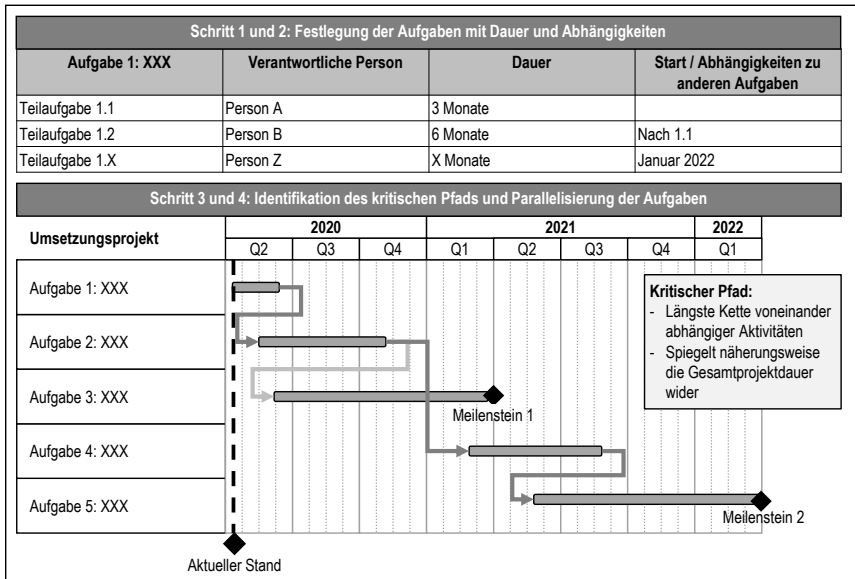


Abbildung 4-22: Aufgabenplanung und Gantt-Diagramm eines Projekts (eigene Darstellung)

Ein **Meilenstein** ist ein Ereignis von besonderer Bedeutung für das Projekt (Messpunkt). Meilensteine definieren Phasenübergänge, z. B. von der Datenerfassung und -aufbereitung zu deren Analyse, und bilden sowohl einen Entscheidungspunkt für die Genehmigung der folgenden Phase als auch für die mögliche Wiederholung der vorherigen Phase oder Phasen. Weiterhin stellt ein Meilenstein ebenfalls einen Entscheidungspunkt für den Abbruch des Projekts (z. B. bei Nichterfüllung eines KO-Kriteriums) dar. Die Liste der Meilensteine bildet die Grundlage zur Überwachung des Projektfortschritts, da sie wesentliche Aspekte des Projektziels anzeigt [Proj17].

Die definierten Aufgaben und Meilensteine werden in einem **Gantt-Diagramm** visualisiert und gemäß ihrer Dauer und Abhängigkeiten terminiert. Anschließend wird der **kritische Pfad** des Projekts identifiziert: Dieser stellt die längste Kette voneinander abhängiger Aufgaben dar und entspricht näherungsweise der Gesamtdauer des Projekts. Verzögert sich auf dem kritischen Pfad eine Aufgabe, so verschiebt sich folglich der Endtermin des Projekts [Kust19], [Masc15].

derung erfolgreich, so findet ein Rollout der digitalen Technologie(n) auf den gesamten Fokusbereich im Produktionssystem statt. Parallel wird das Monitoring bzw. die Steuerung der Realisierung eingesetzt.

Die Implementierung der gewählten digitalen Technologien erfolgt zunächst im Rahmen einer definierten **Pilotanwendung**. Diese beschreibt einen abgegrenzten Bereich, z. B. eine Arbeitsstation, einen eigens dafür entwickelten Demonstrator oder eine Abteilung. Im Rahmen dieses abgegrenzten Bereichs können Erfahrungen hinsichtlich der zu implementierenden digitalen Technologien, des zugehörigen Lösungskonzepts sowie unerwartet auftretender Probleme gesammelt werden. Probleme, die z. B. aufgrund von fehlerhaften Vorgaben, Annahmen und Planungen entstehen, treten dabei nur in einem begrenzten Raum auf und können somit einfacher kontrolliert sowie behoben werden. Das Ziel der initialen Umsetzung einer Pilotanwendung besteht folglich darin, ein hohes Maß an Sicherheit vor dem **Rollout** auf weitere Arbeitsstationen und Bereiche zu erreichen. Nachteilig ist bei diesem Vorgehen eine verlängerte Dauer der Implementierung der digitalen Technologien [Mera14], [Hans02].

Um den **Fortschritt der Realisierung** zu prüfen, werden regelmäßige Treffen des Projektteams anberaunt, sodass der Projektstatus allen Mitgliedern bekannt ist. Die Statusabfrage kann bspw. mithilfe einer Vorlage erfolgen [Pier20], [Dupo19]. Des Weiteren kann parallel dazu eine Meilensteintrendanalyse zur Kontrolle des zeitlichen Fortschritts durchgeführt werden [Kust19]. Darüber hinaus kann zur Prüfung und Steuerung der Zielerreichung in diesem Zeitraum etwa auch ein Zielkontrollblatt [Mera14] zum Einsatz kommen.

Mithilfe der **Meilensteintrendanalyse** ist feststellbar, welche zeitliche Entwicklung des Projekts sich abzeichnet: Die Meilensteine werden in regelmäßigen Abständen auf ihre Zielerreichung geprüft und in einem Diagramm visualisiert. Ein waagrechter Verlauf der Meilensteine zeigt dabei auf, dass der geplante Termin eingehalten wird. Ein ansteigender Verlauf signalisiert hingegen, dass der Termin überschritten wird, und ein fallender Verlauf bedeutet, dass der Termin früher als geplant erreicht wird [Mada17].

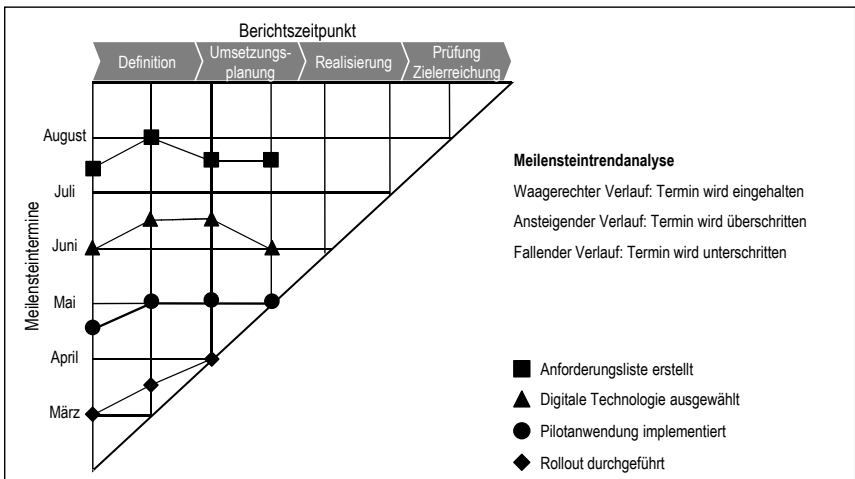


Abbildung 4-24: Meilensteintrendanalyse nach [Kust19], [Mada17]

Zur regelmäßigen Prüfung der Zielerreichung des Umsetzungsprojekts und der damit verbundenen Projektsteuerung bis zum definierten Ziel kann ein **Zielkontrollblatt** verwendet werden (Abbildung 4-25). Dieses repräsentiert ein Dashboard, das Daten grafisch darstellt und für die Projektmitarbeiter sichtbar macht. Dabei werden alle geplanten Aufgaben aufgezeigt und einer geeigneten Kennzahl zugeordnet, die den Erfolg der Maßnahme misst. Dies kann der zu verändernde KPI im Umsetzungsprojekt (Kapitel 0) oder ein weiterer relevanter KPI wie die Kosten oder ein Zeitrahmen sein. Für jede Kennzahl werden der Ist- sowie der Zielwert eingetragen. Während der Realisierung des Projekts werden diese Kennzahlen in festgelegten Abständen geprüft und als Werte hinterlegt oder auch grafisch visualisiert [Mera14]. Der Rhythmus, in dem der Fortschritt geprüft wird, hängt davon ab, wann die grundlegenden Daten verfügbar sind. Allerdings ist eine monatliche oder quartalsweise Prüfung sinnvoll, da in Unternehmen Auswertungen von Daten meist auf dieser zeitlichen Basis durchgeführt und zur Verfügung gestellt werden.

Zielkontrollblatt											
Zielkontrollblatt Projekt: Projekt ABC						Projekt Nr.: 2021-2					
Projektleiter: Person X			Projektmitglieder: Person 1, Person 2,...								
Erstellt am: TT.MM.JJJJ			Aktualisiert am: TT.MM.JJJJ			Aktualisiert von: Person X					
Starttermin der Prüfung: TT.MM.JJJJ			Ende der Prüfung: TT.MM.JJJJ			Wird bei Abweichungen informiert: Person X					
Aufgaben	Kennzahl (Einheit)	Istwert	Zielwert	Prüfung des Fortschritts							
				1	2	3	4	5	6	7	8
1. 1.1 1.2	TEUR	1.000	650	1.000	900	925	800				
2. 2.1 2.2	Zeit (min)	5	0	5	5	4	3				
...											

Abbildung 4-25: Schema des Zielkontrollblatts nach [Burg12]

Die im Zielkontrollblatt visualisierten **Abweichungen** resultieren z. B. aus einer unrealistischen Terminplanung, Fehlern bei der Projektabwicklung oder behördlichen Genehmigungsverfahren. Durch Maßnahmen wie eine Anpassung des Projektbudgets, eine Erhöhung der Ressourcen oder die Parallelisierung von Vorgängen kann solchen Abweichungen begegnet werden. Eine individuelle Ursachenanalyse und entsprechende Beseitigung sollte an dieser Stelle durchgeführt werden [Burg12].

4.7 Prüfung der Zielerreichung des Projekts und hinsichtlich der Digitalen Vision

Im vorletzten Schritt des Transformationskonzepts wird jedes einzelne Umsetzungsprojekt evaluiert (Kapitel 4.7.1). Dadurch wird geprüft, ob die Umsetzungsprojekte die definierten Projektziele erreicht haben und somit erfolgreich waren. Im letzten Schritt wird geprüft, ob und inwiefern die umgesetzten Projekte zur Erreichung der Digitalen Vision beitragen (Kapitel 4.7.2).

4.7.1 Evaluation des Umsetzungsprojekts

Die Evaluation des Projekts erfolgt im Rahmen des **Projektabschlusses**. Dieser stellt einen systematischen, inhaltlichen sowie formalen Abschluss dar und dient der Vermeidung von Wiederholfehlern in zukünftigen Projekten sowie der Reintegration der Teammitglieder. Dazu erfolgen u. a. der inhaltliche Abschluss des Umsetzungsprojekts sowie die Identifikation und Dokumentation noch offener Restaufgaben. Weiterhin werden der Projekterfolg bewertet und Erfahrungen dokumentiert sowie in einer Abschlussdokumentation zusammengeführt. Daraufhin wird das Projektteam aufgelöst [Burg12]. Die hier erläuterten Methoden wurden mehrheitlich im Projekt InAsPro angewandt und die zugehörigen Templates werden im Rahmen dieser Dissertation aufgegriffen. Darüber hinaus können die vorgestellten Ansätze durch andere geeignete Vorgehensweisen ersetzt oder ergänzt werden.

Zur Durchführung des Projektabschlusses können verschiedene Methoden aus der Literatur eingesetzt werden, z. B. Nachkalkulationen, eine Wirtschaftlichkeitsanalyse oder die Schaffung einer einheitlichen Wissensbasis. Dazu erfolgen Prüfungen der Anforderungsanalyse, des Aufgaben- und Zeitplans, der Risikoanalyse sowie der Zielsetzung des Projekts im Rahmen eines Workshops, an dem alle Teammitglieder teilnehmen. Abschließend werden die Lessons Learned aufgenommen [Pier20], [Sied20e]. Im ersten Schritt werden die gesammelten **Anforderungen überprüft**, indem sie hinsichtlich ihrer Erfüllung bewertet werden (Abbildung 4-26). Dabei werden fünf Erfüllungsstufen unterschieden: (1) nicht erfüllt, (2) in geringem Umfang erfüllt, (3), teilweise erfüllt, (4), größtenteils erfüllt und (5) vollständig erfüllt. Weiterhin werden für alle Einordnungen Begründungen formuliert und konkrete Pläne zur weiteren Umsetzung der nicht erfüllten Anforderungen festgelegt.

Anforderungen			Bewertung					Begründung / Umsetzungspläne
Anforderungsart	Beschreibung	Notwendigkeit	Nicht erfüllt	In geringem Umfang erfüllt	Teilweise erfüllt	Größtenteils erfüllt	Vollständig erfüllt	
...	----- ----- ----- ----- -----					..
...	----- ----- ----- ----- -----					..
...	----- ----- ----- ----- -----					..

Abbildung 4-26: Prüfung der definierten Anforderungen nach [Pier20], [Sied20e]

Außerdem wird überprüft, ob die **Umsetzungsplanung** eingehalten werden konnte. Dazu werden folgende Fragestellungen sowie die zuvor durchgeführte Meilensteintrendanalyse herangezogen (Kapitel 4.6):

- Konnte der erarbeitete Zeitplan eingehalten werden? Wenn nein, warum nicht?
- Waren die geplanten Aufgaben vollständig? Haben Aufgaben gefehlt?
- Hat der geplante Zeitrahmen mit der tatsächlichen Zeit übereingestimmt? Wenn nein, warum nicht?

Die Ergebnisse dieser Fragestellungen werden dokumentiert, sodass bei zukünftigen Projekten diese Erfahrungen berücksichtigt werden können. Im nächsten Schritt wird die durchgeführte **Risikoanalyse** auf ihre Richtigkeit geprüft. Dabei werden die folgenden Fragen gestellt:

- Welche Risiken sind tatsächlich eingetroffen?

- Gab es Risiken, die eingetreten sind, aber nicht erfasst waren?
- Wie wurde den eingetroffenen Risiken entgegengewirkt? Haben die (vordefinierten) Maßnahmen dies unterstützt?

Auch diese Ergebnisse werden festgehalten. Die tatsächlich eingetretenen Risiken werden tabellarisch erfasst und hinsichtlich ihrer Relevanz als ‚hoch‘ oder ‚mittel bis niedrig‘ kategorisiert. Anschließend wird analysiert, ob und welche Maßnahmen je eingetretenes Risiko durchgeführt wurden und ob sie erfolgreich waren (Abbildung 4-27).

	Risiken, die eingetreten sind	Wurden Maßnahmen umgesetzt?		
		Ja?	Durchgeführte Maßnahme	Waren die Maßnahmen erfolgreich?
Hoch				
Mittel-niedrig				

Abbildung 4-27: Prüfung der Risiken und Bewertung der Maßnahmen nach [Auri20]

Im vorletzten Schritt wird basierend auf den Ergebnissen der vorherigen Überprüfung sowie der gesetzten Ziele im Umsetzungsprojekt die **Zielerreichung** evaluiert. Dazu wird mithilfe des Zielkontrollblatts zunächst überprüft, ob die gesetzten Kennzahlen je (Teil-) Aufgabe erreicht wurden. Falls dies nicht der Fall ist, muss die Begründung dokumentiert werden, die ein Resultat der vorherigen Analysen sein kann (Abbildung 4-28). Zusammenfassend wird die Erreichung der SMART formulierten Zielstellung bewertet. Dabei muss klar entschieden werden, ob das Ziel erreicht wurde oder nicht. Die Entscheidung wird durch die vorherigen Analysen gestützt.

Zielstellung						
Indikator	Istzustand	Zielzustand	SMARTes Ziel	Muss- / Kann- / Soll-Ziel	Betroffene KPIs	Ziel erreicht?
Maschinen und Anlagen werden ... in Betrieb genommen	Analog	Cyber	Reduktion der tatsächlichen Ausfallzeit um 5% durch die Erstellung eines Digitalen Modells der Maschine X und einer anschließenden virtuellen Inbetriebnahme dieser bis zum 31.03.2021.	Muss-Ziel	ADOT FE STT	ja / nein

Zielkontrollblatt					
Aufgaben	Kennzahl (Einheit)	Istwert	Zielwert	Ziel erreicht?	Begründung, warum das Ziel nicht erreicht wurde
				Ja / Nein	
1. 1.1 1.2	TEUR	1.000	650		
2. 2.1 2.2	Zeit (min)	5	0		
...					

Abbildung 4-28: Prüfung der Zielerreichung und der KPIs (eigene Darstellung)

Im abschließenden Schritt werden die **Lessons Learned** aus Sicht der Projektmitarbeiter aufgenommen. Dadurch sollen positive Veränderungen, die durch das Projekt erzielt wurden, sowie weiteres Verbesserungspotenzial identifiziert werden (Abbildung 4-29). Daraufhin wird

das gesamte Projekt bezüglich der digitalen Technologie sowie des Einführungsprozesses bewertet. Diese Evaluation erfolgt qualitativ und spiegelt positive und negative Erfahrungen sowie die Erfahrungen mit dem Einführungsprozess wider. Die somit sichtbar gemachten Erkenntnisse dienen als Grundlage für die (Weiter-) Entwicklung des Projektmanagements im Unternehmen.

Bewertung der Projektergebnisse			
Positive Veränderungen		Verbesserungspotenziale	
Was hat bei der Projektorganisation und – durchführung gut funktioniert?	...	Welche Maßnahmen sind notwendig, damit die Projektorganisation und – durchführung besser wird?	...
Welche (positiven / negativen) Erfahrungen nehmen Sie aus der Pilotanwendung mit?	...	Was könnte aus Ihrer Sicht bei Folgevorhaben verändert werden?	...
Welche Verbesserungen konnten mit der neuen Lösung erzielt werden?	...	Welche Nachteile sehen Sie bei der eingeführten digitalen Technologie?	...
Wie können diese Verbesserungen weiter ausgebaut werden?	...	Welche Maßnahmen / Anpassungen sind Ihrer Meinung nach notwendig, um die (Einführung der) Technologie weiter zu verbessern?	...
Sonstiges	...	Sonstiges	...

Gesamtbewertung	
<input type="checkbox"/> Wie bewerten Sie die eingeführte digitale Technologie insgesamt?	
<input type="checkbox"/> Wie bewerten Sie den Einführungsprozess insgesamt?	

Abbildung 4-29: Bewertung der Projektergebnisse sowie des Projekts insgesamt nach [Auri20]

4.7.2 Prüfung der Zielerreichung hinsichtlich der Digitalen Vision

Der Einfluss des umgesetzten Projekts auf die Digitalen Vision bzw. das Zielbild wird analysiert, um den Fortschritt identifizieren zu können. Hierfür wird das **Reifegradmodell** erneut angewandt (Abbildung 4-30). Dabei kann auf Kriterien- und Indikatorebene der neue Istzustand bewertet und dieser mit dem alten Istzustand sowie dem geplanten Zielzustand abgeglichen werden. Abweichungen zeigen Ansätze für weitere konkrete Umsetzungsprojekte auf.

Produktionsplanung und -steuerung										
Nr.Indikator	Nicht relevant	Analog	Teilweise digital	Durchgängig digital	Durchgängig digital und analysiert	Durchgängig digital und intelligent analysiert	Digital und selbstoptimierend	Istzustand (alt)	Geplanter Zielzustand	Istzustand (neu)
1 Kennzahlen werden ... erfasst	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Analog	Durchgängig digital	Teilweise digital
2 Die Arbeitsplanerstellung und -anpassung erfolgt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Durchgängig digital	Digital und selbstoptimierend	Digital und selbstoptimierend
...										

Abbildung 4-30: Abgleich der Zielerreichung mit dem Reifegradmodell (eigene Darstellung)

Zusätzlich kann nach der Durchführung mehrerer Umsetzungsprojekte die Erreichung der festgelegten **Digitalen Vision** geprüft werden. Zu diesem Zweck wird der aktuelle Stand des spezifizierten Zielbilds bezüglich Qualität, Funktionalität, zeitlicher Begrenzung sowie Kostenrahmen dokumentiert (Abbildung 4-31). Die identifizierten Abweichungen zeigen den Handlungsbedarf auf strategischer Ebene auf. Je nach Fokus können die Funktionalität, der Zeitrahmen oder auch der Kostenrahmen entsprechend geändert werden, sodass das Zielbild zu erreichen ist. Die so erarbeiteten Anpassungen an das Zielbild wirken sich auf die identifizierten und umzusetzenden Projekte aus. Eventuell sind demnach auch deren Ziele sowie Umfänge entsprechend zu variieren.

Fragestellung		Spezifizierung		Prüfung Zielerreichung	
Was soll erreicht werden?	Auswahl einer der Ebenen im Referenzmodell, z. B. Cyberebene für den Produktionsprozess	Qualität, Funktionalität, Umfang	Konkretisierung der Vision mithilfe der organisatorischen und technischen Aspekte	Wurden die Qualität, Funktionalität, Umfang erreicht?	Beschreibung des aktuellen Stands
Wann soll es erreicht werden?	Auswahl eines Zeithorizonts (mittelfristig: 1-3 Jahre, langfristig: über 3 Jahre)	Zeitliche Begrenzung	Konkrete Jahresangabe. Diese kann für die einzelnen Prozesse variieren.	Wird der Zeitrahmen eingehalten?	Beschreibung des aktuellen Stands
Womit soll das erreicht werden?	Abschätzung des Budgets, das zur Digitalisierung des Produktionssystems zur Verfügung steht	Kostenrahmen	Grobe Aufteilung des Budgets hinsichtlich der definierten Visionen	Wird der Kostenrahmen eingehalten?	Beschreibung des aktuellen Stands

Abbildung 4-31: Prüfung des Fortschritts hinsichtlich der festgelegten Digitalen Vision (eigene Darstellung)

5 Softwaretechnische Umsetzung

In diesem Kapitel wird eine softwaretechnische Unterstützung in Microsoft Excel für das Transformationskonzept ausschnittsweise vorgestellt. Der Aufbau orientiert sich dabei an der entwickelten Vorgehensweise mit den sechs Schritten (1) Digitale Vision, (2) Situationsanalyse, (3) Definition der Projektziele, (4) Umsetzungsplanung, (5) Realisierung und Steuerung sowie (6) Prüfen der Zielerreichung. Im ersten Schritt sind hierzu die Anforderungen an die softwaretechnische Unterstützung aus übergreifender sowie aus Sicht des Transformationskonzepts zu definieren. Basierend darauf wird die softwaretechnische Unterstützung in Excel vorgestellt.

5.1 Anforderungen an die softwaretechnische Unterstützung

Die übergreifenden Anforderungen betreffen die softwaretechnische Unterstützung im Allgemeinen. Sie werden generell an alle softwaretechnischen Unterstützungen wie IT-Systeme gerichtet. Im Kontext des Transformationskonzepts ergeben sich weitere Anforderungen aus fachlicher Sicht, um eine sinnvolle Unterstützung des Vorgehens zur Digitalisierung des Produktionssystems zu ermöglichen.

Übergreifende Anforderungen

Übergreifende Anforderungen richten sich an die softwaretechnische Unterstützung generell. Als solche wurden die folgenden Anforderungen identifiziert:

- ❑ **Durchgängigkeit der softwaretechnischen Unterstützung:** Die softwaretechnische Unterstützung soll das Transformationskonzept durchgängig und vollständig abbilden sowie begleiten. Hierfür müssen alle Schritte und zugehörigen Aktivitäten softwaretechnisch umgesetzt sein.
- ❑ **Leichte und intuitive Bedienbarkeit:** Die Bedienbarkeit der softwaretechnischen Umsetzung muss leicht und intuitiv sein, sodass sie von allen Mitarbeitern ohne weitere Schulungen verwendet werden kann. Dadurch steigt auch deren Akzeptanz für die softwaretechnische Umsetzung und das Tool wird aktiv verwendet.
- ❑ **Verwendung bereits bestehender Programme und IT-Systeme in KMU:** Die softwaretechnische Unterstützung muss in KMU angewandt werden können und daher mit bereits bestehenden Programmen und IT-Systemen kompatibel sein. Dadurch wird eine Investition in weitere isolierte Programme bzw. IT-Systeme vermieden. Weiterhin vereinfacht die Verwendung bereits bekannter Programme die Bedienbarkeit der softwaretechnischen Unterstützung und erhöht wiederum die Akzeptanz der Mitarbeiter.

Anforderungen auf Basis des Transformationskonzepts

Die fachlichen Anforderungen an die softwaretechnische Umsetzung lassen sich aus dem beschriebenen Transformationskonzept ableiten:

- ❑ Schrittweise Führung durch das Transformationskonzept, um die Digitalisierung des Produktionssystems zu unterstützen.
- ❑ Eingabe von (individuellen) Daten und Informationen anhand einer vorgegebenen Struktur, sodass eine Vergleichbarkeit zwischen Projekten gegeben ist.
- ❑ Automatisierte Weitergabe eingegebener Daten, sodass z. B. die Prüfung der Zielerreichung vereinfacht wird.

- Visualisierung von Ergebnissen aus dem Referenzmodell, Reifegradmodell und Technologieradar zur Übersichtlichkeit und zum Verständnis.

5.2 Realisierung der softwaretechnischen Unterstützung

Um den genannten Anforderungen gerecht zu werden, wurde das Transformationskonzept in Microsoft Excel (Version 2019) umgesetzt. Endkunden (Firmen sowie Privatpersonen) verwenden zunehmend Microsoft-Office-Produkte oder Open-Source-Programme, mit denen Excel-Dateien geöffnet werden können [Mirc20], [Bran15], [Bran14]. Das Transformationskonzept wurde demnach vollständig in Excel implementiert. Für jede einzelne Phase wurden die jeweiligen Aktivitäten in Form von Eingabemasken umgesetzt. Diese sind miteinander verknüpft, sodass Daten und Informationen nur einmal eingegeben werden müssen und anschließend automatisch weitergegeben werden können (Abbildung 5-1).

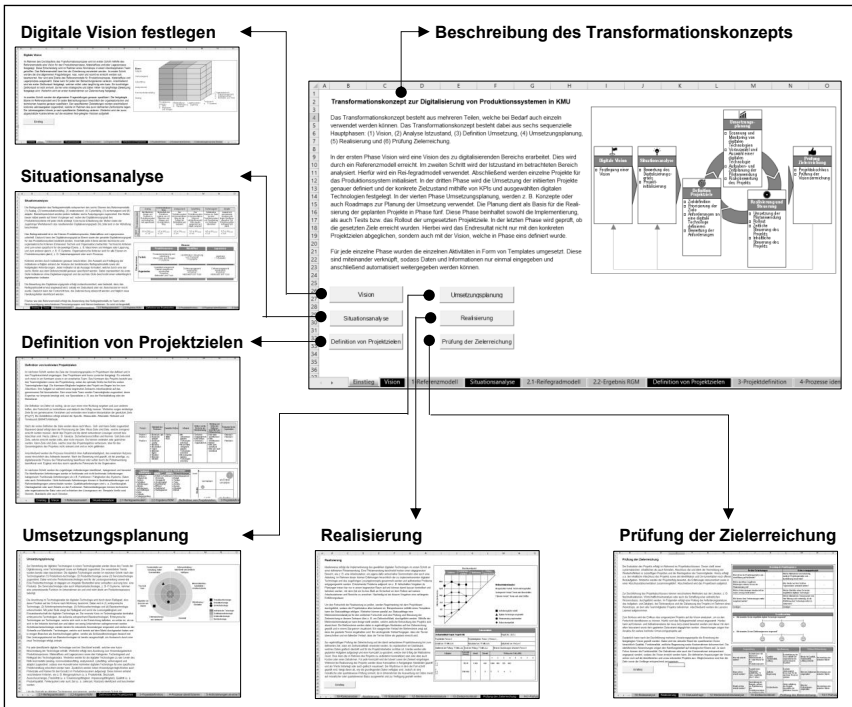


Abbildung 5-1: ‚Digital Transformation Tool‘ – Einstieg (eigene Darstellung)

Auf Basis des Menüs und von Eingabemasken können Daten und Informationen im ‚Digital Transformation Tool‘ eingegeben, bearbeitet, gespeichert und gelöscht werden. Ausgehend vom Einstiegsmenü können die Phasen (1) Digitale Vision, (2) Situationsanalyse, (3) Definition Projektziele, (4) Umsetzungsplanung, (5) Realisierung und Steuerung sowie (6) Prüfung der Zielerreichung aufgerufen und begonnen werden:

- In der **Digitalen Vision** des ‚Digital Transformation Tool‘ können mittel- bis langfristige Ziele für das Produktionssystem identifiziert und spezifiziert werden.

- ❑ Im Rahmen der **Situationsanalyse** können mithilfe eines Reifegradmodells der Istzustand des Digitalisierungsgrads bestimmt und anhand der visualisierten Ergebnisse Handlungsbedarfe festgestellt werden.
- ❑ Im ‚*Digital Transformation Tool*‘ können mittels der **Definition von Projektzielen** konkrete Projektziele definiert und im Rahmen eines Steckbriefs festgehalten werden. Darüber hinaus können weitere zu digitalisierende Prozesse sowie damit verbundene Anforderungen an eine digitale Technologie erarbeitet werden.
- ❑ Im Rahmen der **Umsetzungsplanung** können digitale Technologien in Form eines Technologieradars visualisiert werden. Anschließend können potenzielle digitale Technologien sowie deren Wechselwirkungen mit bereits im Produktionssystem bestehenden digitalen Technologien identifiziert werden. Nach der Auswahl einer konkreten digitalen Technologie können ein Aufgaben- und Zeitplan sowie eine Risikoanalyse für das Projekt durchgeführt werden.
- ❑ Für die **Realisierung** im ‚*Digital Transformation Tool*‘ kann das Projekt mithilfe einer Statusabfrage, der Meilensteintrendanalyse und eines Zielkontrollblatts gesteuert werden.
- ❑ Die **Prüfung der Zielerreichung** kann durch die Evaluation der Anforderungen, Aufgaben- und Zeitplanung, Risikoanalyse sowie Projektziele erfolgen. Weiterhin kann das Reifegradmodell erneut herangezogen werden, um den Fortschritt der Digitalisierung des Produktionssystems zu beurteilen. Abschließend kann das gesetzte Zielbild anhand der spezifizierten Zielstellungen überprüft werden.

Die Funktionen und Bildschirmmasken für die einzelnen Phasen des Transformationskonzepts werden im Folgenden exemplarisch vorgestellt.

Bestimmung einer Digitalen Vision

In der ersten Phase des Transformationskonzepts wird eine Digitale Vision mithilfe des entwickelten Referenzmodells unter Berücksichtigung der Bereiche im Produktionssystem (Produktionsprozess, Materialfluss und Lagerprozess) sowie der Dimensionen (technisch und organisatorisch) festgelegt (Abbildung 5-2). Die Eingabemaske erlaubt eine Eintragung individueller Daten und Informationen, die anschließend im zugehörigen Schaubild visualisiert werden. Des Weiteren unterstützen konkrete Fragen die Spezifizierung der festgelegten Zielstellungen. Auch hierbei können Daten und Informationen individuell und frei eingetragen werden.

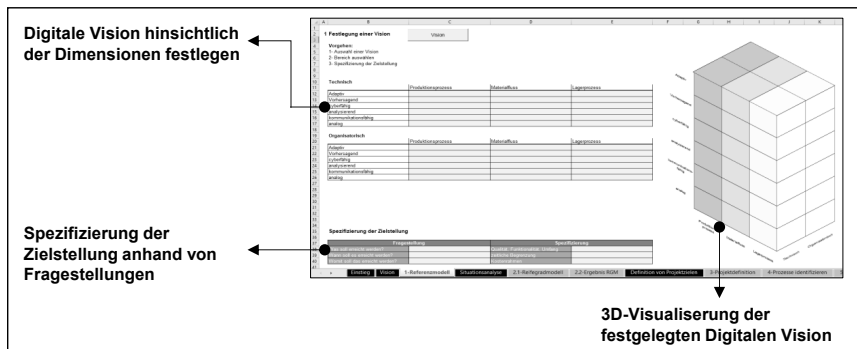


Abbildung 5-2: ‚*Digital Transformation Tool*‘ – Digitale Vision festlegen (eigene Darstellung)

Situationsanalyse

Die primäre Aufgabe der Situationsanalyse besteht in der Bestimmung des Digitalisierungsgrads im Produktionssystem (Abbildung 5-3). Dazu kann mithilfe von Checkboxes im ‚Digital Transformation Tool‘ der Istzustand bezüglich der Digitalisierung identifiziert werden. Dessen Ausprägungen entsprechen den Ebenen des Referenzmodells und wurden angepasst, sodass sie zu den Indikatoren passen und leichter zu lesen bzw. deuten sind (‚analog‘; ‚teilweise digital‘; ‚durchgängig digital‘; ‚durchgängig digital und analysiert‘; ‚durchgängig digital und intelligent analysiert‘; ‚digital und selbstoptimierend‘). Es ist möglich, einen Indikator als ‚nicht relevant‘ zu markieren: Dadurch wird dieser nicht in die Berechnung des Digitalisierungsgrads mit einbezogen. Für jeden Indikator wird mithilfe eines Dropdown-Menüs ein Sollzustand festgelegt. Die Auswahl entspricht den Ausprägungen des Reifegradmodells bzw. den Levels des Referenzmodells. Unterstützend können jedem Indikator Notizen hinzugefügt werden, die die Auswahl der Ausprägung näher beschreiben. Die Ergebnisse werden in Radardiagrammen visualisiert. Die zugehörigen Ist- und Zielwerte des Digitalisierungsgrads werden automatisiert berechnet und angezeigt. Ebenso werden anhand des Reifegradmodells der Bereich im Produktionssystem sowie das Kriterium identifiziert, die den niedrigsten Digitalisierungsgrad aufweisen. Beide werden angezeigt und dienen als Ausgangspunkt für weitere Maßnahmen zur Digitalisierung des Produktionssystems.

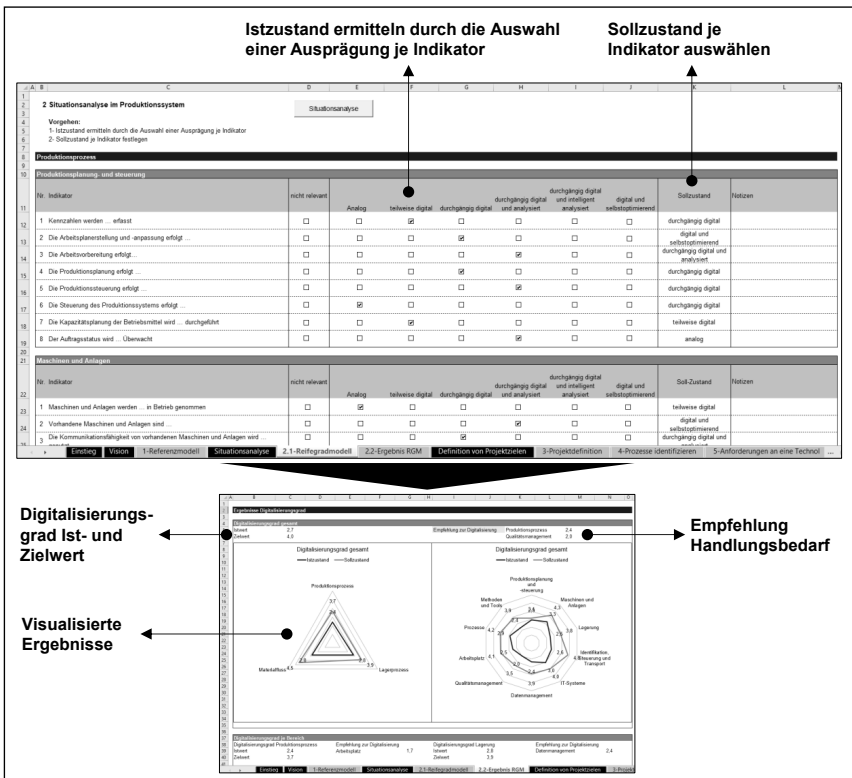


Abbildung 5-3: ‚Digital Transformation Tool‘ – Reifegradmodell (eigene Darstellung)

Definition von Projektzielen

Die Definition der Projektziele besteht aus den Teilschritten (1) Projektdefinition, (2) Prozesse identifizieren und (3) Anforderungen an eine Technologie festlegen. Zur Definition der Projektziele werden zunächst Indikatoren identifiziert, die hinsichtlich ihres Digitalisierungsgrads verbessert werden sollen (Abbildung 5-4). Mittels Dropdown-Menüs werden der Ist- und der Zielzustand hinzugefügt. Anschließend werden die Ziele individuell und SMART formuliert. Anhand von Dropdown-Menüs werden diese daraufhin als Muss-, Soll- oder Kann-Ziele klassifiziert sowie betroffenen KPIs zugeordnet.

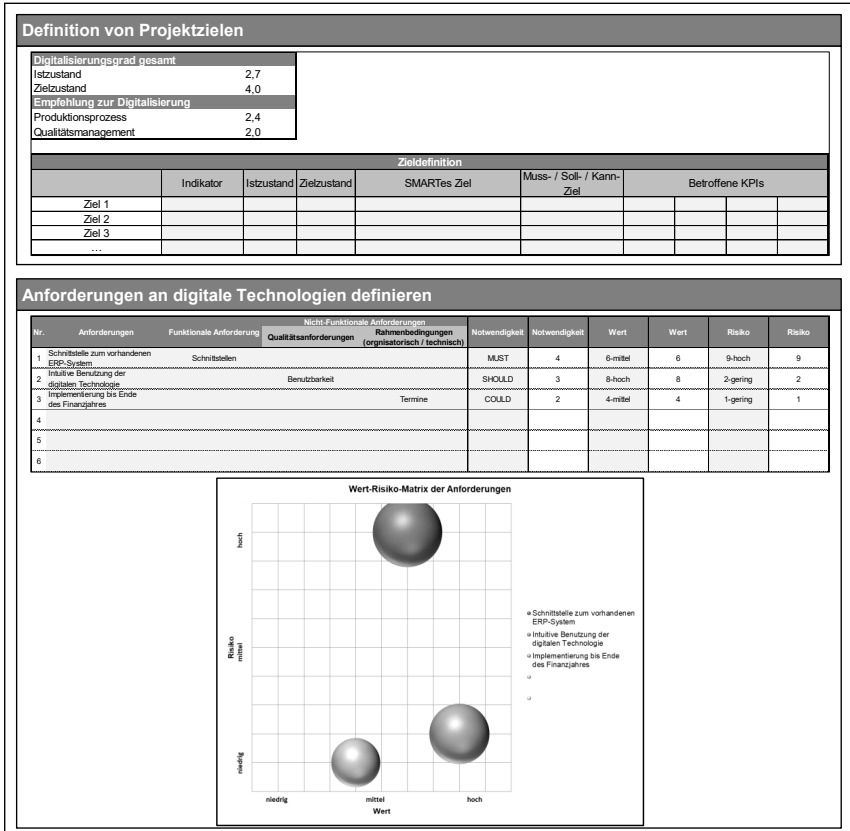


Abbildung 5-4: „Digital Transformation Tool“ – Definition von Projektzielen (eigene Darstellung)

Um eine geeignete digitale Technologie auswählen zu können, werden Anforderungen identifiziert und mittels Dropdown-Menü hinsichtlich funktionaler und nicht funktionaler Anforderungen kategorisiert. Jede Anforderung wird durch Dropdown-Menüs bezüglich ihrer Notwendigkeit (*MUST*, *SHOULD*, *COULD* und *WON'T*) priorisiert und hinsichtlich ihres Wertes und Risikos bewertet. Die Bewertungsskala reicht von 1 (niedrig) bis 9 (hoch). Anhand dieser Priorisierung und Bewertung werden die Anforderungen in einer Wert-Risiko-Matrix visualisiert,

um die Entscheidungsfindung einer digitalen Technologie zu erleichtern. Die Blasengröße entspricht dabei der Priorisierung, während der Wert auf der horizontalen und das Risiko auf der vertikalen Achse abgebildet ist.

Umsetzungsplanung

Die Umsetzungsplanung beinhaltet die Identifikation potenzieller digitaler Technologien, die die gesetzten Anforderungen erfüllen. Die digitalen Technologien werden in einem Technologieradar visualisiert, anhand dessen bereits eine erste Auswahl erfolgen kann. Daraufhin werden die Wechselwirkungen zwischen den potenziellen und den im Produktionssystem bestehenden digitalen Technologien bestimmt und die geeignetste digitale Technologie ausgewählt. Abschließend wird ein Aufgaben- und Zeitplan zur Umsetzung der gewählten Technologie erstellt und eine Risikoanalyse für das Projekt durchgeführt.

Die Eingabemaske zur Auswahl potenzieller digitaler Technologien enthält die zuvor festgelegten Anforderungen inklusive ihrer Priorisierungen und Bewertungen (Abbildung 5-5). Mithilfe des Technologieradars können auf dieser Basis allen Anforderungen passende Technologiekategorien sowie diesen entsprechenden möglichen digitalen Technologien zugeordnet werden. Die potenziellen digitalen Technologien werden daraufhin automatisiert zur DSM weitergegeben, wo die Bestimmung der Zusammenhänge und Wechselwirkungen mithilfe von Dropdown-Menüs erfolgt. Anschließend werden anhand dessen eine oder mehrere digitale Technologien ausgewählt, die im Rahmen des Projekts implementiert werden sollen.

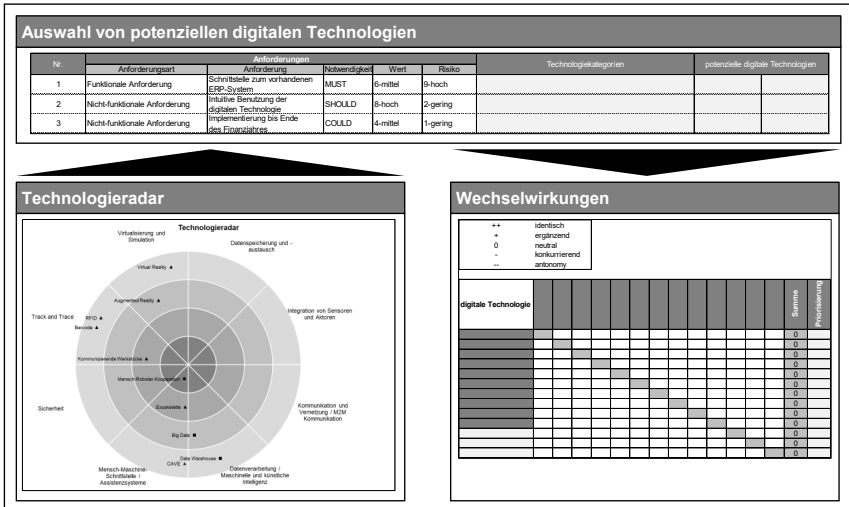


Abbildung 5-5: „Digital Transformation Tool“ – Umsetzungsplanung (eigene Darstellung)

Realisierung

Die Realisierung umfasst die Implementierung der ausgewählten digitalen Technologie. Zur Steuerung und Prüfung des Fortschritts können dabei eine Statusabfrage, die Meilensteintrendanalyse sowie das Zielkontrollblatt eingesetzt werden. Im Zielkontrollblatt werden der Großteil der allgemeinen Daten sowie die Aufgaben aus der Aufgabenplanung automatisiert übernommen (Abbildung 5-6). Für jede Aufgabe wird eine Kennzahl mit Ist- und Zielwert festgelegt.

Im Intervall festgelegter Betrachtungszeitpunkte werden die definierten Kennzahlen geprüft, sodass der Fortschritt abgebildet werden kann. Sollte die Kennzahl sich nicht wie gewünscht entwickeln, so können Maßnahmen ergriffen werden, um das Projekt entsprechend anzupassen.

Ausfüllen der fehlenden Informationen

Zielkontrollblatt									
Projektname					Abteilung				
Projektmanager					Projektmitglieder				
Erstellt am					Ende				
aktualisiert am					Bei Abweichungen zu informieren				
Start der Prüfung 01.04.2018					21.01.2019				
aktualisiert von									
Nr.	Aufgabe	Kennzahl (Einheit)	Istwert	Zielwert	Prüfung des Fortschritts				
					30.10.2018	01.04.2019	30.10.2019	30.03.2020	
1									
1.1	Datenbank implementieren	TC	5	5	3	3,5	3,7	4	
1.2									
1.3									
1.4									
1.5									

Kennzahl mit Ist- und Zielwert bestimmen
Prüfung des Fortschritts zu festgelegten Zeitpunkten

Abbildung 5-6: ‚Digital Transformation Tool‘ – Realisierung (eigene Darstellung)

Prüfung der Zielerreichung

Zur Prüfung der Zielerreichung des Projekts wird zum einen die Erfüllung der Anforderungen, des Zeitplans und der Risikoanalyse geprüft und zum anderen die Erreichung der konkreten Ziele. Des Weiteren werden die Lessons Learned dokumentiert. Bei der Prüfung der Anforderungserfüllung werden die Anforderungen sowie ihre Kategorisierung, Priorisierung und Bewertung automatisiert in die Eingabemaske übernommen (Abbildung 5-7). Die Bewertung der Anforderungserfüllung ist in vier Stufen unterteilt: (1) ‚nicht erfüllt‘, (2) ‚in geringem Umfang erfüllt‘, (3) ‚größtenteils erfüllt‘ und (4) ‚vollständig erfüllt‘. Eine Begründung muss stets gegeben werden, sofern die jeweilige Anforderung nicht vollständig erfüllt ist. Es empfiehlt sich, hier die weiteren Umsetzungspläne zur vollständigen Erfüllung der Anforderungen zu dokumentieren.

Im letzten Schritt wird die Zielerreichung der Digitalen Vision bzw. des Zielbilds mithilfe des Reifegradmodells und der spezifizierten Zielstellung überprüft. Die Indikatoren im Reifegradmodell werden anhand ihrer Ausprägungen neu bewertet (Abbildung 5-8). Zur Unterstützung werden dabei der alte Ist- sowie der geplante Zielzustand automatisiert angezeigt. Weiterhin werden alle drei bewerteten Zustände in den Radardiagrammen dargestellt, um den Fortschritt zu visualisieren und dadurch weitere Handlungsempfehlungen ableiten zu können.

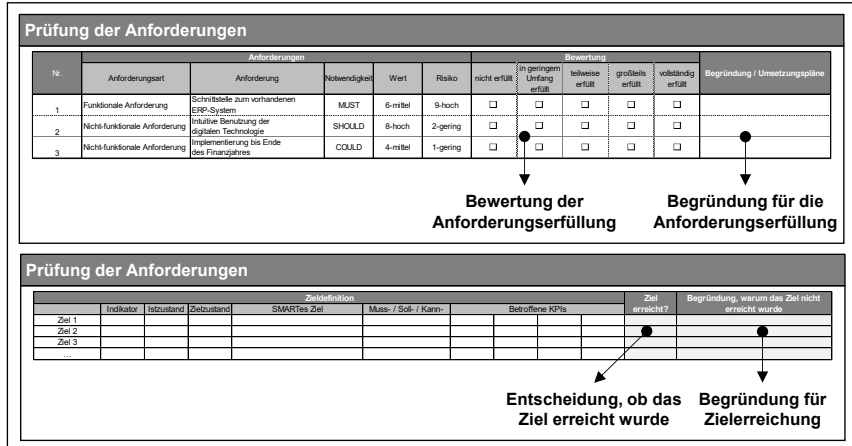


Abbildung 5-7: „Digital Transformation Tool“ – Prüfung der Zielerreichung des Projekts (eigene Darstellung)

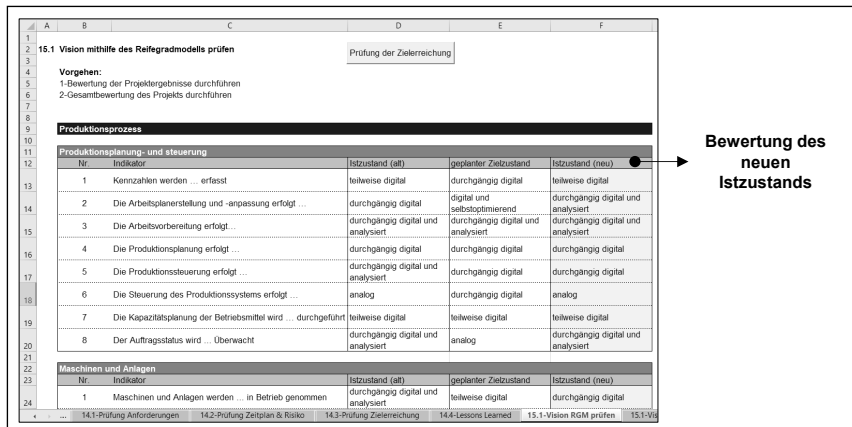


Abbildung 5-8: „Digital Transformation Tool“ – Prüfung der Zielerreichung der Digitalen Vision (eigene Darstellung)

6 Anwendungsbeispiel

Das Ziel dieses Kapitels besteht darin, den Nutzen und die Praxistauglichkeit des entwickelten Konzepts anhand eines Praxisbeispiels zu validieren. Das verwendete Anwendungsbeispiel stammt aus dem Verbundforschungsprojekt „Integrierte Arbeitssystemgestaltung in digitalisierten Produktionsunternehmen (InAsPro)“, das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und den Europäischen Sozialfonds der Europäischen Union (ESF) gefördert wurde [Auri20]. Aus Gründen der Vertraulichkeit werden firmenspezifische Daten und Informationen anonymisiert dargestellt. Zum Teil wurden Daten und Informationen bereits publiziert, die auch hier im Rahmen des Anwendungsbeispiels angegeben sind [Batz20], [Dupo19], [Ehem19]. Weitere Daten und Informationen wurden für das Anwendungsbeispiel verändert und erweitert, sodass die für das Konzept notwendigen Informationen zur Verfügung stehen und Datenschutzrechte aufrechterhalten werden. Auf die Anwendung des Transformationskonzepts ergeben sich daraus keine vorgehens- oder ergebnisrelevanten Auswirkungen.

6.1 Beschreibung des Anwendungsbeispiels

Für den praxisorientierten Anwendungsfall werden zunächst die Ausgangssituation sowie die Zielsetzung hinsichtlich der Digitalisierung des Beispielunternehmens vorgestellt (Kapitel 6.1.1). Anschließend wird das Produktionssystem näher erläutert, das im Fokus des Anwendungsfalls steht (Kapitel 6.1.2).

6.1.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Das betrachtete Beispielunternehmen ist ein mittelständisches Unternehmen mit Hauptsitz in Rheinland-Pfalz. Es entwickelt und produziert auftragsorientiert Geräte für die ökologische Bodenbearbeitung im Wein- und Obstbau, die weltweit vertrieben werden. Der Vertrieb basiert auf einem internationalen Händlernetz, das Kunden in West-, Süd- und Osteuropa sowie Nord- und Südamerika, Australien, Neuseeland und Südafrika beliefert. Die ökologische Bodenbearbeitung und die mechanische Unkrautvernichtung gewinnen aufgrund der Kritik am Einsatz von Herbiziden immer stärker an Bedeutung. Das mittelständische Unternehmen ist in diesen Bereichen einer der führenden Hersteller.

Das Beispielunternehmen fertigt acht Hauptprodukte, die modular aufgebaut und erweiterbar sind, um eine flexible Anpassung an alle erforderlichen Arbeitssituationen zu erlauben. Dieses System macht es möglich, jedem Kunden individuelle und preisvorteilhafte Einzellösungen anzubieten. Die hohe Variantenvielfalt sowie kleine Losgrößen bis hin zu einer Stückzahl von eins stellen eine Herausforderung für das Produktionssystem dar. Zur Herstellung der Produkte ist eine signifikante Flexibilität der Mitarbeiter, Maschinen und Anlagen notwendig. Zudem ist eine hohe Komplexität des Produktionssystems erforderlich.

Zur Erhöhung der Produktivität im Produktionssystem hat sich das Unternehmen dazu entschlossen, Prozesse zu digitalisieren. Dieses Vorhaben umfasst eine technologische Auswahl, aber auch eine Restrukturierung bestehender Prozesse und Datengrundlagen. Dabei verfolgt das Unternehmen die folgenden Ziele:

- ❑ Eine IT-gestützte Vernetzung aller Bereiche soll einen durchgängigen Informationsfluss im Unternehmen schaffen, sodass die Mitarbeiter in Echtzeit benötigte Informationen wie Lagerstand, Lagerort, den aktuellen Fertigungsstand etc. abrufen können.

- Die internen Logistikprozesse sollen vereinfacht werden und die Produktivität an den Schnittstellen zwischen Produktion und Vertrieb erhöhen.
- Mithilfe der Digitalisierung sollen wertschöpfenden Tätigkeiten nachhaltig gestärkt werden, um Arbeitsplätze dauerhaft zu sichern.
- Der Anteil nichtwertschöpfender Tätigkeiten soll reduziert werden.
- Fehler durch das Verbauen falscher Teile sollen vermindert werden.
- Zeiteinsparungen sollen durch eine eindeutige Informationsbereitstellung erzielt werden.
- Eine Reduktion physischer und psychischer Belastungen der Mitarbeiter wird angestrebt, um die Arbeitssituation zu verbessern, wodurch die Mitarbeiterzufriedenheit gesteigert werden soll.
- Zudem soll eine Erhöhung der Arbeits- und Servicequalität für interne und externe Stakeholder erfolgen.

6.1.2 Anwendungsfall

Das Produktionssystem des mittelständischen Unternehmens besteht neben dem Warenein- und -ausgang aus den Bereichen Zerspanung, Rohbau, Lackierung und Montage. Die Bereiche bestehen aus Arbeitsstationen, z. B. Schweißen im Bereich Rohbau, die auch mehrmals vorhanden sind. Der Vorranggraph stellt die typische Bearbeitungsreihenfolge bei der Produktherstellung des mittelständischen Unternehmens dar (Abbildung 6-1). Durch den modularen Aufbau der Produkte kann diese Reihenfolge variieren.

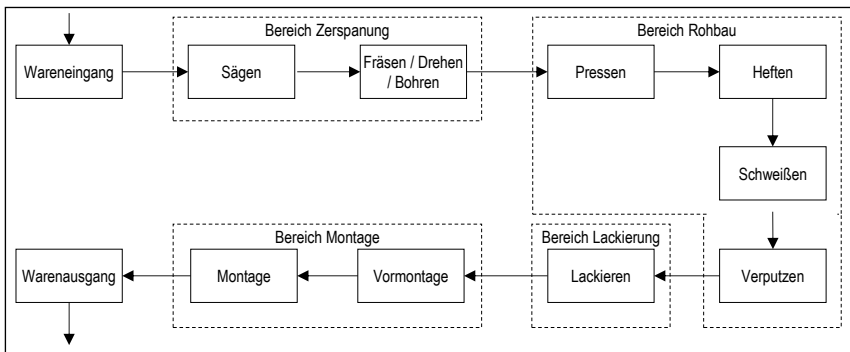


Abbildung 6-1: Vorranggraph der Bearbeitungsreihenfolge in der Ausgangssituation (eigene Darstellung)

Alle eingehenden Aufträge werden in Papierform ins Produktionssystem gebracht und durch die Bearbeitungsplätze weitergegeben. Die Priorisierung der Aufträge erfolgt auf Zuruf, was eine persönliche und zeitintensive Absprache zwischen den Mitarbeitern erfordert. Dabei gibt es keine digitale Unterstützung der Prozesse, sodass der aktuelle Bearbeitungsstand und die Lagerplätze von Materialien und Bauteilen während sowie nach den einzelnen Fertigungsschritten nicht digital oder automatisiert zur Verfügung stehen.

An jeder Arbeitsstation befindet sich ein dezentrales Lager, in dem Materialien und Bauteile aufbewahrt werden, die für die jeweiligen Bearbeitungsschritte nötig sind. Die zugehörige La-

gerungssystematik wird durch jeden Mitarbeiter individuell bestimmt, der für die Materialversorgung seiner Arbeitsstation selbst verantwortlich ist, was mündliche Absprachen mit anderen Mitarbeitern voraussetzt, die z. B. den vorherigen Bearbeitungsschritt durchführen. Dieses Vorgehen erfordert eine eigenverantwortliche Planung der Arbeitsstationen der einzelnen Mitarbeiter, die sich aufgrund der fehlenden Standardisierung und Digitalisierung negativ auf die Produktivität im Produktionsprozess auswirkt. Weiterhin entstehen längere Laufwege, ein erhöhter Zeitaufwand zur Auftragsbearbeitung und eine erhöhte Verwechslungsgefahr hinsichtlich der zu bearbeitenden Bauteile.

Die Materialien und Bauteile sind im Produktionssystem nicht eindeutig identifizier- und nachverfolgbar. Das führt dazu, dass der Verwaltungsbereich z. B. keine konkreten Auskünfte an Kunden hinsichtlich Lieferterminen oder an Lieferanten zum genauen Materialbedarf geben kann.

6.2 Anwendung des Transformationskonzepts

Im ersten Schritt wurde die Anwendung des Transformationskonzepts organisatorisch im Unternehmen eingebunden. Die im Rahmen der sechs Phasen des Transformationskonzepts durchgeführten Aktivitäten werden nachfolgend anhand des Anwendungsbeispiels exemplarisch vorgestellt. Die verwendeten Daten und Informationen wurden teilweise bereits publiziert und teilweise für das Anwendungsbeispiel modifiziert, verändert und erweitert, sodass die für das Konzept notwendigen Informationen zur Verfügung stehen und die Datenschutzrechte des Unternehmens gewahrt werden.

Die organisatorische Einbettung umfasste die Bildung von Instanzen und Projektteams, um das Transformationskonzept anwenden und durchführen zu können. Bereits vorhandene Strukturen dienten dabei als Basis. Die Gesamtprojektleitung lag bei der Leitung der Entwicklung. In regelmäßigen Abstimmungsterminen wurde dem Geschäftsführer sowie den anderen Bereichsleitern Bericht erstattet. Die Projektteams der im Transformationskonzept definierten Projekte setzten sich aus Mitarbeitern der Entwicklung, Konstruktion sowie der Produktion selbst zusammen. Aufgrund der Ziele der Digitalisierung und deren Auswirkungen auf weitere Unternehmensbereiche waren z. B. der Vertrieb, der Einkauf und die IT-Abteilung Stakeholder während der gesamten Anwendung des Transformationskonzepts. Die Teammitglieder der einzelnen Projekte berichteten in regelmäßigen Abständen der Projektleitung, sodass der Fortschritt kontrolliert und gegebenenfalls Maßnahmen ergriffen werden konnten, falls er nicht wie geplant verlief. Bei Bedarf wurden zu diesen Treffen der Geschäftsführer sowie Stakeholder hinzugezogen.

6.2.1 Bestimmung einer Digitalen Vision für das Produktionssystem

Mithilfe des Referenzmodells wurden für den Produktionsprozess, den Materialfluss sowie den Lagerprozess Zielzustände definiert. Alle Prozesse sollten einen durchgängigen Informationsfluss aufweisen, der durch eine automatisierte Produktionsplanung und -steuerung unterstützt werden sollte. Dadurch wurden im Produktionsprozess eine automatisierte Produktionsendmeldung, eine Identifikation von Materialien und Bauteilen im Materialfluss sowie derer Lagerorte ermöglicht (Abbildung 6-2 oben). Diese mittel- bis langfristigen Zielzustände wurden zu zwei konkreten Zielstellungen zusammengeführt und eine zugehörige zeitliche Begrenzung sowie ein Kostenrahmen festgelegt (Abbildung 6-2 unten).

Referenzmodell			
Technisch	Produktionsprozess	Materialfluss	Lagerprozess
Adaptiv			
Vorhersagend			
cyberfähig			
analysierend			
kommunikationsfähig	automatisierte Produktionsendmeldung	Identifikation von Materialien und Bauteilen	Identifikation von Lagerstand und Lagerort
analog			

Organisatorisch	Produktionsprozess	Materialfluss	Lagerprozess
Adaptiv			
Vorhersagend			
cyberfähig			
analysierend	automatisierte PPS	automatisierte PPS	
kommunikationsfähig	durchgängiger Informationsfluss	durchgängiger Materialfluss	durchgängiger Informationsfluss
analog			

Spezifizierung der Zielstellung			
Fragestellung	Spezifizierung		
Was soll erreicht werden?	1. Vernetzung bestehender Prozesse zur Verbesserung des Informationsflusses 2. Automatisierung von Teilprozessen	Qualität, Funktionalität, Umfang	1. Bei 100% der Vertriebsvorgänge soll automatisiert eine Lieferzeit angegeben werden können 2. Automatisierung von 75% der Produktionsendmeldung
Wann soll es erreicht werden?	1. langfristig 2. mittelfristig	zeitliche Begrenzung	1. 5 Jahre 2. 3 Jahre
Womit soll das erreicht werden?	Gesamt ca. 200.000 €	Kostenrahmen	1. 150.000 € 2. 50.000 €

Abbildung 6-2: Angewandtes Referenzmodell (oben), spezifizierte Zielstellung (unten) (eigene Darstellung)

6.2.2 Situationsanalyse im Produktionssystem mithilfe des entwickelten Reifegradmodells

Auf Basis der Ausgangssituation des mittelständischen Unternehmens wurde das Reifegradmodell zur Situationsanalyse im Produktionssystem angewandt. Der Digitalisierungsgrad betrug 1,1. Dieser Wert beschreibt ein Produktionssystem mit analogen Maschinen, Anlagen und Prozessen sowie einer papierbasierten Produktionsplanung und -steuerung. Weiterhin wurde für jeden Indikator im Reifegradmodell ein Zielzustand bestimmt, der mit den Ergebnissen des Referenzmodells übereinstimmt bzw. diese noch genauer spezifiziert. Der angestrebte Zielzustand des mittelständischen Unternehmens betrug 2,0. Das entspricht einem Produktionssystem, dessen Maschinen und Anlagen kommunikationsfähig sind und das somit Daten sammeln und austauschen kann.

Auch bei den Bereichen Produktionsprozess, Materialfluss und Lagerprozess war zu erkennen, dass ihr Istzustand der Reifegradstufe *analog* zugeordnet werden konnte (Abbildung 6-3). Den höchsten Digitalisierungsgrad wies der Produktionsprozess auf, den niedrigsten der Lagerprozess. Das Reifegradmodell vergleicht den Digitalisierungsgrad der angegebenen Kriterien und macht Empfehlungen zur Digitalisierung der Kriterien mit dem niedrigsten Digitalisierungsgrad. Basierend auf den Eingaben des mittelständischen Unternehmens wurde empfohlen, das Datenmanagement, die Lagerung sowie die Identifikation, die Steuerung und den Transport von Materialien genauer zu analysieren und digitalisieren. Dieses Ergebnis stimmte mit der Zielsetzung und den Ergebnissen des Referenzmodells überein.

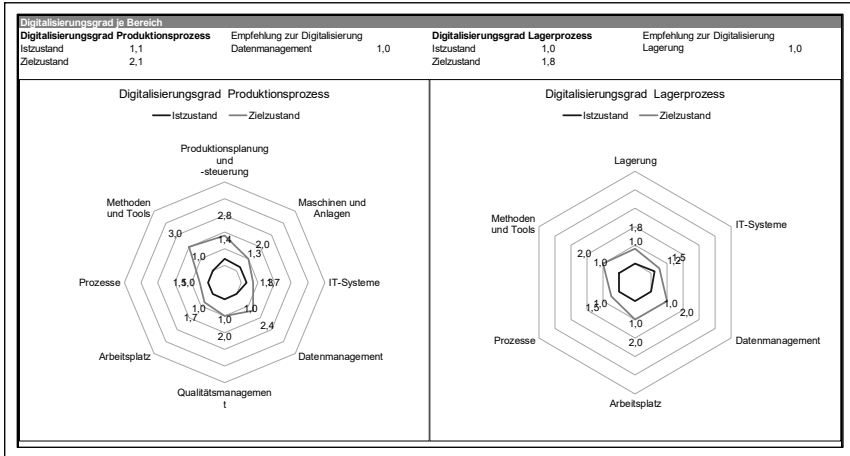


Abbildung 6-3: Ist- und Zielzustand des Produktionssystems (Auszug) (eigene Darstellung)

6.2.3 Definition konkreter Projektziele zur Digitalisierung des Produktionssystems

Basierend auf den Ergebnissen des Reifegradmodells definierte das mittelständische Unternehmen konkrete Ziele, die im Rahmen von Projekten erreicht werden sollten. Dazu wurden die zu digitalisierenden Kriterien genauer analysiert und diejenigen Indikatoren ausgewählt, die den niedrigsten Digitalisierungsgrad aufwiesen. Im Fall des mittelständischen Unternehmens wurden vier Indikatoren sowie ihre Ist- und Zielzustände identifiziert (Abbildung 6-4):

Zieldefinition									
	Indikator	Istzustand	Zielzustand	SMARTes Ziel	Muss- / Soll- / Kann-Ziel	Betroffene KPIs			
Ziel 1	Materialien sind eindeutig identifizierbar	Analog	Analysierend	Automatisierung von 75% der Produktionsendmeldung	Muss-Ziel	ATT	APT	CI	SQ
Ziel 2	Materialien sind rückverfolgbar	Analog	Analysierend	Automatisierung von 75% der Produktionsendmeldung	Muss-Ziel	ATT	APT	CI	SQ
Ziel 3	Daten werden kontextbezogen zur Verfügung gestellt	Analog	Kommunikationsfähig	Fehler im Prozess um 50% reduzieren	Muss-Ziel	APT	STT	AQT	BLT
Ziel 4	Vorkommissionierung	Analog	Kommunikationsfähig	Fehler im Prozess um 50% reduzieren	Soll-Ziel	CM	CI	FGI	RQ

Abbildung 6-4: Definition von Zielen und ihre Einordnung (eigene Darstellung)

Für jeden Indikator wurde ein SMARTes Ziel formuliert, das allerdings auch bei mehreren Indikatoren identisch sein kann. So beinhaltet bspw. die Automatisierung der Produktionsendmeldung die Identifikation und Rückverfolgbarkeit von Materialien. Im nächsten Schritt legte das mittelständische Unternehmen fest, ob es sich jeweils um ein Muss-, Soll- oder Kann-Ziel handelte. Diese Einordnung unterstützte die Priorisierung der Umsetzung von Projekten zur Zielerreichung. Im Fall des mittelständischen Unternehmens lag der Fokus im ersten Schritt auf der Automatisierung der Produktionsendmeldung sowie nachfolgend auf der Reduktion von Fehlern im Prozess. Kennzahlen, die durch diese SMARTen Ziele beeinflusst werden, waren u. a. die tatsächliche Transportzeit, die tatsächliche Produktionszeit und die Ausschussmenge.

Die SMARTen Ziele wurden anschließend in Projekte überführt und je Projekt wurde ein inkrementell auszufüllender Steckbrief erstellt.

Im Rahmen des Projekts wurden anschließend weitere zu digitalisierende Prozesse identifiziert und bewertet (Abbildung 6-5). Diese wurden gemäß ihrer Auftretenshäufigkeit, ihres Nutzens und ihres Aufwands evaluiert und in einem Diagramm visualisiert. Demnach spielte z. B. die Erstellung eines Online-Webshops für das mittelständische Unternehmen in Zukunft eine entscheidende Rolle: Dieser soll stündlich verwendet werden und weist einen mittleren Umsetzungsaufwand sowie hohen Nutzen für das Unternehmen auf. Der zukünftige Webshop wirkte sich auf das aktuelle Projekt aus, da dieses als Basis für den Webshop diente. Beide Vorhaben bauten auf einer gemeinsamen Datengrundlage auf.

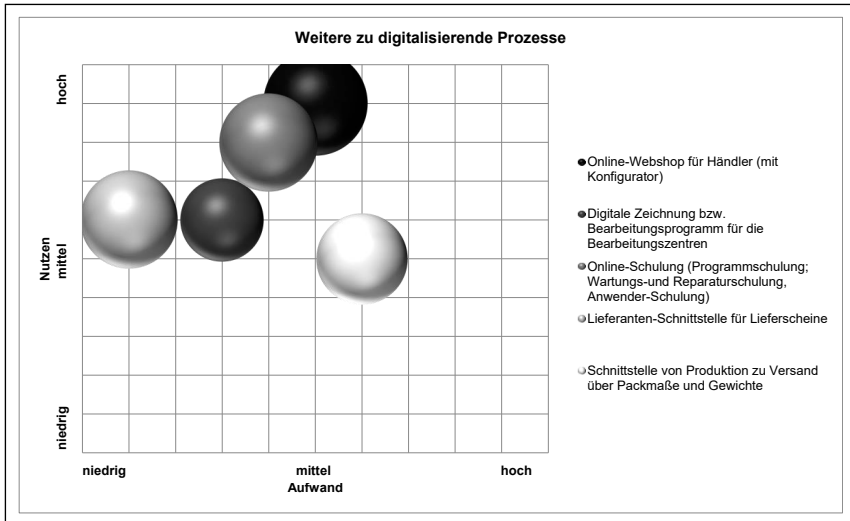


Abbildung 6-5: Weitere zu digitalisierende Prozesse im mittelständischen Unternehmen (eigene Darstellung)

Von der Projektdefinition und weiteren abhängigen Prozessen wurden Anforderungen an eine oder mehrere digitale Technologien abgeleitet: Das mittelständische Unternehmen definierte für das Projekt 13 Anforderungen und bewertete diese anhand der Faktoren Notwendigkeit, Wert und Risiko (Abbildung 6-6 oben). Diese Anforderungen wurden in einer Wert-Risiko-Matrix visualisiert (Abbildung 6-6 unten). Den höchsten Wert für das Unternehmen wiesen u. a. die Anforderungen ‚ERP-System als Grundlage‘ sowie ‚Nachverfolgung und Identifikation von (Teil-) Produkten‘ auf. Das höchste Risiko stellte demgegenüber die Anforderung ‚Transparenz bzgl. Informationen‘ für das Unternehmen dar, da hierbei Gesetze und Regelungen hinsichtlich des Datenschutzes berücksichtigt werden mussten.

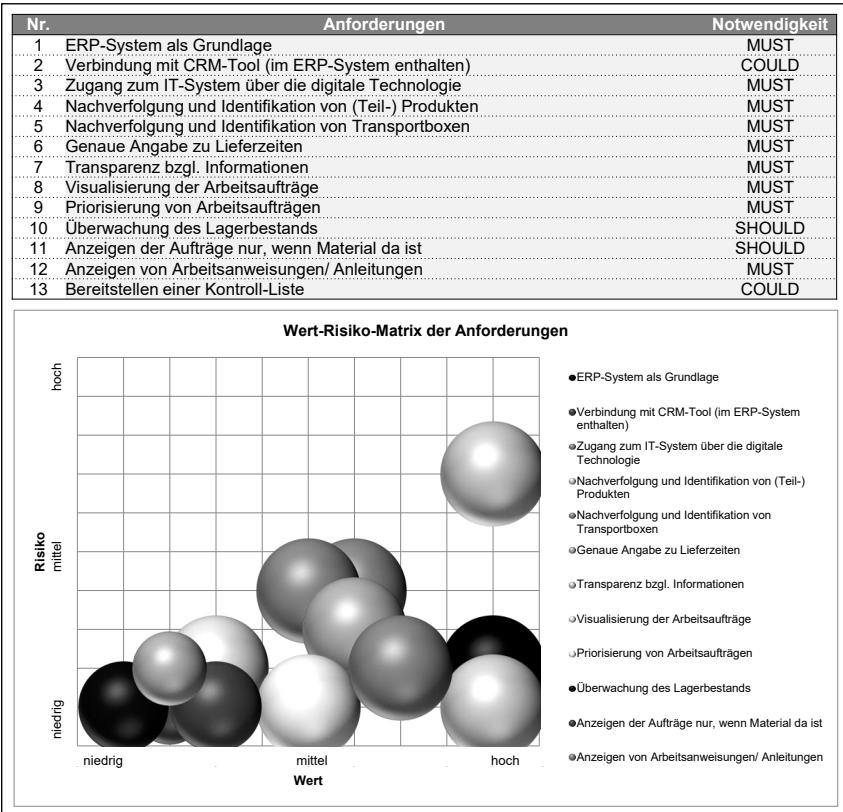


Abbildung 6-6: Definierte Anforderungen (oben) und Visualisierung anhand einer Wert-Risiko-Matrix (unten) (eigene Darstellung)

6.2.4 Planung der einzelnen Umsetzungsprojekte

Im Rahmen der Umsetzungsplanung werden eine oder mehrere geeignete digitale Technologien ausgewählt. Das mittelständische Unternehmen hatte dazu digitale Technologien zusammengetragen und diese in einem Technologieradar visualisiert (Abbildung 6-7). Der Technologieradar kann beliebig um weitere digitale Technologien erweitert werden. Die Technologien wurden gemäß den Technologiekategorien, dem Reifegrad und den Ebenen im Produktionssystem definiert. Des Weiteren erfolgte eine ausführliche Beschreibung jeder einzelnen digitalen Technologie im Rahmen von Steckbriefen.

Ausgewählte digitale Technologie	Technologiekategorie	Begründung
Handscanner	Track and Trace	Handscanner mit integriertem Bildschirm
WLAN	Kommunikation und Vernetzung / M2M	automatisierte Übertragung der Daten
Barcode	Track and Trace	anwendbar auf Transportkisten; RFID hat hierbei Interferenzen

Abbildung 6-8: Ausgewählte digitale Technologien (eigene Darstellung)

Im nächsten Schritt erfolgte die Aufgaben- und Zeitplanung des Projekts (Abbildung 6-9). Hierbei legte das Unternehmen 29 Aufgaben fest und definierte für jede dieser Aufgaben eine verantwortliche Person. Zudem wurde jeweils ein Bearbeitungszeitraum mit Start- und Enddatum festgelegt, die in einem Gantt-Diagramm visualisiert wurden. Mithilfe des Status konnte der Fortschritt der einzelnen Aufgaben angezeigt und überprüft werden. Das Projekt hatte demnach eine geplante Laufzeit von zwei Jahren.

Aufgaben und Zeitplanung							
Nr.	Aufgabe	Verantwortlicher	Startdatum	Dauer	Enddatum	Status	Fortschritt (Tage)
			01.04.2018	729	30.03.2020	0%	0
1	Scanner definieren	Unternehmenspartner	02.04.2018	14	16.04.2018		0
2	Artikelstammpflege	Student	02.04.2018	532	16.09.2019		0
3	Stücklisten und Arbeitsplan pflegen	Student	01.05.2018	517	30.09.2019		0
4	Barcode definieren	B. C.	17.04.2018	17	04.05.2018		0
5	Schnittstellen definieren	Unternehmenspartner	28.05.2018	17	14.06.2018		0
.
.
26	Anpassung durch Feedback	Unternehmenspartner	01.04.2019	37	08.05.2019		0
27	Lagerberichtigung Intern / Extern	F. B.	09.05.2019	28	06.06.2019		0
28	Anwenderschulung in Klein- und Funktionsgruppen	B. C.	07.06.2019	19	26.06.2019		0
29	Projektdokumentation	F. B.	01.10.2019	181	30.03.2020		0
						Fortschritt Gesamt	0%

Abbildung 6-9: Aufgaben- und Zeitplanung (Auszug) (eigene Darstellung)

Den Abschluss der Umsetzungsplanung bildet die Risikoanalyse. Dabei identifizierte das Unternehmen verschiedene Risiken:

- Technik-Risiken, u. a.: definierte Schnittstellen sind nicht umsetzbar; ausgewählte Technologien halten nicht den Umgebungsbedingungen stand; Technik verlangsamt Prozesse
- Termin-Risiken, u. a.: saisonale Auslastung führt zu Projektverzug; Beschaffung und Installation von Hardware dauert länger als geplant; Aufwand für Materialstamm- und Stücklistenpflege unterschätzt
- Kosten- bzw. Qualitätsrisiken, u. a.: zusätzliche nachgelagerte Prozesse entstehen (z. B. im Backoffice); fehlende Kompetenz bezüglich ERP-System im Haus; Mehrkosten durch Fabriklayout

Die identifizierten Risiken wurden anschließend hinsichtlich ihrer Auftretenswahrscheinlichkeiten und Auswirkungen bewertet. Dabei wurde besonders das Risiko ‚Aufwand für Materialstamm- und Stücklistenpflege unterschätzt‘ als bedeutend eingestuft. Als Risikominderungsmaßnahme wurde diesbezüglich eine Priorisierungsliste für die Stücklisten und Stammdatenerstellung festgelegt.

6.2.5 Realisierung und Monitoring der Umsetzungsprojekte

Während der Realisierung nutzte das mittelständische Unternehmen eine Statusabfrage, um anhand dieser einmal im Monat den aktuellen Umsetzungsstand zu diskutieren und dokumentieren. Weiterhin wurde die Meilensteintrendanalyse genutzt, um den Fortschritt des Projekts messbar zu prüfen und gegebenenfalls Maßnahmen zu ergreifen, wenn die Meilensteine sich zeitlich verschieben (Abbildung 6-10). Für das mittelständische Unternehmen zeichnete sich eine Verschiebung zweier Meilensteine ab: Zum einen wurde das GO-Live, also das erstmalige Verwenden des implementierten Systems zu Testzwecken, um einen Monat nach hinten verschoben. Zum anderen verzögerte sich die Inbetriebnahme der implementierten digitalen Technologien. Für beide Fälle wurden Maßnahmen definiert und ergriffen, um weitere Verzögerungen zu minimieren.

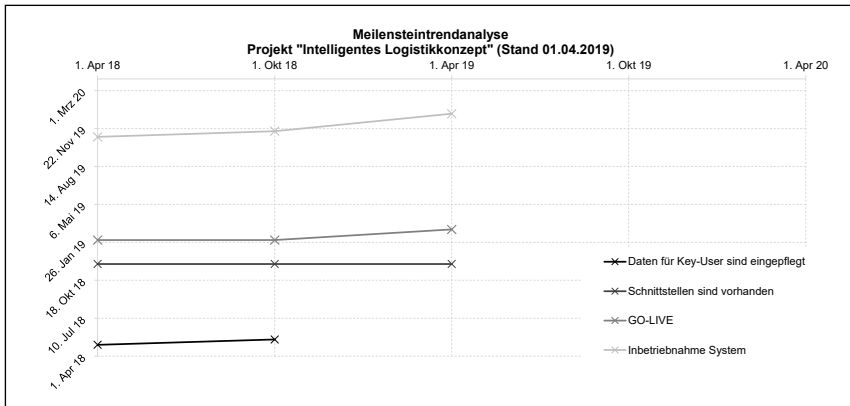


Abbildung 6-10: Meilensteintrendanalyse zum Stand 01.04.2019 (eigene Darstellung)

Zusätzlich zum Monitoring des zeitlichen Projektverlaufs wurde der Umsetzungsstand der einzelnen Aufgaben überwacht. Dazu setzte das mittelständische Unternehmen ein Zielkontrollblatt ein und definierte für einzelne Aufgaben Kennzahlen sowie einen Zielwert. So sollen bspw. 100 % der Stücklisten und Arbeitspläne gepflegt werden. Der Ausgangspunkt lag bei ca. 20 %. Der Fortschritt wurde zu definierten Betrachtungszeitpunkten geprüft; z. B. war die Pflege von Stücklisten und Arbeitsplänen am ersten April 2019 auf 70 % fortgeschritten. Bei zu starken Abweichungen sowie Auswirkungen auf den Zeitplan wurden Gegenmaßnahmen ergriffen.

6.2.6 Prüfung der Zielerreichung hinsichtlich der Projektziele und der Digitalen Vision

In der letzten Phase des Projekts wurde die Zielerreichung geprüft. Dabei wurde zunächst die Erfüllung der Anforderungen evaluiert. Das mittelständische Unternehmen hatte den Großteil

der Anforderungen umsetzen können, so z. B., dass das ERP-System als Grundlage für die ausgewählten digitalen Technologien diene sowie dass die Arbeitsaufträge an jeder Arbeitsstation visualisiert wurden (Abbildung 6-11). Jedoch wurde auch festgestellt, dass nicht alle Anforderungen erfüllt werden konnten: Die implementierten digitalen Technologien etwa sind noch nicht in der Lage, die Arbeitsaufträge automatisiert zu priorisieren. Dies soll vorerst über ein Display mit einer Auftragsliste und weiteren Informationen als Entscheidungsgrundlage ausgeglichen werden. In weiteren Projekten soll die Anforderung dann erfüllt werden.

Nr.	Anforderungen	Bewertung					Begründung / Umsetzungspläne
	Anforderung	nicht erfüllt	in geringem Umfang erfüllt	teilweise erfüllt	größtenteils erfüllt	vollständig erfüllt	
1	ERP-System als Grundlage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Zentrales Terminal in Montage als Option für zusätzliche Informationen
2	Verbindung mit CRM-Tool (im ERP-System enthalten)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	Zugang zum IT-System über die digitale Technologie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	Nachverfolgung und Identifikation von (Teil-) Produkten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Information über Lagerort/Kommissionierung bereitstellen -> nicht nur über Endmeldung
5	Nachverfolgung und Identifikation von Transportboxen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	Genaue Angabe zu Lieferzeiten	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	Transparenz bzgl. Informationen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	Visualisierung der Arbeitsaufträge	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
9	Priorisierung von Arbeitsaufträgen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Display mit Auftragsliste und gegebenenfalls weiteren Informationen
10	Überwachung des Lagerbestands	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11	Anzeigen der Aufträge nur, wenn Material da ist	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
12	Anzeigen von Arbeitsanweisungen/Anleitungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
13	Bereitstellen einer Kontroll-Liste	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Abbildung 6-11: Prüfung der Anforderungen (eigene Darstellung)

Im nächsten Schritt wurden der Aufgaben- und Zeitplan sowie die Risikoanalyse geprüft. Im Rahmen der Aufgaben- und Zeitplanung konnte das mittelständische Unternehmen feststellen, dass der erarbeitete Zeitplan eingehalten wurde und die Aufgaben vollständig waren. Allerdings hatte der geplante Zeitrahmen einzelner Aufgaben nicht mit der tatsächlich benötigten Zeit übereingestimmt. Das lag darin begründet, dass parallele Projekte zu Kapazitätsengpässen bei Mitarbeitern führten. Dies führte wiederum dazu, dass Tätigkeiten und Ressourcen mehrfach neudefiniert werden mussten. Die Prüfung der Risikoanalyse ergab, dass drei Risiken eingetreten sind: (1) Saisonale Auslastung führt zu Projektverzug, (2) Beschaffung und Installation von Hardware dauert länger als geplant und (3) Aufwand für Materialstamm- und Stücklistenpflege unterschätzt. Als Maßnahmen wurden u. a. neue Mitarbeiter eingestellt, studentische Arbeiten vergeben, eine Priorisierungsliste für die Datenpflege erarbeitet sowie der Hersteller zur Beschaffung der Hardware gewechselt.

Die Projektzielerreichung wurde ebenfalls durch das mittelständische Unternehmen evaluiert (Abbildung 6-12). Das Unternehmen konnte demnach im definierten Projekt alle Ziele umsetzen, auch wenn nicht alle festgelegten Anforderungen vollständig erfüllt wurden. Die vollständige Erfüllung der Anforderungen erfolgte im Rahmen nachgelagerter Projekte.

Um das Projekt zu beenden, nahm das Unternehmen schließlich die Lessons Learned auf. Positiv wurden u. a. die Verbesserung der Kommunikation zwischen Produktion und Vertrieb sowie die schnelle Sichtbarkeit geringfügiger Veränderungen und die damit verbundene Erleich-

terung der Arbeit hervorgehoben. Verbesserungspotenziale sah das Unternehmen demgegenüber in den Bereichen der Kapazitäts- und Ressourcenplanung, bei denen während der Umsetzung Mitarbeiter gefehlt haben. Die Lessons Learned wurden dokumentiert und sollen bei der Implementierung neuer Projekte berücksichtigt werden.

Zieldefinition						Ziel erreicht? (Ja/Nein)	Begründung, warum das Ziel nicht erreicht wurde
Indikator	Ist-zustand	Zielzustand	SMARTes Ziel	Muss- / Soll- / Kann-Ziel			
Ziel 1	Materialien sind eindeutig identifizierbar	Analog	Analysierend	Automatisierung von 75% der Produktionsendmeldung	Muss-Ziel	Ja	
Ziel 2	Materialien sind rückverfolgbar	Analog	Analysierend	Automatisierung von 75% der Produktionsendmeldung	Muss-Ziel	Ja	
Ziel 3	Daten werden kontextbezogen zur Verfügung gestellt	Analog	Kommunikationsfähig	Fehler im Prozess um 50% reduzieren	Muss-Ziel	Ja	
Ziel 4	Vorkommissionierung	Analog	Kommunikationsfähig	Fehler im Prozess um 50% reduzieren	Soll-Ziel	Ja	

Abbildung 6-12: Prüfung der Projektzielerreichung (eigene Darstellung)

Nach Abschluss des Projekts überprüfte das Unternehmen die Erreichung der gesetzten Digitalen Vision. Hierfür wurde das Reifegradmodell ein weiteres Mal angewandt, um den alten Istzustand, den geplanten Zielzustand und den neuen Istzustand in Radardiagrammen gegenüberzustellen. Im Zuge des durchgeführten Projekts konnte das mittelständische Unternehmen den gesamten Digitalisierungsgrad seines Produktionssystems von 1,1 auf 1,6 erhöhen und damit dem geplanten Zielzustand von 2,0 näherkommen. Auch hier konnten weitere Handlungsbedarfe abgeleitet werden; z. B. kann das Datenmanagement stärker fokussiert werden.

Im letzten Schritt wurde die spezifizizierte Zielstellung der Digitalen Vision auf ihre Erreichung geprüft (Abbildung 6-13). Das mittelständische Unternehmen hatte das Zielbild der Automatisierung von 75 % der Produktionsendmeldungen bereits erreicht. Das zweite Zielbild der vollständigen Automatisierung von Vertriebsvorgängen zur Angabe von Lieferzeiten wurde hingegen noch nicht umgesetzt: Die entsprechenden Projekte befinden sich aktuell in der Implementierung bzw. müssen noch definiert werden.

Fragestellung		Spezifizierung		Prüfung Zielerreichung	
Was soll erreicht werden?	1. Vernetzung bestehender Prozesse zur Verbesserung des Informationsflusses 2. Automatisierung von Teilprozessen	Qualität, Funktionalität, Umfang	1. Bei 100% der Vertriebsvorgänge soll automatisiert eine Lieferzeit angegeben werden können 2. Automatisierung von 75% der Produktionsendmeldung	Wurden die Qualität, Funktionalität und Umfang erreicht?	1. Nein 2. Ja
Wann soll es erreicht werden?	1. Langfristig 2. Mittelfristig	zeitliche Begrenzung	1. 5 Jahre 2. 3 Jahre	Wird der Zeitrahmen eingehalten?	1. Projekte laufen noch 2. Ja
Womit soll das erreicht werden?	Gesamt ca. 200.000 €	Kostenrahmen	1. 150.000 € 2. 50.000 €	Wird der Kostenrahmen eingehalten?	1. Projekte laufen noch 2. Ja

Abbildung 6-13: Prüfung der Erreichung der Digitalen Vision bzw. des Zielbilds (eigene Darstellung)

6.3 Erkenntnisse aus der Validierung

Aus dem Anwendungsbeispiel lassen sich zusammenfassend folgende Erkenntnisse festhalten:

- ❑ Eine festgelegte Vorgehensweise zur Digitalisierung des Produktionssystems unterstützt KMU bei der Umsetzung und wirkt den Herausforderungen entgegen, denen sich KMU stellen müssen.
- ❑ Durch bekannte Werkzeuge und Methoden des Projektmanagements sowie deren zielgerichteten Einsatz ist das Transformationskonzept mit wenig Aufwand direkt anwendbar und erleichtert die Operationalisierung der notwendigen Aufgaben.
- ❑ Das Referenzmodell ermöglicht KMU die Definition einer mittel- bis langfristigen Digitalen Vision, indem Zielzustände für den Produktionsprozess, Materialfluss und Lagerprozess unter Berücksichtigung technischer sowie organisatorischer Aspekte festgelegt werden.
- ❑ Durch den Einsatz eines Referenzmodells, eines Reifegradmodells zur Bewertung des Digitalisierungsgrads sowie die Verwendung von Kennzahlen können die Digitalisierung gesteuert und ihre Auswirkungen präziser eingeschätzt werden. So wird eine zielgerichtete Digitalisierung des Produktionssystems ermöglicht.
- ❑ Eine Abwicklung paralleler Digitalisierungsprojekte kann anhand der Projektdefinition erreicht werden. Durch eine Zusammenfassung ähnlicher Digitalisierungsvorhaben können Projekte schneller definiert und umgesetzt werden. Dies erhöht die Effizienz der Digitalisierung des Produktionssystems.
- ❑ Mithilfe einer festgelegten Vorgehensweise sowie regelmäßigen Statusabfragen der laufenden Projekte wird die Transparenz bezüglich der verschiedenen Digitalisierungsvorhaben unterstützt. Dadurch ist ein regelmäßiger Informationsaustausch zwischen allen Beteiligten gewährleistet, der wiederum die Akzeptanz der Mitarbeiter bezüglich der Digitalisierungsvorhaben sowie der implementierten digitalen Technologien erhöht.
- ❑ Die Prüfung der Erreichung der Projektziele sowie der Digitalen Vision ermöglicht den Aufbau einer Wissensbasis für die Umsetzung von Digitalisierungsvorhaben. Dies erleichtert die Umsetzung zukünftiger Projekte und führt zu einer Vermeidung wiederholter Fehler.

Durch die Verwendung des Transformationskonzepts anhand des Anwendungsbeispiels kann dessen erfolgreiche Anwendung bestätigt werden. Das Transformationskonzept unterstützt somit die zielgerichtete Digitalisierung der Produktionssysteme in KMU unter Berücksichtigung einer gezielten Technologieauswahl sowie unter Verwendung von Kennzahlen und erfüllt dadurch die gestellten Anforderungen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Digitalisierung ermöglicht flexible und intelligente Produktionssysteme, die die Wettbewerbsfähigkeit von KMU nachhaltig sichern können. Produzierende KMU können davon zwar profitieren, werden jedoch auf dem Weg zur Digitalisierung von Produktionssystemen mit verschiedenen Herausforderungen konfrontiert, die eine systematische Herangehensweise zur Umsetzung der Digitalisierung erfordern, um einen nachhaltigen Mehrwert generieren zu können. Das im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Transformationskonzept unterstützt KMU bei der zielgerichteten Digitalisierung ihrer Produktionssysteme. Es fokussiert Produktionsprozesse, den Materialfluss sowie Lagerprozesse und berücksichtigt dabei technische und organisatorische Herausforderungen für KMU. Weiterhin werden der individuelle Digitalisierungsgrad betrachtet, die Identifikation und zielgerichtete Implementierung geeigneter digitaler Technologien unterstützt sowie der Erfolg der umgesetzten Digitalisierung durch die Berechnung definierter Kennzahlen messbar gemacht. Das Vorgehen zur Anwendung des entwickelten Transformationskonzepts besteht dabei aus sechs Phasen: (1) Ermittlung der Digitalen Vision, (2) Situationsanalyse, (3) Definition der Projektziele, (4) Umsetzungsplanung, (5) Realisierung und Steuerung sowie (6) Prüfung der Zielerreichung.

Zur Definition einer **Digitalen Vision** für Produktionssysteme in KMU bzw. die Bereiche Produktionsprozess, Materialfluss und Lagerprozess wird ein Referenzmodell als Orientierungshilfe verwendet (Kapitel 4.2). Technische und organisatorische Aspekte (z. B. IT-Systeme oder Datenmanagement) können den Bereichen sowie den sechs Ebenen des Referenzmodells zugeordnet werden: (1) analog, (2) kommunikationsfähig, (3) analysierend, (4) cyberfähig, (5) vorhersagend und (6) adaptiv. Basierend auf diesem Referenzmodell wird eine Digitale Vision ermittelt, die anschließend genauer spezifiziert wird. Die zur Digitalen Vision zugehörige mittel- bis langfristige Zielstellung wird hinsichtlich ihrer Qualität, ihrer Funktionalität und ihres Umfangs genauer beschrieben. Abschließend werden ein zeitlicher sowie ein erster Kostenrahmen im Sinne eines Budgets festgelegt, das nicht überschritten werden soll.

Zur Durchführung der **Situationsanalyse** in der zweiten Phase des Transformationskonzepts wird ein Reifegradmodell angewandt, das ebenfalls im Rahmen der vorliegenden Dissertation erarbeitet wurde, um mit dessen Hilfe den aktuellen Digitalisierungsgrad in einem Produktionssystem bestimmen zu können (Kapitel 4.3). Dieser Digitalisierungsgrad wird je nach Betrachtungsgegenstand sowohl für das gesamte Produktionssystem als auch für einzelne Bereiche ermittelt. Das Reifegradmodell umfasst eine Vielzahl Indikatoren, die verschiedenen Dimensionen der Digitalisierung zugeordnet sind. Jeder Indikator wiederum weist mehrere Ausprägungen auf, die den unterschiedlichen Grad der Umsetzung der Digitalisierung innerhalb der jeweiligen Dimension widerspiegeln. Mithilfe der Indikatoren wird dabei nicht nur der Istzustand des Betrachtungsgegenstands hinsichtlich der Digitalisierung bestimmt, sondern zusätzlich ein Zielzustand für jeden Indikator im Reifegradmodell festgelegt, um ebenfalls einen konkreten Zielzustand zu formulieren. Mittels einer erneuten Anwendung des Reifegradmodells kann der gesetzte Zielzustand mit dem erreichten neuen Istzustand verglichen werden, wodurch die Auswirkungen der Digitalisierung identifiziert werden. Die aus der Bestimmung von Ist- und Zielzustand resultierenden Digitalisierungsgrade können bspw. in Radardiagrammen visualisiert werden, die einen schnellen Vergleich zwischen den Bereichen Produktionsprozess, Materialfluss und Lagerprozess sowie zwischen Ist- und Zielzustand ermöglichen.

Dadurch können die Defizite des Produktionssystems in Bezug auf die Digitalisierung anschaulich identifiziert werden.

Anhand der Digitalen Vision und der Ergebnisse der Anwendung des Reifegradmodells können in der dritten Phase des Transformationskonzepts Umsetzungsprojekte festgelegt werden (Kapitel 4.4). Dabei werden zunächst konkrete **Projektziele definiert**, die sich aus den Defiziten des analysierten Produktionssystems hinsichtlich der Digitalisierung ergeben. Diese Ziele werden erst SMART formuliert und anschließend priorisiert. Weiterhin werden betroffene Kennzahlen identifiziert, um durch eine regelmäßige Prüfung der sich verändernden Kennzahlen eine zielgerichtete Realisierung und Steuerung der Projekte gewährleisten zu können. Nach der Ausformulierung der Projektziele wird für jedes Projekt ein Projektsteckbrief erstellt, der im Verlauf des Transformationskonzepts inkrementell ausgefüllt wird. Der Projektsteckbrief trägt dazu bei, die wesentlichen Projektdaten übersichtlich darzustellen, und schafft dadurch ein gemeinsames Verständnis aller Projektmitarbeiter. Im Rahmen der verschiedenen Umsetzungsprojekte werden weitere zu digitalisierende Prozesse identifiziert, die das jeweilige Projekt beeinflussen oder durch dieses beeinflusst werden können. Anschließend werden die identifizierten Prozesse bewertet und mithilfe einer Nutzen-Aufwand-Matrix visualisiert. Die Matrix zeigt auf, welche weiteren zu digitalisierenden Prozesse bereits im aktuellen Projekt mitberücksichtigt bzw. welche zugehörigen Schnittstellen geschaffen werden sollten. Im nächsten Schritt werden Anforderungen an eine oder mehrere digitale Technologien formuliert, sodass Technologien, die die Anforderungen erfüllen, dazu geeignet sind, die Zielstellung des jeweiligen Projekts erfüllen zu können und dabei die zuvor identifizierten weiter zu digitalisierenden Prozesse zu berücksichtigen. Die potenzielle Erfüllung der Anforderungen hinsichtlich ihrer Notwendigkeit (*MUST*, *SHOULD*, *COULD* und *WON'T*), ihres Mehrwerts zur Zielerreichung und ihres Umsetzungsrisikos werden bewertet und in einer Wert-Risiko-Matrix visualisiert. Dadurch lassen sich die Anforderungen bezüglich ihrer Relevanz im Rahmen des Umsetzungsprojekts priorisieren.

In der vierten Phase, der **Umsetzungsplanung**, werden potenziell zur Erfüllung der Anforderungen geeignete digitale Technologien ermittelt und ausgewählt (Kapitel 4.5). Zunächst werden dazu digitale Technologien recherchiert und hinsichtlich verschiedener Technologiekategorien (z. B. Kommunikation und Vernetzung, Assistenzsysteme) in einem Technologieradar abgebildet. Die digitalen Technologien werden weiterhin nach dem Technologiereifegrad (embryonische Technologie, Schrittmacher-, Schlüssel- und Basistechnologie) der Anwendungsebene kategorisiert, in der sie im Produktionssystem eingesetzt werden können (Maschinenebene, Produktionssystemebene und Infrastrukturebene). Mithilfe der zuvor definierten Anforderungen und anhand der Technologiekategorien, können die digitalen Technologien eingegrenzt und anschließend eine erste Auswahl potenziell zur Anforderungserfüllung geeigneter digitaler Technologien getroffen werden. Um diese Auswahl weiter eingrenzen zu können, werden im nächsten Schritt Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den ausgewählten sowie den im Produktionssystem existierenden digitalen Technologien bestimmt. Digitale Technologien, deren Wechselwirkungen mit den bereits bestehenden Technologien zu negativen Effekten führen, werden ebenfalls aus der Auswahl ausgeschlossen. Zudem werden die relevanten digitalen Technologien jedem im Projekt definierten Prozessschritt zugeordnet. Die Analyse der Zusammenhänge und Wechselwirkungen ermöglicht eine Priorisierung und damit eine Auswahl einer oder mehrerer digitaler Technologien, durch die das jeweilige Projektziel

erreicht werden kann. Im Rahmen der eigentlichen Umsetzungsplanung wird daraufhin ein Aufgaben- und Zeitplan je Umsetzungsprojekt erstellt sowie in einem Gantt-Diagramm visualisiert. Weiterhin werden die Projektsteckbriefe vollständig ausgefüllt, indem u. a. Meilensteine und das zur Verfügung stehende Projektbudget ergänzt werden. Im letzten Schritt wird eine Risikoanalyse durchgeführt, um Risiken zu identifizieren, die den Projektverlauf verzögern oder dessen Umsetzung sogar unmöglich machen könnten. Für Risiken mit einer hohen Auftretenswahrscheinlichkeit und einer potenziell starken Auswirkung auf den Projekterfolg werden Risikominderungsmaßnahmen definiert.

Die fünfte Phase des Transformationskonzepts beginnt mit der **Realisierung** der verschiedenen Umsetzungsprojekte. Sie erfolgt idealerweise zunächst im Rahmen einer Pilotanwendung, bevor ein Rollout auf weitere Bereiche des Produktionssystems stattfindet (Kapitel 4.6). Um den Fortschritt der Realisierung zu prüfen, werden regelmäßige Absprachen mit dem Projektteam durchgeführt, sodass der Projektstatus allen Beteiligten bekannt ist und inhaltlich diskutiert werden kann. Eine zeitliche **Steuerung** des Projekts wird mithilfe einer Meilensteintrendanalyse vorgenommen. Anhand eines Zielkontrollblatts wird die Erfüllung der im Aufgaben- und Zeitplan definierten Aufgaben mit geeigneten Kennzahlen in regelmäßigen Zeitabständen geprüft. Durch diese Evaluierung können bei einer Abweichung vom Zeit- oder Aufgabenplan zeitnah Gegenmaßnahmen definiert und umgesetzt werden.

In der letzten Phase des Transformationskonzepts wird die **Zielerreichung** der einzelnen Umsetzungsprojekte als auch die Zielerreichung hinsichtlich der Digitalen Vision bzw. des Zielbilds geprüft (Kapitel 4.7). Für die Prüfung der Erreichung der Projektziele werden die Anforderungen und der Zeitplan evaluiert. Anschließend wird die Erreichung der Projektziele nochmals genauer betrachtet, um den Erfolg des Projekts bestimmen zu können. Werden Ziele nicht erreicht, so muss die Ursache dafür ergründet und dokumentiert werden, um zukünftig daraus lernen zu können. Im Rahmen eines Workshops zum Projektabschluss werden die Lessons Learned identifiziert und festgehalten. Nach dem Abschluss eines oder mehrerer Umsetzungsprojekte werden deren Auswirkungen auf die Erreichung des Zielbilds bzw. das Zielbild selbst geprüft. Hierfür wird das Reifegradmodell erneut angewandt und mit den Werten vor Projektbeginn verglichen. Darüber hinaus wird die spezifizizierte Zielstellung der Digitalen Vision evaluiert.

Das gesamte Transformationskonzept wurde in Excel in Form des sog. ‚*Digital Transformation Tool*‘ **softwaretechnisch umgesetzt**, sodass KMU, die das Konzept anwenden möchten, schrittweise durch das Transformationskonzept geführt werden können, um das Ziel der Digitalisierung eines Produktionssystems zu erreichen (Kapitel 5). Durch die Eingabe von (individuellen) Daten in eine Eingabemaske mit einer vorgegebenen und einheitlichen Struktur wird darüber hinaus eine Vergleichbarkeit zwischen mehreren Projekten ermöglicht. Die automatisierte Weitergabe eingegebener Daten vereinfacht z. B. die Prüfung der Zielerreichung und somit die Anwendung des ‚*Digital Transformation Tool*‘, da entsprechende Daten nicht mehrmals eingegeben werden müssen. Zur Übersichtlichkeit und zum Verständnis werden die spezifizierte Zielstellung der Digitalen Vision sowie die Ergebnisse aus dem Reifegradmodell und dem Technologieradar softwaretechnisch visualisiert. Diese Eigenschaften des ‚*Digital Transformation Tool*‘ bedingen eine leichte und intuitive Bedienbarkeit, durch die die Akzeptanz der Mitarbeiter für das Tool gesteigert wird.

Das Transformationskonzept wurde anhand eines realen **Anwendungsbeispiels** aus dem Verbundforschungsprojekt InAsPro [Auri20] angewandt und dabei validiert. Das mittelständische Unternehmen, das als Anwendungsbeispiel genutzt wurde, produziert Geräte für die ökologische Bodenbearbeitung im Wein- und Obstbau. Das im Rahmen der Anwendung des Transformationskonzepts ermittelte Digitalisierungsziel des Unternehmens bestand darin, die Produktivität im Produktionssystem zu erhöhen, indem ein auf digitalen Technologien basierendes intelligentes Logistikkonzept umgesetzt wird. Dies wurde durch eine automatisierte Produktionsendmeldung realisiert. Dabei wurden zwei Teilziele verfolgt: (1) Materialien sind eindeutig identifizier- und rückverfolgbar und (2) Daten werden kontextbezogen zur Verfügung gestellt. Das Anwendungsbeispiel zeigt, dass das Transformationskonzept die zielgerichtete Digitalisierung eines Produktionssystems von KMU unter Berücksichtigung einer gezielten Technologieauswahl sowie unter Verwendung von Kennzahlen unterstützt und somit die an das Konzept gestellten Anforderungen erfüllt.

Ausgehend von der Konzeptentwicklung und den Ergebnissen der Validierung ergeben sich weitere **Forschungsbedarfe**:

- ❑ Im Transformationskonzept werden die Bereiche Produktionsprozess, Materialfluss und Lagerprozess fokussiert. Zur gezielteren Digitalisierung kann der Produktionsprozess in Montage und Fertigung unterteilt werden, da hier aufgrund der unterschiedlichen Bearbeitungsschritte unterschiedliche Anforderungen zugrunde gelegt werden sollten.
- ❑ Für eine ganzheitliche Digitalisierung von Produktionssystemen ist die ergänzende Betrachtung des Aspekts Mensch notwendig. In dieser Dissertation wurde dies bewusst ausgeklammert. Hierbei sind eine durchgängige Kommunikation, Schulungsbedarfe sowie die Akzeptanz der Mitarbeiter z. B. hinsichtlich neuer digitaler Technologien oder sich verändernder Prozesse und Aufgaben von signifikanter Bedeutung.
- ❑ Zur Realisierung und Steuerung von Projekten sind in Unternehmen teilweise bereits Projektmanagementmethoden vorhanden. Dementsprechend müssten das Transformationskonzept und das zugehörige Excel-Tool so angepasst werden, dass Methoden und Werkzeuge des Projektmanagements individuell ausgewählt und zusammengestellt werden können. Dies kann bspw. mithilfe einer neu zu entwickelnden und in das Transformationskonzept einzupassenden Methodenbibliothek umgesetzt werden, die auf die Bedürfnisse von KMU zugeschnitten ist.
- ❑ Das Transformationskonzept berücksichtigt lediglich ausgewählte technische und organisatorische Herausforderungen der KMU, wie das Bereitstellen eines methodischen Ansatzes zur Digitalisierung oder die zielgerichtete Auswahl geeigneter digitaler Technologien. Das Konzept kann zum einen durch weitere technische und organisatorische Herausforderungen erweitert werden, etwa die IT-Sicherheit oder die Entwicklung eines allgemeingültigen Berechtigungskonzepts. Zum anderen können auch wirtschaftliche oder kulturelle Herausforderungen ergänzend fokussiert werden: Das Transformationskonzept kann demnach z. B. eine Wirtschaftlichkeitsrechnung für die Implementierung digitaler Technologien oder die Ausgestaltung einer digitalen Unternehmenskultur ermöglichen.
- ❑ Das Transformationskonzept betrifft Produktionssysteme in KMU. Es kann allerdings so erweitert werden, dass der Fokus auf einer ganzheitlichen Digitalisierung des gesamten Un-

ternehmens liegt. Somit können weitere Unternehmensbereiche wie die Produktentwicklung oder der Aftersales-Bereich integriert werden. Dazu müssten u.a. das Referenzmodell sowie das Reifegradmodell entsprechend erweitert werden.

Anhand der Ergänzung des entwickelten Transformationskonzepts zur Digitalisierung des Produktionssystems von KMU um die genannten Ergebnisse werden weitere Nutzenpotenziale erwartet. Dadurch könnte die Digitalisierung der Produktionssysteme in KMU noch zielgerichteter und ganzheitlicher unterstützt werden.

8 Quellenverzeichnis

- [Abel17] J. Abel, P.S. Wagner: Industrie 4.0: Mitarbeiterqualifizierung in KMU. wt Werkstattstechnik online 3 (2017): S. 134-140.
- [Achi14] P. Achimugu, A. Selamat, R. Ibrahim, M.N. Mahrin: A systematic literature review of software requirements prioritization research. *Information and Software Technology* 56/6 (2014): S. 568-585.
- [Adol15] P. Adolphs et al.: Statusreport - Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0). Düsseldorf, Frankfurt am Main, 2015.
- [Ahma17] K.S. Ahmad, N. Ahmad, H. Tahir, S. Khan: Fuzzy_MoSCoW: A fuzzy based MoSCoW method for the prioritization of software requirements. 2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT-2017) - 6th & 7th July 2017. (2017): S. 433-437.
- [Akka13] G. Akkasoglu: Methodik zur Konzeption und Applikation anwendungsspezifischer Reifegradmodelle unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, (2013).
- [Akka12] G. Akkasoglu, A. Weckenmann, A. Rampp: Design of a maturity model for new forming processes considering uncertain values. *Proceedings of 2nd International Conference on Quality and Innovation in Engineering and Management* 5/13 (2012): S. 47-52.
- [Albe16] A. Albers, B. Gladysz, T. Pinner, V. Butenko, T. Stürmlinger: Procedure for Defining the System of Objectives in the Initial Phase of an Industry 4.0 Project Focusing on Intelligent Quality Control Systems. *Procedia CIRP* 52 (2016): S. 262-267.
- [Alcá19] V. Alcácer, V. Cruz-Machado: Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal* (2019).
- [Alex95] Alexander, C. et al. (Hrsg.): Eine Muster-Sprache – Städte Gebäude, Konstruktion. Wien, Löcker Verlag, 1995.
- [Ande15] R. Anderl, J. Fleischer: Leitfaden Industrie 4.0 - Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand. VDMA-Verl., (2015).
- [Appe18] W. Appelfeller, C. Feldmann: Die digitale Transformation des Unternehmens. Springer Berlin Heidelberg, (2018).
- [Arno09] D. Arnold, K. Furmans: Materialfluss in Logistiksystemen. 6., erw. Aufl. Springer, (2009).
- [Arno08] D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier, K. Furmans: Handbuch Logistik. Springer Berlin Heidelberg, (2008).
- [Atan18] S. Atanasijevic: Innovative models of digital transformation of business-Leader's experience. 2018.
- [Auma16] Aumayr, K. (Hrsg.): Erfolgreiches Produktmanagement. Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [Auri20] Aurich, J.C. et al. (Hrsg.): Bedarfsgerechte Digitalisierung von Produktionsunternehmen - Ein modulares Transformationskonzept als praxisorientierter Ansatz. Kaiserslautern, Synnovating, 2020.
- [Auri16] J.C. Aurich, P. Kölsch, C.F. Herder, G. Mert: PSS 4.0 – Einflüsse von Industrie 4.0 auf Product-Service Systeme. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111/9 (2016): S. 565-568.
- [Balz09] H. Balzert: Lehrbuch der Softwaretechnik: Basiskonzepte und Requirements Engineering. Spektrum Akademischer Verlag, (2009).
- [Bard16] H. Bardt, R. Bertenrath, V. Demary, M. Fritsch, M. Grömling, H.-P. Klös, G.V. Kolev, R. Kroker, K. Lichtblau, J. Matthes, A. Millack, A. Plünnecke, O. Stettes: Wohlstand in der digitalen Welt - Erster IW-Strukturbericht. Institut der deutschen Wirtschaft Medien GmbH, (2016).
- [Bart07] J. Bartolomei, M. Cokus, J. Dahlgren, R. de Neufville, D. Maldonado, J. Wilds: Analysis and applications of Design Structure Matrix, Domain Mapping Matrix and Engineering System Matrix Frameworks. SEARI Working Paper Series WP-2007-8-1 (2007): S. 1-31.
- [Batz20] F. Batzler, S. Braun, C. Siedler: Intelligentes Logistikkonzept in Fertigung und Montage. In: Aurich, J. C. et al. (Hrsg.): Bedarfsgerechte Digitalisierung von Produktionsunternehmen - Ein modulares Transformationskonzept als praxisorientierter Ansatz. Kaiserslautern: Synnovating, 2020.
- [Baue03] S. Bauer: Design for X – Ansätze zur Definition und Strukturierung. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Design for X - Beiträge zum 14. Symposium, Neukirchen, 13. und 14. Oktober 2003. Erlangen: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik Univ. Erlangen-Nürnberg, 2003.
- [Baue14a] W. Bauer et al.: Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland. Berlin, 2014.
- [Baue19] W. Bauer, J. Klapper: A Development Scenario of the Work Area "Intralogistics" Under the Influence of Industry 4.0 Technologies and Its Evaluation on the Basis of a Delphi Study. In: Bagnara, S. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018), Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [Baue17] W. Bauer, J. Klapper, F. Strieg, O. Yesilyurt: Einflussfaktoren und Hemmnisse bei der Durchführung von Industrie 4.0-Projekten - Eine Auswertung empirisch erhobener Daten erfolgreicher Industrie 4.0 Projekte. In: Gronau, N. (Hrsg.): Industrial Internet of Things in der Arbeits- und Betriebsorganisation, Berlin: GITO Verlag, 2017.

- [Baue18] W. Bauer, S. Schlund, T. Hornung, S. Schuler: Digitalization of Industrial Value Chains - A Review and Evaluation of Existing Use Cases of Industry 4.0 in Germany. *Logforum* 14/3 (2018): S. 331-340.
- [Baue14b] T. Bauernhansl, M. ten Hompel, B. Vogel-Heuser: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, (2014).
- [Bech14] J. Bechthold, Kern Andreas, Lauenstein, Christoph, Bernhofer, Lena: *Industry 4.0 - The Capgemini Consulting View - Sharpening the Picture beyond the Hype*. 2014.
- [Beck09a] J. Becker, R. Knackstedt, J. Pöppelbuß: Dokumentationsqualität von Reifegradmodellentwicklungen - Arbeitsbericht Nr. 123. Münster, 2009. <<https://www.wi.uni-muenster.de/sites/wi/files/publications/ab123.pdf>> - 24.12.2017.
- [Beck09b] J. Becker, R. Knackstedt, J. Pöppelbuß: Entwicklung von Reifegradmodellen für das IT-Management. *Wirtsch. Inform. (Wirtschaftsinformatik)*; 51/3 (2009): S. 249-260.
- [Beck11] W. Becker, P. Ulrich: *Mittelstandsforschung - Begriffe, Relevanz und Konsequenzen*. Kohlhammer, (2011).
- [Beck20] W. Becker, P. Ulrich, O. Schmid, C. Feichtinger: *Industrie 4.0 und Mittelstandscharakteristika*. In: Becker, W. et al. (Hrsg.): *Industrielle Digitalisierung - Entwicklungen und Strategien für mittelständische Unternehmen*. 1. Auflage 2020. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Gabler, 2020.
- [Beck13] W. Becker, P. Ulrich, M. Vogt, T. Botzkowski, C. Hilmer, L. Zimmermann: *Digitalisierung im Mittelstand*. Universität Bamberg, (2013).
- [Behr19] F. Behrendt, N. Schmidtko, E. Glistau, M. Wagner: *Der Intelligente Logistikraum: Neue Gestaltungsformen im Kontext der digitalen Transformation*. *I40M (Industrie 4.0 Management)* 2019/4 (2019): S. 35-38.
- [Bene17] A. Benešová, J. Tupa: Requirements for Education and Qualification of People in Industry 4.0. *Procedia Manuf.* 11 (2017): S. 2195-2202.
- [Berg15] S. Berghaus, A. Back, B. Kaltenrieder: *Digital Maturity & Transformation Report 2017*. St. Gallen, 2015.
- [Bern18a] A. Bernardy: *Cyberphysische Systeme von kleinen und mittleren Unternehmen für kleine und mittlere Unternehmen - Bewertung von Technologiekombinationen für das Internet der Dinge auf einen Blick*. *UdZ - Unternehmen der Zukunft 2* (2018): S. 18-20.
- [Bern16] A. Bernardy, F. Jordan: *cyberKMU2: CPS von KMU für KMU - Aufbau einer Plattform zur anforderungsgerechten Auswahl cyber-physischer Systeme*. *UdZ - Unternehmen der Zukunft 2* (2016): S. 19-20.
- [Bern18b] A. Bernardy, F. Jordan, G. Schuh, V. Stich, V. Zeller: *Basic Methodology for Cyber Physical System Modelling*. 2018 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET), (2018 - 2018): S. 1-6.
- [Bild14] A. Bildstein, J. Seidelmann: *Industrie 4.0-Readiness: Migration zur Industrie 4.0-Fertigung*. In: Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [Bind96] V.A. Binder, J. Kantowsky: *Technologiepotentiale*. Deutscher Universitätsverlag, (1996).
- [Binn10] H.F. Binner: *Handbuch der prozessorientierten Arbeitsorganisation - Methoden und Werkzeuge zur Umsetzung*, 4. Aufl. Hanser, (2010).
- [Bisc15] J. Bischoff et al.: *Erschließen der Potenziale der Anwendung von Industrie 4.0 im Mittelstand*. Mülheim an der Ruhr, 2015.
- [Bitk16a] Bitkom - Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V.: *Der Weg zum digitalen Büro ist erst zur Hälfte geschafft*. <<https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Der-Weg-zum-digitalen-Buero-ist-erst-zur-Haelfte-geschafft.html#:~:text=Berlin%2C%2015.&text=Das%20zeigt%20der%20Digital%20Office,auf%20der%20CEBIT%20vorgestellt%20hat.>> - 14.08.2020.
- [Bitk16b] Bitkom - Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V.: *Industrie 4.0 – wie Sensoren, Big Data und 3D-Druck die Produktion und die Arbeit in der Fabrik verändern*. Berlin, 2016. <<https://www.bitkom.org/sites/default/files/pdf/Presse/Anhaenge-an-Pls/2016/Bitkom-Pressekonferenz-Industrie-40-21-04-2016-Praesentation-final.pdf>> - 14.08.2020.
- [Bitk16c] Bitkom - Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V.: *Unternehmen nutzen häufiger Faxgeräte als Soziale Netzwerke*. <<https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Unternehmen-nutzen-haeufiger-Faxgeraete-als-Soziale-Netzwerke.html>> - 27.08.2020.
- [Bitk15a] Bitkom - Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V.: *Digitale Angriffe auf jedes zweite Unternehmen*. <<https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Digitale-Angriffe-auf-jedes-zweite-Unternehmen.html>> - 14.08.2020.

- [Bitk15b] Bitkom - Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V.: Jeder fünfte Landwirtschaftsbetrieb nutzt bereits digitale Anwendungen. <<https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Jeder-fuenfte-Landwirtschaftsbetrieb-nutzt-bereits-digitale-Anwendungen.html>> - 14.08.2020.
- [Bitk18] Bitkom - Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V., Tata Consultancy Service: Unterwegs zu digitalen Welten. <https://downloads.studie-digitalisierung.de/2018/de/Trendstudie_TCS_2018_Bericht_DE.pdf> - 13.11.2020.
- [Bitz90] B. Bitzer: Innovationshemmnisse im Unternehmen. Deutscher Universitätsverlag, (1990).
- [Blei17] K. Bleicher: Das Konzept Integriertes Management - Visionen - Missionen - Programme. 9. aktualisierte und erweiterte Auflage Campus Verlag, (2017).
- [Blei16] M. Bleider, C. David: DigiKMU: Strategische Ausrichtung der Unternehmens-IT zur Umsetzung von Industrie-4.0-Konzepten - Wirkungsbeziehung zwischen CAD-CAM-NC-Modulen und Unternehmenszielen. In: FIR e. V. (Hrsg.): UdZ - Unternehmen der Zukunft - Zeitschrift für Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung. Aachen: 2016.
- [Bloc18] C. Block, B. Kuhlenkötter: Digital Factory Implementation Approach starting from the Macroscopic Perspective with an Example for Holistic Planning in Assembly Systems. 8. WGP-Jahreskongress (2018).
- [Blum15] S. von Blumröder et al.: Technologie-Atlas - Ein Handbuch für Führungskräfte. Berlin, 2015.
- [BMWi18] BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Plattform Industrie 4.0 - Was ist Industrie 4.0?
- [BMWi17] BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Weissbuch - Digitale Plattformen. Berlin, 2017.
- [BMWi16a] BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: IT-Sicherheit für die Industrie 4.0. Produktion, Produkte, Dienste von morgen im Zeichen globalisierter Wertschöpfungsketten - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Berlin, 2016.
- [BMWi16b] BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Wirtschaft digital - Erfolge und Ziele - Eine Bilanz zum IT-Gipfel 2016. Berlin, 2016.
- [BMWi15] BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Industrie 4.0. Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland - Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0. Berlin, 2015.
- [BMWi14] BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Entwicklung digitaler Technologien - Die Zukunft der Wirtschaft ist digital. Berlin, 2014.
- [Boga04] O. Bogatyreva, A. Shillerov, N. Bogatyreva: Patterns in TRIZ contradiction matrix: - Integrated and distributed systems. In: Cascini, G. (Hrsg.): TRIZ future conference - Florence, 3-5 November 2004. Firenze: Firenze university press, 2004.
- [Bonn15] D. Bonnet et al.: Organizing for Digital: Why Digital Dexterity Matters. Paris, 2015.
- [Booz81] E. Booz, J. Allen, C. Hamilton: The role of technology in the 1980s: will it depend on dollars or sense? - The result of a 1981 Booz-Allen survey. In: Booz, E.; Allen, J.; Hamilton, C. (Hrsg.): Outlook, 1981.
- [Boss17] C. Bosse, V. Hellge: Digitalisierung im Mittelstand - Der Readiness-Check Digitalisierung des Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrums Kaiserslautern. Kaiserslautern, 2017.
- [Bowe05] D.J. Bowersox, D.J. Closs, R. Drayer: The digital transformation: technology and beyond. Supply Chain Management Review 9/1 (2005): S. 22-29.
- [Bran16] D. Brandl: MESA MOM Capability Maturity Model Version 1.0 - WHITE PAPER #53. A MESA International white paper. Chandler, 2016.
- [Bran15] M. Brandt: Office-Software dominiert deutsche Büros. <<https://de.statista.com/infografik/3367/nutzung-von-office-software-in-deutschland/>> - 13.11.2020.
- [Bran14] M. Brandt: Microsoft bleibt Software-Hersteller Nummer 1. <<https://de.statista.com/infografik/2088/weltweiter-software-umsatz-der-groessten-hersteller/>> - 13.11.2020.
- [Braun15] S. Braun, A. Rieck, C. Köhler-Hammer: Ergebnisse der BIM-Studie für Planer und Ausführende. Digitale Planungs- und Fertigungsmethoden. 2015.
- [Brei97] A. Breiing, R. Knosala: Bewerten technischer Systeme. Springer Berlin Heidelberg, (1997).
- [Broy10] M. Broy: Cyber-Physical Systems. Springer Berlin Heidelberg, (2010).
- [Brui05] T. de Bruin, R. Freeze, U. Kaulkarni, M. Rosemann: Understanding the Main Phases of Developing a Maturity Assessment Model. Proceedings of Australasian Conference on Information Systems (ACIS) (2005).
- [Brun17] M.P. Brundage, W.Z. Bernstein, K.C. Morris, J.A. Horst: Using Graph-based Visualizations to Explore Key Performance Indicator Relationships for Manufacturing Production Systems. Procedia CIRP 61 (2017): S. 451-456.
- [Bull94] H.-J. Bullinger: Einführung in das Technologiemanagement - Modelle, Methoden, Praxisbeispiele. Teubner, (1994).
- [Bund14] Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI), Noerr LLP: Industrie 4.0 – Rechtliche Herausforderungen der Digitalisierung. Ein Beitrag zum politischen Diskurs. Berlin, München, 2014.

- [Bund15] Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI), PwC - Pricewaterhouse Coopers GmbH: Die Digitalisierung im Mittelstand. 1. Aufl. 2015.
- [Bund16a] Bundeszentrale für politische Bildung 2016: Industrie - industrieller Sektor. In: Bundeszentrale für politische Bildung 2016 (Hrsg.): Duden Wirtschaft von A bis Z: Grundlagenwissen für Schule und Studium, Beruf und Alltag., 6. Aufl. Mannheim: Bibliographisches Institut, 2016.
- [Bund16b] Bundeszentrale für politische Bildung 2016: Verarbeitendes Gewerbe - verarbeitende Industrie. In: Bundeszentrale für politische Bildung 2016 (Hrsg.): Duden Wirtschaft von A bis Z: Grundlagenwissen für Schule und Studium, Beruf und Alltag., 6. Aufl. Mannheim: Bibliographisches Institut, 2016.
- [Burg12] M.H. Burghardt: Projektmanagement - Leitfaden für die Planung, Überwachung und Steuerung von Projekten. 9., wesentlich überarb. und erw. Aufl. Publicis Publ, (2012).
- [Büsc19] M. Büsch: Analyse des Marktmittelfelds. In: Büsch, M. (Hrsg.): Fahrplan zur Transformation des Einkaufs, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [Buss16] K.-D. Busmann, C. Nestler, S. Salvenmoser: Wirtschaftskriminalität in der analogen und digitalen Wirtschaft 2016. Frankfurt am Main, 2016.
- [Caia20] R.G.G. Caiado, L.F. Scavarda, D.L.d.M. Nascimento, P. Ivson, V.H.C. Cunha: A Maturity Model for Manufacturing 4.0 in Emerging Countries. In: Leiras, A. et al. (Hrsg.): Operations Management for Social Good - 2018 POMS International Conference in Rio. Cham: Springer, 2020.
- [Cane18] L. Canetta, A. Barni, E. Montini: Development of a Digitalization Maturity Model for the Manufacturing Sector. 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), (2018 - 2018): S. 1-7.
- [Caro17a] A. de Carolis, M. Macchi, B. Kulvatnyou, M.P. Brundage, S. Terzi: Maturity Models and Tools for Enabling Smart Manufacturing Systems: Comparison and Reflections for Future Developments. In: Rios, J. et al. (Hrsg.): Product lifecycle management and the industry of the future - 14th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2017 : Seville, Spain, July 10-12, 2017 : revised selected papers. Cham: Springer, 2017.
- [Caro17b] A. de Carolis, M. Macchi, E. Negri, S. Terzi: A Maturity Model for Assessing the Digital Readiness of Manufacturing Companies. In: Lödding, H. et al. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing, Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [Comm15] Commerzbank AG: Management im Wandel: Digitaler, effizienter, flexibler! Frankfurt am Main, 2015.
- [Core17] W. Coreynen, P. Matthyssens, W. van Bockhaven: Boosting servitization through digitization - Pathways and dynamic resource configurations for manufacturers. Industrial marketing management: the international journal for industrial and high-tech firms 60 (2017) (2017): S. 42-53.
- [Cors17] H. Corsten: Grundlagen des Technologie- und Innovationsmanagements. 2. Aufl. Franz Vahlen, (2017).
- [Daen92] Daenzer, W.F.; Haberfellner, R. (Hrsg.): Systems Engineering - Methodik und Praxis. 7. Aufl., neu bearb. und erw Zürich, Verl. Industrielle Organisation, 1992.
- [Dani07] M. Danilovic, T.R. Browning: Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices. International Journal of Project Management 25/3 (2007): S. 300-314.
- [Dani04] M. Danilovic, T.R. Browning: A formal approach for domain mapping matrices (DMM) to complement design structure matrices (DSM). Proceedings of the sixth design structure matrix (DSM) international workshop (2004).
- [Dani05] M. Danilovic, B. Sandkull: The use of dependence structure matrix and domain mapping matrix in managing uncertainty in multiple project situations. International Journal of Project Management 23/3 (2005): S. 193-203.
- [Demal6] V. Demary, B. Engels, K.-H. Röhl, C. Rusche: Digitalisierung und Mittelstand - Eine Metastudie. Institut der deutschen Wirtschaft Medien GmbH, (2016).
- [Deur00] C. Deuringer: Organisation und Change Management - Ein ganzheitlicher Strukturansatz zur Förderung organisatorischer Flexibilität. Dissertation, Universität der Bundeswehr, (2000).
- [Dier17] M. Diermeier, H. Goecke: Productivity, technology diffusion and digitization. CESifo forum: a quarterly journal on European economic issues: a joint initiative of Ludwig-Maximilians-Universität and the Ifo Institute 18/1 (2017): S. 26-32.
- [DIHK16a] DIHK - Deutscher Industrie- und Handelskammertag e. V.: DIHK-Innovationsreport 2015/2016: Mittelstand fällt zurück - Ergebnisse einer Befragung der IHK-Organisation bei 1.000 innovativen Unternehmen. Berlin, 2016.
- [DIHK16b] DIHK - Deutscher Industrie- und Handelskammertag e. V.: Wirtschaft digital: Perspektiven erkannt, erste Schritte getan - Das IHK-Unternehmensbarometer zur Digitalisierung. Berlin, 2016.
- [DIN09a] DIN 69901-2: Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Prozesse, Prozessmodell. Beuth Verlag, (2009).
- [DIN09b] DIN 69901-3: Projektmanagementsysteme - Methoden. Beuth Verlag, (2009).

- [DIN09c] DIN 69901-5: Projektmanagement – Projektmanagementsysteme - Begriffe. Beuth Verlag, (2009).
- [DIN20a] DIN e. V., DKE - Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE: Deutsche Normungsrroadmap Industrie 4.0. Version 4 - DIN und DKE ROADMAP. Frankfurt am Main, 2020.
- [DIN13] DIN EN 62264-1: Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen - Modelle und Terminologie. Beuth Verlag, (2013).
- [DIN17] DIN EN 62890: Life-cycle-Management von Systemen und Produkten der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik der Industrie. Beuth Verlag GmbH, (2017).
- [DIN20b] DIN EN IEC 62443-3: Industrielle Kommunikationsnetze - IT-Sicherheit für Netze und Systeme - Systemanforderungen zur IT-Sicherheit und Security-Level. Beuth Verlag, (2020).
- [DIN16] DIN ISO 16290: Raumfahrtssysteme - Definition des Technologie-Reifegrades (TRL) und der Beurteilungskriterien. Beuth Verlag GmbH, (2016).
- [DKE09] DKE - Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE: IT-Sicherheit für Netze und Systeme - Begriffe und Modelle. (2009).
- [Domb18] U. Dombrowski, A. Karl, T. Richter, Wullbrandt Jonas: Mensch, Organisation, Technik im KMU 4.0. In: Matt, D. (Hrsg.): KMU 4.0 - digitale Transformation in kleinen und mittelständischen Unternehmen, Berlin: GITO, 2018.
- [Domb17a] U. Dombrowski, T. Richter, P. Krenkel: Wechselwirkungen von Ganzheitlichen Produktionssystemen und Industrie 4.0. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112/6 (2017): S. 430-433.
- [Domb17b] U. Dombrowski, T. Stefanak, P. Krenkel: Aspekte der Fabrikplanung für die Ausrichtung auf Industrie 4.0. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 - Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser, 2017.
- [Dora81] G.T. Doran: There's a S.M.A.R.T. way to write management' s Goals and Objectives. Management Review 70/11 (1981): S. 35-36.
- [Dors16] W. Dorst: Industrie 4.0 - Status und Perspektiven. 2016.
- [Dumi19] R. Dumitrescu, A. Lipsmeier, T. Westermann, A. Kühn: Digitale Transformation ganzheitlich managen. Industrie 4.0 Management 2019/4 (2019): S. 55-58.
- [Dupo19] S. Dupont, S. Braun, C. Siedler, J.C. Aurich, K.J. Zink: Einführung eines intelligenten Logistikkonzepts zur Unterstützung der Mitarbeiter in Fertigung und Montage bei der Firma Braun Maschinenbau GmbH. In: Bosse, C.; Zink, K. J. (Hrsg.): Arbeit 4.0 im Mittelstand. Chancen und Herausforderungen des digitalen Wandels für KMU, Gabler Verlag, 2019.
- [Dupo20a] S. Dupont, C. Siedler, M. Tafvizi Zavareh, D. Schröder: Technologieatlas zur Auswahl von Digitalisierungslösungen. In: Aurich, J. C. et al. (Hrsg.): Bedarfsgerechte Digitalisierung von Produktionsunternehmen - Ein modulares Transformationskonzept als praxisorientierter Ansatz. Kaiserslautern: Synnovating, 2020.
- [Dupo20b] S. Dupont, M. Tafvizi Zavareh, F. Zeihsel, K.J. Zink: Entwicklung von Digitalisierungsstrategien. In: Aurich, J. C. et al. (Hrsg.): Bedarfsgerechte Digitalisierung von Produktionsunternehmen - Ein modulares Transformationskonzept als praxisorientierter Ansatz. Kaiserslautern: Synnovating, 2020.
- [Durs10] M. Durst, S. Stang, L. Stöber, F. Edelman: Kollaboratives Trendmanagement. HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik 47/3 (2010): S. 78-86.
- [Ecke12] C. Eckert: IT-Sicherheit - Konzepte - Verfahren - Protokolle. 7., überarb. und erw. Aufl. Oldenbourg-Verl., (2012).
- [Ehem19] T. Ehemann, M. Tafvizi Zavareh, S. Dupont, C. Siedler, C. Sinnwell, M. Pier, A. Prezer, F. Jenne, F. Batzler, K.J. Zink, J.C. Göbel: Entwicklung eines Transformationskonzepts zur Digitalisierung in Produktionsunternehmen. In: Bauer, W. et al. (Hrsg.): TransWork - Arbeit in der digitalisierten Welt - Stand der Forschung und Anwendung im BMBF-Förderschwerpunkt. Stuttgart: Fraunhofer IAO, 2019.
- [Eich06] M. Eichinger, M. Maurer, U. Lindemann: Using multiple design structure matrices. Proceedings DESIGN 2006, the 9th International Design Conference 9 (2006): S. 229-236.
- [EIS19] F. El Sakka, T. Busert, A. Fay: Systematische Einführung von Industrie 4.0 für den Mittelstand. Industrie 4.0 Management 2019/3 (2019): S. 25-29.
- [Eppi02] S.D. Eppinger: Patterns of Product Development Interactions. Massachusetts Institute of Technology: Working Paper No. ESD-WP-2003-01.05-ESD Internal Symposium (2002).
- [Eppi12] S.D. Eppinger, T.R. Browning: Design structure matrix methods and applications. (2012).
- [Erns14] Ernst & Young AG: Global Commercial Banking Survey 2014. Advancing service in a digital age. Frankfurt am Main, 2014.
- [Euro03] Europäischen Union: Empfehlung der Kommission vom 6. Mai 2003 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen. (2003).
- [Ever02] W. Eversheim: Organisation in der Produktionstechnik. 4., bearb. und korrigierte Aufl. Springer, (2002).
- [Ever92] W. Eversheim: Flexible Produktionssysteme - Handwörterbuch der Organisation. 3. Aufl. (1992).
- [Fedel6] Federal Ministry of Education and Research (BMBF): The new High-Tech Strategy. Berlin, 2016.

- [Feld18] C. Feldmann, R. Ziegenbein: Digital Lean – Mit dem Crossroads-Modell zu mehr Effizienz - Erklärung und Auswahl von Steuerungsansätzen für Produktions- und Logistiksysteme in Zeiten der Digitalisierung. 140M (Industrie 4.0 Management) 2018/5 (2018): S. 33-38.
- [Fett04] P. Fettke, P. Loos: Referenzmodellierungsforschung Referenzmodellierungsforschung – Referenzmodellierungsforschung Referenzmodellierungsforschung – Langfassung eines Aufsatzes. Mainz, 2004.
- [FIR16] FIR e. V.: eStep Mittelstand Self-Assessment-Tool. Aachen, 2016.
- [Fisc20] M. Fischer, F. Imgrund, C. Janiesch, A. Winkelmann: Strategy archetypes for digital transformation: Defining meta objectives using business process management. Information & Management 57/5 (2020): S. 103262. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378720618303197>>.
- [Flei15] E. Fleisch, M. Weinberger, F. Wortmann: Geschäftsmodelle im Internet der Dinge. Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung 67/4 (2015): S. 444-465.
- [Font13] J. Fontius: Megatrends und ihre Implikationen für die Logistik - Ableitung von Wirkungszusammenhängen. Dissertation, Technische Universität Berlin, (2013).
- [Forr61] J.W. Forrester: Industrial Dynamics. OR: Productivity Press (1961): 464 pp.
- [Fost86] R.N. Foster: Innovation - Die technologische Offensive. Gabler Verlag, (1986).
- [Fost81] R.N. Foster: Linking R&D to strategy. McKinsey Quarterly (Winter) (1981): S. 35-52.
- [Frit07] J.U. Fritz: Zielführende Modellierung und Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der digitalen Fabrik. Dissertation, Universität des Saarlandes, (2007).
- [Ganz16] J. Ganzarain, N. Errasti: Three stage maturity model in SME's toward industry 4.0. Journal of Industrial Engineering and Management 9/5 (2016): S. 1119.
- [Gatt00] W. Gattermeyer, R.M. Neubauer: Change Management zur Umsetzung von Strategien. In: Hinterhuber, H. H. et al. (Hrsg.): Das Neue Strategische Management - Perspektiven und Elemente einer zeitgemäßen Unternehmensführung. 2., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden, s.l.: Gabler Verlag, 2000.
- [Gaus17] J. Gausemeier et al.: Mit Industrie 4.0 zum Unternehmenserfolg - Integrative Planung von Geschäftsmodellen und Wertschöpfungssystemen. Paderborn, 2017.
- [Gaus01] J. Gausemeier, P. Ebbesmeier, F. Kallmeyer: Produktinnovation - Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. [Elektronische Ressource] Hanser, (2001).
- [Gaus96] J. Gausemeier, A. Fink, O. Schlake: Szenario-Management - Planen und Führen mit Szenarien. 2., bearb. Aufl. Hanser, (1996).
- [Gayc15] S. Gaycken, R. Hughes: Cyberreadiness in kleinen und mittleren Unternehmen - Studie Digital Society Institute Berlin, ESMT Berlin, im Auftrag des DIHK. Berlin, 2015.
- [Geis14] R. Geissbauer, S. Schrauf, Koch, Volkmar, Kuge, Simon: Industrie 4.0: Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution. München, 2014.
- [GfK14] GfK Enigma: Umfrage in mittelständischen Unternehmen zum Thema Digitalisierung Bedeutung für den Mittelstand im Auftrag der DZ Bank. 2014.
- [Gilc16] A. Gilchrist: Industry 4.0. Apress, (2016).
- [Glat20] M. Glatt, P. Kölsch, N. Krenkel, P. Langlotz, C. Siedler, L. Yi, J.C. Aurich: Rahmenwerk zur Einordnung Digitaler Zwillinge in Produktionssystemen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115/6 (2020): S. 429-433.
- [Gökalp17] E. Gökalp, U. Şener, P.E. Eren: Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM. In: Mas, A. et al. (Hrsg.): Software Process Improvement and Capability Determination, Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [Gonc14] G. Goncalves, J. Reis, R. Pinto, M. Alves, J. Correia: A step forward on intelligent factories: A Smart Sensor-oriented approach. IEEE [International Conference on] Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2014 - 16 - 19 Sept. 2014, Barcelona, Spain. (2014): S. 1-8.
- [Gron13] N. Gronau, C. Fohrholz, N. Weber: Wettbewerbsfaktor Analytics - Reifegrad ermitteln, Wirtschaftlichkeitspotenziale entdecken - Ergebnisse einer explorativen Studie zur Nutzung von Business Analytics in Unternehmen der DACH-Region. Potsdam, 201307.08.2020.
- [Groß19] C. Groß, R. Pfennig: Digitalisierungs-Basics und Technologie. In: Groik, C.; Pfennig, R. (Hrsg.): Digitalisierung in Industrie, Handel und Logistik - Leitfaden von der Prozessanalyse bis zur Einsatzoptimierung. Wiesbaden: Springer Gabler, 2019.
- [Gros11] D. Gross, W. Hauger, J. Schröder, W. Wall: Technische Mechanik 1. Springer Berlin Heidelberg, (2011).
- [Gros15] D. Gross, W. Hauger, J. Schröder, W.A. Wall: Technische Mechanik 3. Springer Berlin Heidelberg, (2015).
- [Groß96] W.F. Große-Oetringhaus: Strategische Identität — Orientierung im Wandel. Springer Berlin Heidelberg, (1996).
- [Grun15] C.-G. Grundig: Fabrikplanung - Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. 5., aktualisierte Aufl. Hanser, (2015).
- [Guda17] A.E. Gudanowska: Modern Research Trends within Technology Management in the Light of Selected Publications. Procedia Engineering 182 (2017): S. 247-254.

- [Günt12] H.-O. Günther, H. Tempelmeier: Produktion und Logistik. Springer Berlin Heidelberg, (2012).
- [Günt10a] Günthner, W.; Hompel, M. ten (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [Günt10b] W.A. Günthner, R. Chisu, F. Kuzmany: Die Vision vom Internet der Dinge. In: Günthner, W.; Hompel, M. ten (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [Guo14] A. Guo, T. Starner, S. Raghu, X. Xie, S. Ismail, X. Luo, J. Simoneau, S. Gilliland, H. Baumann, C. Southern: A comparison of order picking assisted by head-up display (HUD), cart-mounted display (CMD), light, and paper pick list. ISWC '14 : proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers : September 13-17, 2014, Seattle, WA, USA, (2014): S. 71-78.
- [Gute58] E. Gutenberg: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre - Erster Band: Die Produktion. Vierte Auflage Springer Berlin Heidelberg, (1958).
- [Hämm18] M. Hämmerle, T. Hornung: Industrie 4.0 nutzen - Die Produktion durch Anwendungsfälle der Digitalisierung optimieren. DLG Expertenwissen 10 (2018): S. 1-8.
- [Hamm16] A. Hammermann, O. Stettes: Qualifikationsbedarf und Qualifizierung. Anforderungen im Zeichen der Digitalisierung - IW policy paper 3/2016. Köln, 201627.08.2020.
- [Hank15] M. Hankel: Industrie 4.0: Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0). 01.08.2020.
- [Hans02] H. Hansmann, M. Laske, R. Luxem: Einführung der Prozesse — Prozess-Roll-out. In: Becker, J.; Kugeler, M.; Rosemann, M. (Hrsg.): Prozessmanagement - Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung. Dritte, vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 2002.
- [Hauß10] C. Haubner, J. Elger, A. Trautmann: Zusammenfassung und Fazit: Das Internet der Dinge als neues Vorgehensmodell. In: Günthner, W.; Hompel, M. ten (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [Haye03] R.H. Hayes, S.C. Wheelwright: Link manufacturing process and product life cycles. In: Lewis, M. A.; Slack, N. (Hrsg.): Operations management: critical perspectives on business and management, 3. Auflage. London u. a.: Routledge, 2003.
- [Heag16] J. Heagney: Fundamentals of project management. Fifth edition American Management Association, (2016).
- [Hech14] S. Hecht: Ein Reifegradmodell für die Bewertung und Verbesserung von Fähigkeiten im ERP-Anwendungsmanagement. Springer Fachmedien Wiesbaden, (2014).
- [Heid17] R. Heidel, M. Hoffmeister, M. Hankel, U. Döbrich: Industrie 4.0 Basiswissen RAMI4.0 - Referenzarchitekturmodell mit Industrie 4.0-Komponente. 1. Auflage VDE Verlag GmbH; Beuth Verlag GmbH, (2017).
- [Hell18] V. Helge, D. Schröder, K.J. Zink: Der Readiness Check "Digitalisierung" als Instrument im digitalen Transformationsprozess. In: Lingnau, V.; Müller-Seitz, G.; Roth, S. (Hrsg.): Management der digitalen Transformation - Interdisziplinäre theoretische Perspektiven und praktische Ansätze. München: Verlag Franz Vahlen, 2018.
- [Henz80] H. Henzler: Strategisches Management als Impulsgeber der 80er Jahre. Zeitschrift für betriebswirtschaftliche 11 (1980): S. 70-86.
- [Herd18] C.F. Herder: Konzept zur impliziten Identifikation und Planung von Technologien für die Produktion. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, (2018).
- [Herr17] K. Herrmann: Den Wechsel zur produktorientierten Produktionsplanung beherrschen - Projektporträt. In: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.): Industrie 4.0 - Innovationen für die Produktion von morgen. Berlin: 2017.
- [Hers77] P. Hersey, K.H. Blanchard: Management of Organizational Behavior: Utilizing Human Resources. N.J.: Prentice-Hall, (1977).
- [Hill07] K.-H. Hillmann: Wörterbuch der Soziologie. Alfred Kröner Verlag, (2007).
- [Hipp18] S. Hippmann, R. Klingner, M. Leis: Digitalisierung - Anwendungsfelder und Forschungsziele. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Digitalisierung - Schlüsseltechnologien für Wirtschaft & Gesellschaft, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [Hirs17] H. Hirsch-Kreinsen: Digitalisierung industrieller Einfacherarbeit - Entwicklungspfade und arbeitspolitische Konsequenzen. Arbeit: Zeitschrift für Arbeitsforschung, Arbeitsgestaltung und Arbeitspolitik 26/1 (2017): S. 7-32.
- [Hirs16] H. Hirsch-Kreinsen: Digitization of industrial work: development paths and prospects. Journal for Labour Market Research 49/1 (2016): S. 1-14.
- [Hölz20] K. Hölzle et al.: Wie systematisch gehen KMU die digitale Transformation an? - Digitalcheck Mittelstand. Reifegradmessung von KMU in der Dimension Strategie. Berlin, 2020.
- [Holz19] H. Holzmüller, J. Roßmann, W. Tillmann: STEPS – Sozio-Technische Gestaltung und Einführung Cyber-Physischer Produktionssysteme in nicht F&E-intensiven Unternehmen. Dortmund, 2019.
- [Homp05] M. ten Hompel, T. Schmidt: Warehouse Management - Automatisierung und Organisation von Lager- und Kommissioniersystemen. 2., korrigierte Aufl. Springer, (2005).

- [Hon05] K. Hon: Performance and Evaluation of Manufacturing Systems. CIRP Annals - Manufacturing Technology 54/2 (2005): S. 139-154.
- [Höpt14] N. Höptner, J. Loeffler, P. Wolny: "Plug&Produce" - eine Innovation für die Produktion. 30.12.2017.
- [Horl18] S. Horler, E. Müller: Beitrag zur Strukturplanung und -absicherung der Smart Factory - Bewältigung exogener und endogener Komplexität in der vernetzten, adaptiven Produktion. In: Matt, D. (Hrsg.): KMU 4.0 - digitale Transformation in kleinen und mittelständischen Unternehmen, Berlin: GITO, 2018.
- [Horl17] S. Horler, E. Müller: Strukturplanung zukünftiger Produktionssysteme - Die erforderliche Transformation für die Planung und den Betrieb der Smart Factory. I40M (Industrie 4.0 Management) 2017/3 (2017): S. 54-58.
- [Horx96] M. Horx, P. Wippermann: Was ist Trendforschung? ECON, (1996).
- [Hüb17] M. Hübner, C. Liebrecht, N. Malessa, A. Kuhnle, P. Nyhuis, G. Lanza: Vorgehensmodell zur Einführung von Industrie 4.0 - Vorstellung eines Vorgehensmodells zur bedarfsgerechten Einführung von Industrie 4.0-Methoden. wt Werkstatttechnik online 4 (2017): S. 266-272.
- [Hüb18] M. Hübner: Das Industrie 4.0-Reifegradmodell. In: Lanza, G.; Nyhuis, P. (Hrsg.): Industrie 4.0 für die Praxis - Befähigungs- und Einführungsstrategien. Garbsen: TEWISS Verlag TEWISS-Technik und Wissen GmbH, 2018.
- [HWK15] HWK - Handwerkskammer zu Köln: Umfrage zur Digitalisierung in Handwerksunternehmen im Bezirk der Handwerkskammer zu Köln. Köln, 2015.
- [IHK15] IHK Berlin: Digitalisierung der Berliner Wirtschaft. Berlin, 2015.
- [Inga20] M. Ingaldi, R. Ulewicz: Problems with the Implementation of Industry 4.0 in Enterprises from the SME Sector. In: Rauch, E.; Woschank, M. (Hrsg.): Industry 4.0 for SMEs - Smart Manufacturing and Logistics for SMEs, [S.l.]: MDPI AG, 2020.
- [ISO14a] ISO 22400-1: Automation systems and integration - Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management - Part 1: Overview, concepts and terminology. Beuth Verlag, (2014).
- [ISO14b] ISO 22400-2: Automation systems and integration - Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management - Part 2: Definitions and descriptions. Beuth Verlag, (2014).
- [Issa17] A. Issa, D. Lucke, T. Bauernhansl: Mobilizing SMEs Towards Industrie 4.0-enabled Smart Products. Procedia CIRP 63 (2017): S. 670-674.
- [Jäge16] J. Jäger, O. Schöllhammer, M. Lickefett, T. Bauernhansl: Advanced Complexity Management Strategic Recommendations of Handling the "Industrie 4.0" Complexity for Small and Medium Enterprises. Procedia CIRP 57 (2016): S. 116-121.
- [Jask20] S. Jaskó, A. Skrop, T. Holczinger, T. Chován, J. Abonyi: Development of manufacturing execution systems in accordance with Industry 4.0 requirements: A review of standard- and ontology-based methodologies and tools. Computers in Industry 123 (2020): S. 103300.
- [Jod16] H. Jodlbauer, M. Schagerl: Reifegradmodell Industrie 4.0 - Ein Vorgehensmodell zur Identifikation von Industrie 4.0 Potentialen. In: Mayr, H. C.; Pinzger, M. (Hrsg.): Informatik 2016 - Lecture Notes in Informatics. Bonn: 2016.
- [Jord17a] F. Jordan, A. Bernardy, M. Guth, M. Haferkamp: Cyberphysische Systeme von kleinen und mittleren Unternehmen für kleine und mittlere Unternehmen - cyberKMU2: Effektiv und effizient zum individuellen Technologiekonzept mit dem CPS-Matchmaker. UdZ - Unternehmen der Zukunft 2 (2017): S. 34-36.
- [Jord17b] F. Jordan, A. Bernardy, M. Stroh, J. Horeis, V. Stich: Requirements-Based Matching Approach to Configure Cyber-Physical Systems for SMEs. PICMET '17 - Portland International Conference on Management of Engineering and Technology : proceedings : Technology Management for the Interconnected World. (2017?); S. 1-7.
- [Jung17a] K. Jung, S. Choi, B. Kulvatunyou, H. Cho, K.C. Morris: A reference activity model for smart factory design and improvement. Production Planning & Control 28/2 (2017): S. 108-122.
- [Jung17b] K. Jung, B. Kulvatunyou, S. Choi, M.P. Brundage: An Overview of a Smart Manufacturing System Readiness Assessment. IFIP advances in information and communication technology 488 (2017): S. 705-712.
- [Kage13] H. Kagermann, W. Wahlster, J. Helbig: Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0 - Securing the future of German manufacturing industry. München, 2013.
- [Kage12] H. Kagermann, W. Wahlster, J. Helbig: Im Fokus: Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 - Handlungsempfehlungen zur Umsetzung. Berlin, 2012.
- [Kahl01] B. Kahlbrandt: Software-Engineering mit der Unified Modeling Language. Springer Berlin Heidelberg, (2001).
- [Kang16] N. Kang, C. Zhao, J. Li, J.A. Horst: A Hierarchical structure of key performance indicators for operation management and continuous improvement in production systems. International Journal of Production Research 54/21 (2016): S. 6333-6350.

- [Katz13] R.L. Katz, P. Koutroumpis: Measuring digitization. A growth and welfare multiplier. *Technovation* 33/10-11 (2013): S. 314-319.
- [Kauf15] T. Kaufmann: Geschäftsmodelle in Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge - Der Weg vom Anspruch in die Wirklichkeit. Springer Vieweg, (2015).
- [Kaur19] S. Kaur, V. Akre, M. Arif: SMART project management for SMART cities: Analyzing critical factors affecting trust among Virtual Project Teams. *Emerging technologies blockchain and IoT - ITT 2019 - Information Technology Trends : 20 & 21 November 2019, HCT - Ras Al Khaimah Women's campus.* (2019): S. 65-72.
- [Kemp19] B. Kempa, A. Pflaum, V. Naumann: Identifikation von Anwendungspotenzialen für Industrie 4.0 durch strategisches Roadmapping – ein Beispiel aus der Elektroindustrie. In: Becker, W. et al. (Hrsg.): *Geschäftsmodelle in der digitalen Welt - Strategien, Prozesse und Praxiserfahrungen.* Wiesbaden, Germany: Springer Gabler, 2019.
- [Khan16] A. Khan: Innovationsmanagement in der Energiewirtschaft. Entwicklung eines Reifegradmodells. Springer Fachmedien Wiesbaden, (2016).
- [Klap17] J. Klapper, A. Korge: Changes in company organization and conceivable future production scenarios under the influence of Industry 4.0. In: Schützer, K. (Hrsg.): *22° Seminário de Alta Tecnologia - Produção Inteligente: Os desafios da 4ª Revolução Industrial.* 2017.
- [Klau68] G. Klaus: *Wörterbuch der Kybernetik.* 2. Aufl. Dietz-Verlag, (1968).
- [Klee17] F.C. Kleemann, A.H. Glas: *Einkauf 4.0 - Digitale Transformation der Beschaffung.* Springer Fachmedien Wiesbaden, (2017).
- [Klei06] M. Kleinaltenkamp: *Markt- und Produktmanagement - Die Instrumente des Business-to-Business-Marketing.* 2., überarbeitete und erweiterte Auflage Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, (2006).
- [Klin18] Klinkenberg R, Schlunder P., Klapic E., Lacker T.: Zukunftsweisende Informations- und Kommunikations-Technologien. In: Wagner, R. M. (Hrsg.): *Industrie 4.0 für die Praxis,* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [Klum19] B. Klumpp: Radar-Diagramme. <<https://www.methode.de/am/di/amdi05.htm>> - 3. Juli 2019.
- [Klut14] A. Kluth, J. Jäger, A. Schatz, T. Bauernhansl: Method for a Systematic Evaluation of Advanced Complexity Management Maturity. *Procedia CIRP* 19 (2014): S. 69-74.
- [Knos18] O. Knospe, M. Drewel, T. Mittag, C. Pierenkemper, D. Hobscheid: Leistungssteigerung durch Industrie 4.0 für kleine und mittlere Unternehmen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113/1-2 (2018): S. 83-87.
- [Knot17] T. Knothe, A. Ullrich, N. Weinert: Wege in die Zukunft der Produktion - Ganzheitliche Mitarbeiterbindung als Befähiger für die Transformation zur Industrie 4.0. *wt Werkstatttechnik online* 4 (2017): S. 273-279.
- [Köbl20] J. Köbler, T. Fischer, B. Klerch, M. Schlecht: *Industrie 4.0 - Der Weg zu einem digitalisierten Produktionsunternehmen.* I40M (Industrie 4.0 Management) 2020/3 (2020): S. 57-60.
- [Köff16] S. Köffer, N. Urbach: Die Digitalisierung der Wissensarbeit – Handlungsempfehlungen aus der Wirtschaftsinformatik-Forschung. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik* 53/1 (2016): S. 5-15.
- [Köh15] Köhler-Schute, C. (Hrsg.): *Industrie 4.0 - Ein praxisorientierter Ansatz.* Berlin, KS-Energy-Verlag, 2015.
- [Kolb18] D. Kolberg: Entwicklung einer Referenzarchitektur zur Realisierung von Methoden der Lean Production mittels digitaler Technologien. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, (2018).
- [Kolb15] D. Kolberg, D. Zühlke: *Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies.* IFAC-PapersOnLine 48/3 (2015): S. 1870-1875.
- [Köls99] W. Kölscheid: *Methodik zur lebenszyklusorientierten Produktgestaltung - Ein Beitrag zum Life Cycle Design.* Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, (1999).
- [Köni13] A. König: Entwicklung eines digitalen Fabrikgesamtmodells und dessen Integration in die Fabrikstrukturplanung eines Automobilherstellers – Digitales Fabrikgesamtmodell für die Fabrikstrukturplanung. Dissertation, Technische Universität Clausthal, (2013).
- [Köni17] M. Königs, V. Zeller: *DigiKMU - Entwicklung einer Methode zur Unterstützung von KMU im Maschinen- und Anlagenbau bei der Umsetzung von Industrie 4.0 im Bereich der CAD-CAM-NC-Verfahrenskette - Schlussbericht.* Aachen, 2017.
- [Kore15] M. Korell, S. Schimpf: Das syncTech Modell zur synchronisierten Technologieadaption. In: Warschat, J. (Hrsg.): *Technologien frühzeitig erkennen, Nutzenpotenziale systematisch bewerten - Methoden, Organisation, semantische Werkzeuge zur Informationsgewinnung und -speicherung; Ergebnisse des Verbundforschungsprojektes syncTech - synchronisierte Technologieadaption als Treiber der strategischen Produktinnovation.* Stuttgart: Fraunhofer-Verlag, 2015.
- [Kosi17] A. Kosieradzka: *Maturity Model for Production Management.* *Procedia Engineering* 182 (2017): S. 342-349.
- [Kost09] C. Kostka, A. Mönch: *Change Management - 7 Methoden für die Gestaltung von Veränderungsprozessen.* 4. Aufl. Hanser, (2009).
- [Kott92] J.P. Kotter, J.L. Heskett: *Corporate Culture and Performance.* Free Press, (1992).

- [Kraf88] J.F. Krafcik: Triumph of the Lean Production System. Sloan Management Review 30 (1988): S. 41-52.
- [Krau18] A. Kraut, J. Hicking, S. Ackermann, Y. Krolle: Ermittlung des Digitalisierungsgrads von KMU in NRW. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113/1-2 (2018): S. 92-95.
- [Krub82] E.G. Krubasik: Technologie – Strategische Waffe. Wirtschaftswoche (1982): S. 28-33.
- [Krüg94] W. Krüger: Transformations-Management. In: Gomez, P. et al. (Hrsg.): Unternehmerischer Wandel, Wiesbaden: Gabler Verlag, 1994.
- [Krüg84] W. Krüger: Organisation der Unternehmung. Kohlhammer, (1984).
- [Krug18] M. Krugh, L. Mears: A complementary Cyber-Human Systems framework for Industry 4.0 Cyber-Physical Systems. Manuf. Lett. 15 (2018): S. 89-92.
- [Kübe13] M. Kübel: Corporate M&A - Reifegradmodell und empirische Untersuchung. Springer Fachmedien Wiesbaden, (2013).
- [Kühn06] W. Kühn: Digitale Fabrik. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, (2006).
- [Kuma20] A. Kumar, D. Gupta: Challenges Within the Industry 4.0 Setup. In: Nayyar, A.; Kumar, A. (Hrsg.): A roadmap to industry 4.0 - Smart production, sharp business and sustainable development. Cham: Springer, 2020.
- [Kust19] J. Kuster, C. Bachmann, E. Huber, M. Hubmann, R. Lippmann, E. Schneider, P. Schneider, U. Witschi, R. Wüst: Handbuch Projektmanagement. Springer Berlin Heidelberg, (2019).
- [Lahr11] G. Lahrmann, F. Marx, R. Winter, F. Wortmann: Business Intelligence Maturity: Development and Evaluation of a Theoretical Model. 2011 44th Hawaii International Conference on System Sciences - (HICSS 2011); Kauai, Hawaii, USA, 4 - 7 January 2011. (2011): S. 1-10.
- [Lahr10] G. Lahrmann, F. Marx, R. Winter, F. Wortmann: Business Intelligence Maturity Models: An Overview. VII Conference of the Italian Chapter of AIS (itAIS 2010) (2010).
- [Land13] M. Landherr, M. Neumann, J. Volkmann, C. Constantinescu: Digitale Fabrik. In: Westkämper, E. et al. (Hrsg.): Digitale Produktion, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [Land16] M. Landherr, U. Schneider, T. Bauernhansl: The Application Center Industrie 4.0 - Industry-driven Manufacturing, Research and Development. Procedia CIRP 57 (2016): S. 26-31.
- [Lang17] T. Langer, A. Singer, K. Wenzel, D. Bolev: Modulbaukasten Digitalisierung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112/12 (2017): S. 902-906.
- [Lanz17] G. Lanza: Stufenweise vernetzen im Unternehmen - Projektporträt. In: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.): Industrie 4.0 - Innovationen für die Produktion von morgen. Berlin: 2017.
- [Lanz18] Lanza, G.; Nyhuis, P. (Hrsg.): Industrie 4.0 für die Praxis - Befähigungs- und Einführungsstrategien. Garbsen, TEWISS Verlag TEWISS-Technik und Wissen GmbH, 2018.
- [Lanz16] G. Lanza, P. Nyhuis, S.M. Ansari, T. Kuprat, C. Liebrecht: Befähigungs- und Einführungsstrategien für Industrie 4.0. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111/1-2 (2016): S. 76-79.
- [Lee12] E.A. Lee, S.A. Seshia: Introduction to embedded systems - A cyber physical systems approach. 1. ed., print. 1.08 LeeSeshia.org, (2012).
- [Lee15] J. Lee, B. Bagheri, H.-A. Kao: A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing Letters 3 (2015): S. 18-23.
- [Leig10] D. Leigh: SWOT Analysis. In: Silber, K. H. et al. (Hrsg.): Handbook of improving performance in the workplace, Silver Spring, MD, San Francisco: International Society for Performance Improvement; Pfeiffer, 2010.
- [Lein18a] S. Leineweber, T. Wienbruch, B. Kühlenkötter: Konzept zur Unterstützung der Digitalen Transformation von Kleinen und Mittelständischen Unternehmen. In: Matt, D. (Hrsg.): KMU 4.0 - digitale Transformation in kleinen und mittelständischen Unternehmen, Berlin: GITO, 2018.
- [Lein18b] S. Leineweber, T. Wienbruch, D. Lins, D. Kreimeier, B. Kühlenkötter: Concept for an evolutionary maturity based Industrie 4.0 migration model. Procedia CIRP 72 (2018): S. 404-409.
- [Lewi17] M. Lewin, S. Voigtlander, A. Fay: Method for process modelling and analysis with regard to the requirements of Industry 4.0: An extension of the value stream method. Proceedings IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society - China National Convention Center, Beijing, China, 29 October-01 November, 2017. (2017): S. 3957-3962.
- [Leyh16a] C. Leyh, T. Schäffer, K. Bley, S. Forstenhäusler: SIMMI 4.0 – A Maturity Model for Classifying the Enterprise-wide IT and Software Landscape Focusing on Industry 4.0. Annals of Computer Science and Information Systems, (2016): S. 1297-1302.
- [Leyh16b] C. Leyh, T. Schäffer, S. Forstenhäusler: SIMMI 4.0 – Vorschlag eines Reifegradmodells zur Klassifikation der unternehmensweiten Anwendungssystemlandschaft mit Fokus Industrie 4.0. MKWI 2016 – IT- und Software-Produktmanagement in IoT-basierten Infrastrukturen (2016): S. 981-992.
- [Li17] Q. Li, M. Brundage, B. Kulvatunyou, D. Brandl, S. Do Noh: Improvement Strategies for Manufacturers Using the MESA MOM Capability Maturity Model. In: Lödding, H. et al. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing, Cham: Springer International Publishing, 2017.

- [Libo20] M. Liborio Zapata, L. Berrah, L. Tabourot: Towards the Definition of an Impact Level Factor of SME Features Over Digital Transformation. Proceedings of IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (2020): S. 1-8.
- [Lich15] K. Lichtblau et al.: Industrie 4.0-Readiness. Aachen, Köln, 2015.
- [Lieb18a] C. Liebrecht, D. Zeranski, Lanza G.: Analyse der Wirkzusammenhänge und Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113/1-2 (2018): S. 79-82.
- [Lieb18b] C. Liebrecht, N. Böhn, L. Kiefer, M. Teufel, G. Lanza: Einführung von Industrie 4.0 - Ermittlung unternehmensspezifischer Einführungsreihenfolgen für Industrie 4.0-Methoden. Industrie 4.0 Management 6 (2018): S. 21-24.
- [Lieb17] C. Liebrecht, A. Jacob, A. Kuhnle, G. Lanza: Multi-criteria Evaluation of Manufacturing Systems 4.0 under Uncertainty. Procedia CIRP 63 (2017): S. 224-229.
- [Lieb18c] C. Liebrecht, D. Zeranski, G. Lanza: Analyse der Wirkzusammenhänge und Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113/1-2 (2018): S. 79-82.
- [Lind19] D. Lindner: KMU im digitalen Wandel - Ergebnisse empirischer Studien zu Arbeit, Führung und Organisation. Springer Fachmedien Wiesbaden, (2019).
- [Lind17] D. Lindner, M. Ott, C. Leyh: Der digitale Arbeitsplatz – KMU zwischen Tradition und Wandel. HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik 54/6 (2017): S. 900-916.
- [Liu18] Y. Liu, J.-P. Prote, M. Molitor, G. Schuh: Framework for designing Production Systems 4.0. 8. WGP-Jahreskongress (2018).
- [Lödd16] H. Lödding: Verfahren der Fertigungssteuerung - Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 3. Auflage Springer Vieweg, (2016).
- [Lott18] E. Lotter, U. Müller: Moderne/smarte Montagearbeitsplätze im Umfeld der Industrie 4.0. In: Wagner, R. M. (Hrsg.): Industrie 4.0 für die Praxis, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [Loub19] S. Loubichi: IEC 62443: IT-Sicherheit für industrielle Automatisierungssysteme – eine Einführung in die Systematik. VGB PowerTech 6 (2019): S. 71-76.
- [Löwe15] T. Löwer, K. Jeschke: Zukunftsvision: Sind Sie reif für Industrie 4.0? Finanzquellen ausschöpfen und zukünftige Geschäftsmöglichkeiten schaffen - Expense Reduction Analysts Mittelstandstudie. Köln, 2015.
- [Luck13] D. Lucke: Smart Factory. In: Westkämper, E. et al. (Hrsg.): Digitale Produktion, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [Luck08a] D. Lucke, C. Constantinescu, E. Westkämper: Kontextbezogene Anwendungen in der Produktion: Smart factory - Gestern, Heute und in der Zukunft. wt Werkstattstechnik online 98/3 (2008): S. 138-142.
- [Luck08b] D. Lucke, C. Constantinescu, E. Westkämper: Smart Factory - A Step towards the Next Generation of Manufacturing. In: Mitsushishi, M.; Ueda, K.; Kimura, F. (Hrsg.): Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier, London: Springer London, 2008.
- [Luka14] U. von Lukas, A. Stork, J. Behr: Industrie 4.0 – Evolution statt Revolution - Visual Computing beflügelt die Industrie der Zukunft. wt Werkstattstechnik online 104/4 (2014): S. 255-257. <[http://www.werkstattstechnik.de/wt/article.php?data\[article_id\]=78140&keep_alive=yes&pos=>](http://www.werkstattstechnik.de/wt/article.php?data[article_id]=78140&keep_alive=yes&pos=>).
- [Ma09] J. Ma, Q. Zhang, Y. Wang, T. Luo: Construction of the Dependence Matrix Based on the TRIZ Contradiction Matrix in OOD. In: Tan, R.; Cao, G.; León, N. (Hrsg.): Growth and Development of Computer-Aided Innovation, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [Mada17] B.-J. Madauss: Projektmanagement. Springer Berlin Heidelberg, (2017).
- [Marr17] D. Marrenbach: Alle Technik hilft nichts, wenn die Mitarbeiter nicht mitziehen - Projektporträt. In: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.): Industrie 4.0 - Innovationen für die Produktion von morgen. Berlin: 2017.
- [Mart14] H. Martin: Transport- und Lagerlogistik - Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik. 9., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl. Springer Vieweg, (2014).
- [Masc15] R. Mascitelli, C.M. Thurnes: Mastering lean product development - Geschwindigkeit, Erfolg und Qualität der Produktentwicklung mit Lean-Events maximieren. 1. Aufl. Synnovating, (2015).
- [Matt19] D. Matt, E. Rauch, M. Unterhofer, M. Riedl, R. Brozzi: Industrie 4.0-Assessment als Orientierungshilfe für KMUs - Bewertungsmodell zur Festlegung und Priorisierung von Industrie 4.0-Umsetzungsmaßnahmen in KMUs. In: Gronau, N. (Hrsg.): Industrie 4.0 Management 3/2019 - Industrie 4.0 für den Mittelstand. 5302. Erstauflage. Berlin: GITO, 2019.
- [Matt18] D.T. Matt, M. Unterhofer, E. Rauch, M. Riedl, R. Brozzi: Industrie 4.0 Assessment - Bewertungsmodell zur Identifikation und Priorisierung von Industrie 4.0 Umsetzungsmaßnahmen in KMUs. In: Matt, D. (Hrsg.): KMU 4.0 - digitale Transformation in kleinen und mittelständischen Unternehmen, Berlin: GITO, 2018.
- [Mazz14] D. Mazzone: Digital or death - digital transformation - the only choice for business to survive, smash or conquer. Smashbox Consulting, (2014).

- [Mehm15] J. Mehmman, V. Frehe, F. Teuteberg: Crowd Logistics – A Literature Review and Maturity Model. Proceedings of Innovations and Strategies for Logistics and Supply Chains Vol. 20 (2015): S. 117.
- [Meis17] H. Meissner, R. Ilsen, J.C. Aurich: Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0. *Procedia CIRP* 62 (2017): S. 165-169.
- [Meis20] H.M. Meissner: Integrierte Arbeitsplanung und Produktionssteuerung cyber-physischer Produktionssysteme. Dissertation, TU Kaiserslautern, (2020).
- [Meno16] K. Menon, H. Kärkkäinen, L. Lasrado: Towards a maturity modeling approach for the implementation of industrial internet. Proceeding of the 20th Pacific Asia Conference on Information Systems (PACIS 2016): June 27-27 July 1, 2016 (2016).
- [Mera14] R. Meran, A. John, C. Staudter, O. Roenpage, S. Lunau: Six Sigma+Lean Toolset - Mindset zur erfolgreichen Umsetzung von Verbesserungsprojekten. 5. Aufl. 2014 Springer Gabler, (2014).
- [Merz16] S.L. Merz, D. Siepmann: Industrie 4.0 – Vorgehensmodell für die Einführung. In: Roth, A. (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0 - Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, 2016.
- [Mett11] T. Mettler: Maturity assessment models: a design science research approach. *International Journal of Society Systems Science* 3/1/2 (2011): S. 81.
- [Mett10a] T. Mettler: Supply-Management im Krankenhaus. Konstruktion und Evaluation eines konfigurierbaren Reifegradmodells zur zielgerichteten Gestaltung. Dissertation, Universität St. Gallen, (2010).
- [Mett10b] T. Mettler: Vorschlag zur Wiederverwendung und Wiederauffindung von Reifegradmodellen. St. Gallen, 2010.
- [Meye09] Meyer, H.; Fuchs, F.; Thiel, K. (Hrsg.): Manufacturing execution systems - Optimal design, planning, and deployment. New York, NY, McGraw-Hill, 2009.
- [Meye19] L. Meyer, M. Seiz: Digitale Strategien im Mittelstand - Ökosysteme, neue Geschäftsmodelle und digitale Plattformen. München, 2019.
- [Mich90] K. Michel: Technologie im strategischen Management - Ein Portfolio-Ansatz zur integrierten Technologie- und Marktplanung. 2., unveränd. Aufl. E. Schmidt, (1990).
- [Micr20] Microsoft Media Relations: Microsoft Cloud Strength Fuels First Quarter Results. Earnings Release FY21 Q1. <<https://www.microsoft.com/en-us/Investor/earnings/FY-2021-Q1/press-release-webcast>> - 13.11.2020.
- [MIT11] MIT Center for Digital Business, Capgemini Consulting: Digital Transformation: A Roadmap for billion-dollar organizations. Cambridge, 2011.
- [Mitt20] S. Mittal, M.A. Khan, J.K. Purohit, K. Menon, D. Romero, T. Wuest: A smart manufacturing adoption framework for SMEs. *International Journal of Production Research* 58/5 (2020): S. 1555-1573.
- [Mono16] L. Monostori, B. Kádár, T. Bauernhansl, S. Kondoh, S. Kumara, G. Reinhart, O. Sauer, G. Schuh, W. Sihn, K. Ueda: Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65/2 (2016): S. 621-641.
- [Morl16] F. Morlock, T. Wienbruch, S. Leineweber, D. Kreimeier, B. Kuhlenkötter: Industrie 4.0-Transformation für produzierende Unternehmen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111/5 (2016): S. 306-309.
- [Müll18] E. Müller, M. Tawalbeh, H. Hopf: Reifegradbestimmung als Vorstufe der Industrie 4.0-Strategieentwicklung. In: Matt, D. (Hrsg.): *KMU 4.0 - digitale Transformation in kleinen und mittelständischen Unternehmen*, Berlin: GITO, 2018.
- [Müll17] K. Müller-Jones et al.: Digitalisierung - Deutschland endlich auf dem Sprung? Berlin, 201726.12.2017.
- [MÜN15] MÜNCHNER KREIS e.V. et al.: Digitalisierung. Achillesferse der deutschen Wirtschaft? Wege in die digitale Zukunft - Zukunftsstudie MÜNCHNER KREIS Band VI. München, 201527.08.2020.
- [Munc17] J.C. Munck, C. Schneider, F. Futterer, R. Gleich: Technologien der Industrie 4.0 - Status quo, wirtschaftliche Bedeutung und Trends für Unternehmen der produzierenden Industrie. *Industrie 4.0 Management - Betriebssysteme für Fabriken* 33/6 (2017): S. 48-52.
- [Näh18] H.T. Nähler: TRIZ-online. <<http://www.triz-online.de/index.php?id=5497>> - 07.08.2018.
- [Nayy20] Nayyar, A.; Kumar, A. (Hrsg.): A roadmap to industry 4.0 - Smart production, sharp business and sustainable development. Cham, Springer, 2020.
- [Neff14] A.A. Neff, F. Hamel, T.P. Herz, F. Uebernickel, W. Brenner, J. Vom Brocke: Developing a maturity model for service systems in heavy equipment manufacturing enterprises. *Information & Management* 51/7 (2014): S. 895-911.
- [Nieb15] T. Niebel, J. Ohnemus, S. Viete: Industrie 4.0: Digitale (R)Evolution der Wirtschaft - IKT-Report. Unternehmensbefragung zur Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien. Mannheim, 2015.
- [Niek10] C. Nieke, M. Henk: Die Erstellung eines Baukastens für das Internet der Dinge. In: Günthner, W.; Hompel, M. ten (Hrsg.): *Internet der Dinge in der Intralogistik*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [Nöhr16] F. Nöhring, T. Wienzek, R. Wöstmann, J. Deuse: Industrie 4.0 in nicht F&E-intensiven Unternehmen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111/6 (2016): S. 376-379.

- [Nöhr18] F. Nöhring, R. Wöstmann, J. Deuse: Auswahlhilfe für Industrie 4.0-Lösungen. In: Wagner, R. M. (Hrsg.): Industrie 4.0 für die Praxis, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [Nöhr19] F. Nöhring, R. Wöstmann, T. Wienzek, J. Deuse: Socio-Technical Capability Assessment to Support Implementation of Cyber-Physical Production Systems in Line with People and Organization. In: Nunes, I. L. (Hrsg.): Advances in Human Factors and Systems Interaction, Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [Nyhu08] Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme - Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen, PZH Produktionstechnisches Zentrum, 2008.
- [Ober19] R. Obermaier: Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation - Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen. Springer Fachmedien Wiesbaden, (2019).
- [Olefl18] A. Oleff, N. Malessa: Strategischer Ansatz zur Industrie 4.0-Transformation. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113/3 (2018): S. 173-177.
- [Oleś19] J. Oleśków-Szłapka, A. Stachowiak: The Framework of Logistics 4.0 Maturity Model. In: Burduk, A. et al. (Hrsg.): Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance, Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [Oliv11] M.P.V. de Oliveira, M. Bronzo, K. P.: The Supply Chain Process Management Maturity Model – SCPM3. In: Daud, A.; Zailani, S. (Hrsg.): Lean Supply Chain Practices and Performance in the Context of Malaysia, INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [Orze18] G. Orzes, E. Rauch, S. Bednar, R. Poklemba: Industry 4.0 Implementation Barriers in Small and Medium Sized Enterprises: A Focus Group Study. 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), (2018 - 2018): S. 1348-1352.
- [Orze20] G. Orzes, R. Poklemba, W.T. Towner: Implementing Industry 4.0 in SMEs: A Focus Group Study on Organizational Requirements. In: Matt, D. T.; Modrák, V.; Zsifkovits, H. (Hrsg.): Industry 4.0 for SMEs, Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [Ott17] M. Ott, C. Leyh: Digitalisierung in kleinen und mittleren Unternehmen - Wie digitalisiert sehen sich die Unternehmen und wie digitalisiert sind diese tatsächlich? Industrie 4.0 Management 3 (2017): S. 21-25.
- [Paav17] M. Paavel, K. Karjust, J. Majak: PLM Maturity Model Development and Implementation in SME. Procedia CIRP 63 (2017): S. 651-657.
- [Pacc19] A.P.T. Pacchini, W.C. Lucato, F. Facchini, G. Mummolo: The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0. Computers in Industry 113 (2019): S. 103125.
- [Papp84] C. Pappas: Strategic management of technology. Journal of Product Innovation Management 1/1 (1984): S. 30-35.
- [Pelz16] N. Pelzl, A. Helfferich, G. Herzwurm: Entwicklung und Evaluation eines Reifegradmodells für das Cloud-Produktmanagement. MKWI 2016 – IT- und Software-Produktmanagement in IoT-basierten Infrastrukturen (2016).
- [Pete17] M.K. Peter: KMU-Transformation: Als KMU die Digitale Transformation erfolgreich umsetzen - Forschungsergebnisse und Praxisleitfaden. FHNW, (2017).
- [Peuk20] S. Peukert, S. Treber, S. Balz, B. Haefner, G. Lanza: Process model for the successful implementation and demonstration of SME-based industry 4.0 showcases in global production networks. Production Engineering 7/2 (2020): S. 31.
- [Pfab17] D. Pfab: Der Mensch im Mittelpunkt der Produktion - Projektporträt. In: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.): Industrie 4.0 - Innovationen für die Produktion von morgen. Berlin: 2017.
- [Pfei90] W. Pfeiffer, R. Dögl: Das Technologie-Portfolio-Konzept zur Beherrschung der Schnittstelle Technik und Unternehmensstrategie. In: Hahn, D.; Taylor, B. (Hrsg.): Strategische Unternehmensplanung / Strategische Unternehmensführung, Heidelberg: Physica-Verlag HD, 1990.
- [Pfei91] W. Pfeiffer, G. Metzke, W. Schneider, R. Amler: Technologie-Portfolio zum Management strategischer Zukunftsgeschäftsfelder. 6., durchges. Aufl. Vandenhoek & Ruprecht, (1991).
- [Pier20] M. Pier, C. Siedler, S. Dupont, K.J. Zink, J.C. Aurich: Digitalisierung für Mensch und Organisation im AfterSales. In: Jeske, T.; Lennings, F. (Hrsg.): Produktivitätsmanagement 4.0 - Praxiserprobte Vorgehensweisen zur Nutzung der Digitalisierung in der Industrie. 1. Auflage 2020. Berlin: Springer Berlin; Springer Vieweg, 2020.
- [Pier18] C. Pierenkemper, M. Drewel, J. Gausemeier: Zukunftsorientierte Leistungssteigerung von Unternehmen durch Industrie 4.0. In: Smajic, H. (Hrsg.): Tagungsband AALE 2018 - Das Forum für Fachleute der Automatisierungstechnik aus Hochschulen und Wirtschaft: 15. Fachkonferenz, 1.-2. März 2018 in Köln. Berlin, Offenbach: VDE VERLAG, 2018.
- [Pier19] C. Pierenkemper, J. Reinhold, R. Dumitrescu, J. Gausemeier: Erfolg versprechende Industrie 4.0-Zielposition. Industrie 4.0 Management 2019/5 (2019): S. 30-34.
- [Piro19] F. Pirola, C. Cimini, R. Pinto: Digital readiness assessment of Italian SMEs: a case-study research. Journal of Manufacturing Technology Management ahead-of-print/ahead-of-print (2019): S. 61.
- [Pirv16] B.-C. Pirvu, C.-B. Zamfirescu, D. Gorecky: Engineering insights from an anthropocentric cyber-physical system: A case study for an assembly station. Mechatronics 34 (2016): S. 147-159.

- [Plas16a] C. Plass: Digitale Geschäftsprozesse und -modelle verändern die Arbeitswelt. 2. Aufl. Paderborn, 2016.
- [Plas16b] C. Plass: Vernetzt arbeiten. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111/10 (2016): S. 650-652.
- [Plas15] C. Plass: Industrie 4.0 als Chance begreifen. Paderborn, 2015.
- [Plat17] Platform Industrie 4.0: Progress Report April 2017 - Shaping Industrie 4.0: Pioneering. Networked. Based on everyday practice. Berlin, 2017.
- [Pokh15] C. Pokhrel, C. Cruz, Y. Ramirez, A. Kraslawski: Adaptation of TRIZ contradiction matrix for solving problems in process engineering. Chemical Engineering Research and Design 103 (2015): S. 3-10.
- [Poko17] B. Pokorni, S. Schlund, S. Findeisen, A. Tomm, D. Euper, D. Mehl, N. Brehm, D. Ahmad, P. Ohlhausen, D. Palm: Produktionsassessment 4.0. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112/1-2 (2017): S. 20-24.
- [Prob91] G.J.B. Probst, P. Gomez: Vernetztes Denken. Gabler Verlag, (1991).
- [Proj17] I. Project Management Institute: A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)—Sixth Edition (ENGLISH). 6th ed. Project Management Institute, (2017).
- [Qin16] J. Qin, Y. Liu, R. Grosvenor: A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. Procedia CIRP 52 (2016): S. 173-178.
- [Rach14] S. Rachuri, S. Jain: Maturity Model Concepts for Sustainable Manufacturing. Gaithersburg, 2014.
- [Ramm05] C. Rammer et al.: Innovationsverhalten der Unternehmen im Land Bremen. Beitrag zum Innovationsbericht Bremen 2004 - Studie im Auftrag des Senators für Wirtschaft und Häfen der Freien Hansestadt Bremen. Mannheim, 200527.08.2020.
- [Rauc20] E. Rauch, M. Unterhofer, R.A. Rojas, L. Gualtieri, M. Woschank, D.T. Matt: A Maturity Level-Based Assessment Tool to Enhance the Implementation of Industry 4.0 in Small and Medium-Sized Enterprises. Sustainability 12/9 (2020): S. 3559.
- [Rehd14] E. Rehder, A. Schatz: Reifegradbasierte Kopplung – koordinierte Selbststeuerung für dezentrale Produktionssysteme. wt Werkstattstechnik online 104/3 (2014): S. 129-133.
- [Rein12] G. Reinhart, S. Schindler: Strategic Evaluation of Technology Chains for Producing Companies. In: EIMaraghy, H. A. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [Rein15] Reinhart, G. (Hrsg.): Intelligente Vernetzung in der Fabrik - Industrie 4.0 Umsetzungsbeispiele für die Praxis. Stuttgart, Fraunhofer-Verl., 2015.
- [Rein13] G. Reinhart, P. Engelhardt, F. Geiger, T.R. Philipp, W. Wahlster, D. Zühlke, J. Schlick, T. Becker, M. Löckelt, B. Pirvu, P. Stephan, S. Hodek, B. Scholz-Reiter, K.-D. Thoben, C. Gorltd, K.A. Hribernik, D. Lappe, M. Veigt: Cyber-physische Produktionssysteme - Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik. wt Werkstattstechnik online 103/2 (2013): S. 84-89.
- [Reis14] J.P. Reis: Towards an Industrial Agent Oriented Approach for Conflict Resolution. DSIE'14 - 9th Doctoral Symposium in Informatics Engineering (2014): S. 1-12.
- [Reut16] C. Reuter, T. Gartzten, J.-P. Prote, B. Fränken: Industrie-4.0-Audit. VDI-Z Integrierte Produktion 06 (2016): S. 62-65.
- [Rimm16] S.O. Rimmelspacher: MetamoFAB. <<http://metamofab.de/>> - 27.12.2017.
- [Risc15] M.-C. Rische, F. Schlitte, H. Vöpel: Industrie 4.0 – Potenziale am Standort Hamburg - Studie im Auftrag der Handelskammer Hamburg. Hamburg, 2015.
- [Rock14] Rockwell Automation Inc.: The Connected Enterprise Maturity Model - How ready is your company to connect people, processes, and technologies for bigger profits? Milwaukee, 2014.
- [Rohr10] R. Rohrbeck: Harnessing a network of experts for competitive advantage - Technology scouting in the ICT industry. R&D Management 40/2 (2010): S. 169-180.
- [Rohr07] R. Rohrbeck: Technology Scouting – a case study on the Deutsche Telekom Laboratories. ISPIM-Asia 2007 Conference (2007): S. 1-14.
- [Roth16] Roth, A. (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0 - Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin, Heidelberg, Springer Gabler, 2016.
- [Roth11] A. Roth, H. Dineiro: Integriertes Projekt- und Change-Management: Aus gutem Grund. In: Mayer, T.-L. (Hrsg.): Advanced project management - Herausforderungen - Praxiserfahrungen - Perspektiven. 2. Aufl. Berlin: Lit, 2011.
- [Rübe18] S. Rübel, A. Emrich, S. Klein, P. Loos: A maturity model for business model management in Industry 4.0. In: Drews, P. et al. (Hrsg.): Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2018 - Data driven X - Turning Data into Value : Leuphana Universität Lüneburg, 6.-9. März 2018. Lüneburg: Leuphana Universität Lüneburg Institut für Wirtschaftsinformatik, 2018.
- [Rudo06] H. Rudolf: Wissensbasierte Montageplanung in der digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie. Dissertation, Technische Universität München, (2006).
- [Rüeg17] J. Rüegg-Stürm, S. Grand: Das St. Galler Management-Modell. 3., überarbeitete und weiterentwickelte Auflage Haupt, (2017).

- [Salm16] M. Salmen: Gestaltungsmodell für den digital vernetzten Shopfloor im Werkzeugbau. Dissertation, RWTH Aachen, (2016).
- [Sauc18] J.A. Saucedo-Martínez, M. Pérez-Lara, J.A. Marmolejo-Saucedo, T.E. Salais-Fierro, P. Vasant: Industry 4.0 framework for management and operations: a review. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 9/3 (2018): S. 789-801.
- [Sauc11] O. Sauer: Informatiostechnik in der Fabrik der Zukunft: Fabrik 4.0. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 106/12 (2011): S. 955-962.
- [Saus06] B. Sauser, D. Verma, J. Ramirez-Marquez, R. Gove: From TRL to SRL - The concept of systems readiness levels. *Conference on Systems Engineering Research* (2006).
- [Savr00] S.D. Savransky: *Engineering of creativity - Introduction to TRIZ methodology of inventive problem solving*. CRC Press, (2000).
- [Scha16] Schallmo, D. (Hrsg.): *Jetzt digital transformieren - So gelingt die erfolgreiche Digitale Transformation Ihres Geschäftsmodells*. Wiesbaden, Springer Gabler, 2016.
- [Scha18] J. Schallow, A. Hengstbeck, J. Deuse: *Industrie 4.0 – eine Bestandsaufnahme*. In: Wagner, R. M. (Hrsg.): *Industrie 4.0 für die Praxis*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [Sche03] A.-W. Scheer, F. Abolhassan, W. Jost, M. Kirchner: *Change Management im Unternehmen - Prozessveränderungen erfolgreich managen*. Springer, (2003).
- [Sche14] Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E. (Hrsg.): *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [Schi17] C. Schibler et al.: *EY Studie über IoT und Industrie 4.0 - Die Schweiz im Fokus*. Basel, 2017.
- [Schl18] K.D. Schlicher, A. Paruzel, B. Steinmann, G.W. Maier: *Change Management für die Einführung digitaler Arbeitswelten*. In: Maier, G. W.; Engels, G.; Steffen, E. (Hrsg.): *Handbuch Gestaltung digitaler und vernetzter Arbeitswelten*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [Schm15] P.P. Schmidt, A. Fay: *Applying the Domain-Mapping-Matrix to Identify the Appropriate Level of Detail of Simulation Models for Virtual Commissioning*. *IFAC-PapersOnLine* 48/10 (2015): S. 69-74.
- [Scho15] Scholze-Stubenrecht, W. (Hrsg.): *Duden, Deutsches Universalwörterbuch - [das umfassende Bedeutungs-wörterbuch der deutschen Gegenwartssprache]*. 8., überarb. und erw. Aufl. Berlin, Dudenverl., 2015.
- [Schö18a] A. Schönmann, R. Dobler, A. Hofer, G. Reinhart: *Planung und Bewertung von Produktionstechnologien*. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113/1-2 (2018): S. 7-11.
- [Schö18b] H. Schöpfer, S. Lodemann, F. Dörries, W. Kersten: *Digitalisierung deutscher KMU im Branchenvergleich - Warum Unternehmen genau auf ihre Kompetenzen schauen sollten*. *Industrie 4.0 Management* 34/2 (2018): S. 38-42.
- [Schu17a] G. Schuh et al.: *Industrie 4.0 Maturity Index - Managing the Digital Transformation of Companies*. Paderborn, 2017.
- [Schu15] G. Schuh et al.: *Konsortial-Benchmarking »Production Systems« - Studienergebnisse & Projekt-highlights*. Aachen, 2015.
- [Schu14] G. Schuh, H. Bachmann, K. Apfel, P. Kabasci, F. Lau: *Erfolgreiche Technologieführerkennung – von der Pflicht bis zur Kür*. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 109/11 (2014): S. 796-800.
- [Schu17b] G. Schuh, A. Bernady, V. Zeller, V. Stich: *New Requirement Analysis Approach for Cyber-Physical Systems in an Intralogistics Use Case*. In: Camarinha-Matos, L. M.; Afsarmanesh, H.; Fornasiero, R. (Hrsg.): *Collaboration in a Data-Rich World*, Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [Schu11] G. Schuh, S. Klappert: *Technologiemanagement*. Springer Berlin Heidelberg, (2011).
- [Schu17c] G. Schuh, J.-P. Prote, S. Dany, W. Eversheim: *Internet of Production*. In: Schuh, G. et al. (Hrsg.): *Engineering valley - Internet of production auf dem RWTH Aachen Campus*, 1. Auflage. Aachen: Apprimus Verlag, 2017.
- [Schu18] S. Schuler: *Migrationsunterstützung für die Umsetzung menschenzentrierter Cyber-Physical Systems (MyCPS)*. <<https://mycpstoolbox.de/>> - 01.07.2020.
- [Schu91] S. Schulte: *Logistik - Wege zur Optimierung des Material- und Informationsflusses*. Vahlen, (1991).
- [Schu16] A. Schumacher, S. Erol, W. Sihn: *A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises*. *Procedia CIRP* 52 (2016): S. 161-166.
- [Schu19] A. Schumacher, T. Nemeth, W. Sihn: *Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises*. *Procedia CIRP* 79 (2019): S. 409-414.
- [Schw17a] K. Schwab: *The fourth industrial revolution*. First U.S. edition Crown Business, (2017).
- [Schw17b] C. Schwarz, M. Schmitt: *Reifegradmodell für Lean Production*. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112/7-8 (2017): S. 506-509.
- [Seit17] M. Seiter: *Produktionsdaten für die Verbesserung von Prozess- und Produktqualität nutzen - Projektporträt*. In: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.): *Industrie 4.0 - Innovationen für die Produktion von morgen*. Berlin: 2017.
- [Seit16] M. Seiter, C. Bayrl, S. Berlin, U. David, M. Rusch, O. Treusch: *Roadmap Industrie 4.0 - Ihr Weg zur erfolgreichen Umsetzung von Industrie 4.0*. tredition GmbH, (2016).

- [Seit08] M. Seiter, J. Isensee, C. Rosentritt: Evaluation of RFID Investments - The Extended Performance Analysis (EPA) Approach. In: European Workshop on RFID Systems and Technologies; Informationstechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): RFID SysTech 2008 - 4th European Workshop on RFID Systems and Technologies : June 10-11, 2008 in Freiburg, Germany, Institute of Computer Science and Social Studies (IG), University of Freiburg in Germany. Berlin: VDE VERLAG, 2008.
- [Send18] Sendler, U. (Hrsg.): The Internet of Things - Industrie 4.0 Unleashed. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [Send13] Sendler, U. (Hrsg.): Industrie 4.0 - Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM. Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, 2013.
- [Shin85] S. Shingo, A.P. Dillon, N. Bodek: A Revolution in Manufacturing - The SMED System. Routledge, (1985).
- [Sieb06] A. Siebe, A. Fink: Handbuch Zukunftsmanagement - Werkzeuge der strategischen Planung und Früherkennung. 1. Aufl. Campus Verlag GmbH, (2006).
- [Sieb10] K. Siebertz, D. van Bebber, T. Hochkirchen: Statistische Versuchsplanung. Springer Berlin Heidelberg, (2010).
- [Sied20a] C. Siedler, S. Dupont, T. Ehemann, F. Zeihsel, C. Sinnwell, J.C. Aurich: Vorgehen zur Anwendung des Transformationskonzepts. In: Aurich, J. C. et al. (Hrsg.): Bedarfsgerechte Digitalisierung von Produktionsunternehmen - Ein modulares Transformationskonzept als praxisorientierter Ansatz. Kaiserslautern: Synnovating, 2020.
- [Sied20b] C. Siedler, S. Dupont, M. Tafvizi Zavareh, F. Zeihsel, J.C. Aurich: Das Transformationskonzept im Überblick. In: Aurich, J. C. et al. (Hrsg.): Bedarfsgerechte Digitalisierung von Produktionsunternehmen - Ein modulares Transformationskonzept als praxisorientierter Ansatz. Kaiserslautern: Synnovating, 2020.
- [Sied20c] C. Siedler, S. Dupont, M. Tafvizi Zavareh, F. Zeihsel, J.C. Aurich: Reifegradmodell zur Bestimmung des Digitalisierungsgrads. In: Aurich, J. C. et al. (Hrsg.): Bedarfsgerechte Digitalisierung von Produktionsunternehmen - Ein modulares Transformationskonzept als praxisorientierter Ansatz. Kaiserslautern: Synnovating, 2020.
- [Sied21] C. Siedler, S. Dupont, M. Tafvizi Zavareh, F. Zeihsel, T. Ehemann, C. Sinnwell, J.C. Göbel, K.J. Zink, J.C. Aurich: Maturity model for determining digitalization levels within different product lifecycle phases. Production Engineering (2021).
- [Sied19a] C. Siedler, P. Langlotz, J.C. Aurich: Identification of interactions between digital technologies in manufacturing systems. Procedia CIRP 81 (2019): S. 115-120.
- [Sied20d] C. Siedler, P. Langlotz, J.C. Aurich: Modeling and assessing the effects of digital technologies on KPIs in manufacturing systems. Procedia CIRP 93 (2020): S. 682-687.
- [Sied19b] C. Siedler, S. Sadaune, M.T. Zavareh, M. Eigner, K.J. Zink, J.C. Aurich: Categorizing and selecting digitization technologies for their implementation within different product lifecycle phases. Procedia CIRP 79 (2019): S. 274-279.
- [Sied20e] C. Siedler, C. Sinnwell, J.C. Aurich: Herangehensweise zur pilothaften Konzeptumsetzung. In: Aurich, J. C. et al. (Hrsg.): Bedarfsgerechte Digitalisierung von Produktionsunternehmen - Ein modulares Transformationskonzept als praxisorientierter Ansatz. Kaiserslautern: Synnovating, 2020.
- [Sies17] G. Siestrup, D. Zeeb: Reifegradbestimmung: der Weg zur Supply Chain 4.0. Industrie 4.0 Management 33/3 (2017): S. 59-62.
- [Simo15] C. Simon: Reifegradmodelle für Spezifische Prozesse. In: Barton, T.; Albayrak, C. A. (Hrsg.): Prozesse, Technologie, Anwendungen, Systeme und Management 2015 - Angewandte Forschung in der Wirtschaftsinformatik. Heide: mana-Buch, 2015.
- [Sinn20a] C. Sinnwell, C. Siedler, M. Pier, F. Jenne, S. Braun, M. Schuck, F. Zeihsel, K.J. Zink, J.C. Göbel, J.C. Aurich: Ausgangssituation und Ziele des Projekts InAsPro. In: Aurich, J. C. et al. (Hrsg.): Bedarfsgerechte Digitalisierung von Produktionsunternehmen - Ein modulares Transformationskonzept als praxisorientierter Ansatz. Kaiserslautern: Synnovating, 2020.
- [Sinn20b] C.F.D. Sinnwell: Methode zur Produktionssystemkonzipierung auf Basis früherer Produktinformationen - Ein Beitrag zur Integration von Produktionssystemplanung und Produktentwicklung unter Einsatz des MBSE. Dissertation, TU Kaiserslautern, (2020).
- [Siro20] N.V. Sirotkina, E.V. Shkarupeta, O.G. Shalnev, N.V. Kolosova, I.I. Pereslavtseva, O.A. Popova: Digital Transformation Methodology of Industrial Enterprises. Proceedings of the Russian Conference on Digital Economy and Knowledge Management (RuDeCK 2020) (2020): S. 606-610.
- [Sopa20] A. Sopadang, N. Chonsawat, S. Ramingwong: Smart SME 4.0 Implementation Toolkit. In: Matt, D. T.; Modrák, V.; Zsifkovits, H. (Hrsg.): Industry 4.0 for SMEs, Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [Spat13] Spath, D. (Hrsg.): Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0 - [Studie]. Stuttgart, Fraunhofer-Verl., 2013.
- [Spat03] Spath, D. (Hrsg.): Ganzheitlich produzieren - Innovative Organisation und Führung. Stuttgart, LOG_X Verl., 2003.

- [Spec14] D. Specht, N. Höltz, A. Hahn: Entwicklung von Reifegradmodellen am Beispiel des Lean Logistics Maturity Model. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109/11 (2014): S. 809-813.
- [Stat19] Statistisches Bundesamt: Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) in Deutschland. 2019.
- [Stat15] Statistisches Bundesamt: Unternehmen und Arbeitsstätten. Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien in Unternehmen. Wiesbaden, 201527.08.2020.
- [Stec18] T. Steckenreiter, T. Pötter, C. Riehle: Industrie 4.0 ist kein digitaler Wandel, sondern eine Revolution (Teil 1). Industrie 4.0 Management 34/2 (2018): S. 43-47.
- [Stew81] D.V. Steward: The design structure system: A method for managing the design of complex systems. IEEE Transactions on Engineering Management EM-28/3 (1981): S. 71-74.
- [Stub20] M. Stubbe, M. Pier, C. Siedler: Digitalisierung für Mensch und Organisation im Aftersales. In: Aurich, J. C. et al. (Hrsg.): Bedarfsgerechte Digitalisierung von Produktionsunternehmen - Ein modulares Transformationskonzept als praxisorientierter Ansatz. Kaiserslautern: Synnovating, 2020.
- [Tafv18] M. Tafvizi Zavareh, S. Sadaune, C. Siedler, J.C. Aurich, K.J. Zink, M. Eigner: A Study on the socio-technical Potentials of industrial Product Development Technologies for future digitized integrated Work Systems. NordDesign (2018).
- [Telu18] A. Telukdarie, E. Buhulaiga, S. Bag, S. Gupta, Z. Luo: Industry 4.0 implementation for multinationals. Process Safety and Environmental Protection 118 (2018): S. 316-329.
- [Ters18] S. Terstegen, M.A. Weber, F. Lennings, D. Kese: Ganzheitliche Nutzung der Digitalisierung für Arbeitsprozesse - Reifegradanalyse für Prozesse und deren Optimierung unter Verwendung eines Ordnungsrahmens für Produktivitätsstrategien. Industrie 4.0 Management 34/2 (2018): S. 12-16.
- [Thul15] M.J. Thul, J. Longmuß, K.J. Zink, U. Steimle, K. Lange, W. Kötter: Modelle für einen erfolgreichen Veränderungsprozess. In: Zink, K. J. et al. (Hrsg.): Veränderungsprozesse erfolgreich gestalten, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [Timi17] H. Timinger: Modernes Projektmanagement - Mit traditionellem, agilem und hybridem Vorgehen zum Erfolg. 1. Auflage Wiley, (2017).
- [Trot19] D. Trotta, P. Garengo: Assessing Industry 4.0 Maturity: An Essential Scale for SMEs. 2019 8th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM), (2019 - 2019): S. 69-74.
- [Tsch15] S. Tschöpe, K. Aronska, P. Nyhuis: „Was ist eigentlich Industrie 4.0?“ - Eine quantitative Datenbankanalyse liefert einen Einblick. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 110/3 (2015): S. 145-149.
- [Uhlm15] E. Uhlmann, B. Schallock, F. Otto: Intelligente Werkstattfertigung - Steuerung von Serienprodukten für die Werkstattfertigung mit Industrie 4.0-Lösungen. wt Werkstatttechnik online 4/2 (2015): S. 184-189.
- [Ulas19] D. Ulas: Digital Transformation Process and SMEs. Procedia Computer Science 158 (2019): S. 662-671.
- [Univ13] Universität Potsdam, SAS Institute GmbH: Wettbewerbsfaktor Analytics - Kennen Sie Ihren Analytics-Reifegrad? Potsdam, 2013.
- [Urb12] J. Urbanski, M. Weber: Big Data im Praxiseinsatz – Szenarien, Beispiele, Effekte. Berlin, 2012.
- [van 97] R.J. van Wyk: Strategic technology scanning. Technological Forecasting and Social Change 55/1 (1997): S. 21-38.
- [VDI13] VDI - Verein Deutscher Ingenieure, VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik: Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation. <https://www.vdi.de/uploads/media/Stellungnahme_Cyber-Physical_Systems.pdf> - 26.12.2017.
- [VDI70] VDI 2411: Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen. Beuth Verlag, (1970).
- [VDI19] VDI 2689: Leitfaden für Materialflussuntersuchungen. Beuth Verlag, (2019).
- [VDI04] VDI 4400-2: Logistikkennzahlen für die Produktion. Beuth Verlag, (2004).
- [VDI08] VDI 4499-1: Digitale Fabrik - Grundlagen. Beuth Verlag, (2008).
- [Vent15] Ventana Systems Inc.: Vensim. <<https://vensim.com/>> - 28th December 2019.
- [Vest15] F. Vester: Die Kunst vernetzt zu denken - Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome; [der neue Bericht an den Club of Rome. 10. Aufl. Dt. Taschenbuch-Verl., (2015).
- [Vial19] G. Vial: Understanding digital transformation: A review and a research agenda. The Journal of Strategic Information Systems (2019).
- [Voge12] B. Vogel-Heuser, G. Bayrak, U. Frank: Forschungsfragen in „Produktionsautomatisierung der Zukunft“. München, 201226.12.2017.
- [Voig19] K.-I. Voigt, J.M. Müller, J.W. Veile, W. Becker, M. Stradtman: Industrie 4.0 – Risiken für kleine und mittlere Unternehmen. In: Becker, W. et al. (Hrsg.): Geschäftsmodelle in der digitalen Welt - Strategien, Prozesse und Praxiserfahrungen. Wiesbaden, Germany: Springer Gabler, 2019.
- [Wagn08] K.W. Wagner, W. Dürr: Reifegrad nach ISO/IEC 15504 (SPICE) ermitteln. Hanser Verlag, (2008).
- [Wagn18] Wagner, R.M. (Hrsg.): Industrie 4.0 für die Praxis. Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.

- [Walt20] F. Walter: In 5 Schritten Ziele übersichtlich darstellen (mit der Zielhierarchie). <<https://erfolgreich-projekte-leiten.de/zielhierarchie/>> - 15.10.2020.
- [Wars15] Warschat, J. (Hrsg.): Technologien frühzeitig erkennen, Nutzenpotenziale systematisch bewerten - Methoden, Organisation, semantische Werkzeuge zur Informationsgewinnung und -speicherung; Ergebnisse des Verbundforschungsprojektes syncTech - synchronisierte Technologieadaption als Treiber der strategischen Produktinnovation. Stuttgart, Fraunhofer-Verlag, 2015.
- [Wasc18] L. von Wascinski, M. Weiß, M. Tilebein: Industrie 4.0 für die Textil- und Bekleidungsindustrie - Potenziale, Herausforderungen und KMU-spezifische Ansätze. In: Matt, D. (Hrsg.): KMU 4.0 - digitale Transformation in kleinen und mittelständischen Unternehmen, Berlin: GITO, 2018.
- [Webe79] Weber: Produktionstechnik und -verfahren - Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. 1. Aufl. (1979).
- [Webe17] C. Weber, J. Königsberger, L. Kassner, B. Mitschang: M2DDM – A Maturity Model for Data-Driven Manufacturing. *Procedia CIRP* 63 (2017): S. 173-178.
- [Weck12] A. Weckenmann, G. Akkasoglu: Maturity Determination of New Forming Processes Considering Uncertain Indicator Values. *Key Engineering Materials* 502 (2012): S. 97-102.
- [Weck13] A. Weckenmann, G. Akkasoglu: Methodic Design of a Customized Maturity Model for Geometrical Tolerancing. *Procedia CIRP* 10 (2013): S. 119-124.
- [Weid15] C. Weidig, C. Steimer, J.C. Aurich: Process Planning and Decentralised Process Control for Cyber-robotic Production Systems. 794 (2015): S. 486-493.
- [Wein17] Weinert, N.; Plank, M.; Ullrich, A. (Hrsg.): Metamorphose zur intelligenten und vernetzten Fabrik - Ergebnisse des Verbundforschungsprojekts MetamoFAB. Berlin, Springer Vieweg, 2017.
- [Well14] S. Wellsandt, K. Klein, M. Franke, K. Hribernik, K. Thoben: Semantic Data Integration for Ubiquitous Logistics - An Approach Supporting Autonomous Logistics in Urban Environments. *Proceedings of the 4th International Conference on Cloud Computing and Services Science*, (2014): S. 652-656.
- [Well13] S. Wellsandt, D. Werthmann, K. Hribernik, K. Thoben: Ubiquitous logistics: a business and technology concept based on shared resources. In: Cunningham, P.; Cunningham, M. (Hrsg.): *Proceedings of the eChallenges Conference (e-2013)*, Dublin: IIMC International Information Management Cooperation, 2013.
- [Welz15] C. Welzbacher et al.: Digitalisierung der Wertschöpfungs- und Marktprozesse – Herausforderungen und Chancen für das Handwerk – - Eine Vorstudie im Rahmen der Konzeption eines Demonstrations- und Kompetenzzentrums im Handwerk. Hannover, 201527.08.2020.
- [Wenz16] K. Wenzel: Fertigungsassistenzsystem unter Verwendung sozio-cyber-physischer Produktionssysteme (CyProAssis). <<http://www.cyproassist.de/>> - 08.03.2019.
- [West13a] E. Westkämper: Definition und Entwicklung der digitalen Produktion. In: Westkämper, E. et al. (Hrsg.): *Digitale Produktion*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [West13b] Westkämper, E. et al. (Hrsg.): *Digitale Produktion*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [West09] E. Westkämper, E. Zahn: *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen - Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Springer-Verlag, (2009).
- [Wien14] H.-P. Wiendahl: *Betriebsorganisation für Ingenieure - Mit 3 Tabellen*. 8., überarb. Aufl. Hanser, (2014).
- [Wien20] H.-P. Wiendahl, H.-H. Wiendahl: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 9., vollständig überarbeitete Auflage (2020).
- [Wien18] T. Wienzek: Vier Industrie 4.0-Strategietypen für die Praxis. In: Wagner, R. M. (Hrsg.): *Industrie 4.0 für die Praxis*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [Wild05] H. Wildemann: *Produktionssysteme - Leitfaden zur methodengestützten Reorganisation der Produktion*. 9. Aufl. TCW Transfer-Centrum für Produktions-Logistik u. Technologie-Management, (2005).
- [Wild16] S. Wildner, O. Koch, U. Weber: Stand und Entwicklungspfade der Digitalen Transformation in Deutschland. In: Obermaier, R. (Hrsg.): *Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe - Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2016.
- [Will16] S. Willeke, S. Kasselmann: Einführung interaktiver Assistenzsysteme über Reifegradmodelle. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111/11 (2016): S. 691-695.
- [Will17] S. Willeke, S. Kasselmann, M. Stonis: Einführungsbegleitung für interaktive Assistenzsysteme. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112/12 (2017): S. 869-872.
- [Will11] R. Williamson, J. Beasley: *Automotive Technology and Manufacturing Readiness Levels - A guide to recognised stages of development within the Automotive Industry*. 2011.
- [Wilm13] R. Wilmes: OPC UA als Kommunikationsbasis in der Industrie 4.0. Die SPS wird zum Bestandteil des CPS. <<https://www.elektroniknet.de/automation/industrie-40-iot/opc-ua-als-kommunikations-basis-in-der-industrie-4-0.100624.html>> - 25.11.2020.

- [Wink17a] Winkelhake, U. (Hrsg.): Die digitale Transformation der Automobilindustrie. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [Wink17b] U. Winkelhake: Roadmap einer nachhaltigen Digitalisierung. In: Winkelhake, U. (Hrsg.): Die digitale Transformation der Automobilindustrie, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [Wiss09] J. Wisser: Der Prozess Lagern und Kommissionieren im Rahmen des Distribution Center Reference Model (DCRM). Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), (2009).
- [Wolf91] B. Wolfrum: Strategisches Technologiemanagement. Gabler Verlag, (1991).
- [Wörd12] B. Wördenweber, M. Eggert, M. Schmitt: Die 5 Prinzipien für Innovation. In: Wördenweber, B.; Eggert, M.; Schmitt, M. (Hrsg.): Verhaltensorientiertes Innovationsmanagement, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [Wöst16] R. Wöstmann, F. Nöhring, J. Deuse: Katalog zur zielgerichteten Auswahl von Industrie 4.0-Lösungen. Betriebspraxis & Arbeitsforschung – Zeitschrift für angewandte Arbeitswissenschaft 03 (2016): S. 38-40.
- [Wöst17] R. Wöstmann, F. Nöhring, J. Deuse, R. Klinkenberg, T. Lacker: Big Data Analytics in der Auftragsabwicklung - Erschließung ungenutzter Potenziale in der variantenreichen Kleinserienfertigung. Industrie 4.0 Management 4 (2017).
- [Wüns08] G. Wunsch: Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme. Utz, (2008).
- [Yeo09] K.T. Yeo, Y. Ren: Risk management capability maturity model for complex product systems (CoPS) projects. Systems Engineering 12/4 (2009): S. 275-294.
- [Zäh06] M.F. Zäh, G. Wunsch, T. Hensel, A. Lindworsky: Nutzen der virtuellen Inbetriebnahme: Ein Experiment. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101/10 (2006): S. 595-599.
- [Zahn96] E. Zahn, U. Schmid: Grundlagen und operatives Produktionsmanagement - Mit 42 Tabellen. Lucius & Lucius, (1996).
- [Zarn07] R. Zarnekow: Produktionsmanagement von IT-Dienstleistungen - Grundlagen, Aufgaben und Prozesse. Springer, (2007).
- [ZDH14] ZDH - Zentralverband des Deutschen Handwerks, Deutscher Handwerkskammertag, Unternehmerverband Deutsches Handwerk: Digitalisierung der Geschäftsprozesse im Handwerk - Ergebnisse einer Umfrage unter Handwerksbetrieben im ersten Quartal 2014. Berlin, Handw, 2014.
- [Zeih20] F. Zeihsel, F. Hallfell: Implementierung im Softwaredemonstrator "Digitalisierungsplaner". In: Aurich, J. C. et al. (Hrsg.): Bedarfsgerechte Digitalisierung von Produktionsunternehmen - Ein modulares Transformationskonzept als praxisorientierter Ansatz. Kaiserslautern: Synnovating, 2020.
- [Zolé11] J.-F.d.P. Zoléco: Reifegradbasierte Planung eines organisatorischen Regelwerkes in einer Produktion. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, (2011).
- [Zürm10] M. Zürn: Referenzmodell für die Fabrikplanung auf Basis von Quality Gates. Jost-Jetter, (2010).

Verzeichnis im Themenbereich betreuter Studien- und Diplomarbeiten:

- | | |
|------------------------------|--|
| Petereit, Raphael | Identifikation und Bewertung von Digitalisierungstechnologien bezüglich ihrer Zuordnung zu verschiedenen Produktlebenszyklusphasen und ihrer Einsetzbarkeit in unterschiedlichen Unternehmen, (Bachelorarbeit) 2018 ¹ |
| de Oliveira, Ricardo Freitas | Identifikation und Bewertung von Digitalisierungsstrategien von Unternehmen in verschiedenen Produktlebenszyklusphasen, (Projektarbeit) 2018 ¹ |
| Strokosch, Sven | Analyse von Digitalisierungstechnologien und ihrem Einsatz in der Fertigung zur Qualitätssicherung, (Studienarbeit) 2018 ¹ |
| Litzenburger, Philipp | Entwicklung einer Methode zur Bestimmung des IST-Digitalisierungsgrads in Unternehmen, (Studienarbeit) 2018 ¹ |
| Ostermayer, Pascal | Analyse von Reifegradmodellen für die Digitalisierung in Unternehmen, (Studienarbeit) 2018 ¹ |
| Schüll, Julia | Vergleich und Bewertung von modularen Umsetzungs- und Einführungskonzepten hinsichtlich der Anwendbarkeit für Digitalisierungstechnologien, (Diplomarbeit) 2018 ¹ |
| Pouquet, Benoit | „Lean Management & I4.0“ – Theoretische Vereinbarkeit und praktische Anwendbarkeit zweier Kernparadigmen der Produktion, (Masterarbeit) 2019 ² |
| Potdevin, Jerome | Entwicklung und Umsetzung einer standardisierten Vorgehensweise zur Verbesserung des Materialflusses in einem produzierenden KMU am Beispiel der Vorkommissionierung und Layoutplanung, (Diplomarbeit) 2019 ¹ |
| Strokosch, Sven | Entwicklung eines Einführungskonzepts zur Integration von Digitalisierungstechnologien in die neue digitale Qualitätssicherung 4.0/ in die Qualitätssicherung der Zukunft, (Masterarbeit) 2019 ¹ |
| Schmolke, Jan | Recherche und Vergleich von (modularen) Umsetzungs- und Einführungskonzepten der Digitalisierung in der Produktion, (Studienarbeit) 2019 ¹ |
| Rao, Siddhanth | Integration of module variants of electric buses in a clocked pre-assembly, (Projektarbeit) 2019 ¹ |

Patil, Shruti	Entwicklung eines Konzepts zum Einsatz des digitalen Zwillings zur Simulation und Steuerung von physischen Materialflüssen, (Masterarbeit) 2019 ²
Elam Bharathi, Sri Vishnu	Definition von Testmethoden zur Überprüfung der funktionalen Sicherheit von elektronischen und mechanischen Anforderungen für MAHLE-Ölfiltermodule, (Masterarbeit) 2019 ²
Dagli, Dilara Pauli, Biana	Agile Planung von Produkt-Service Systemen, (Bachelorarbeit) 2019 ² Zusammenhänge und Wechselwirkungen von digitalen Technologien in der Produktion, (Studienarbeit) 2019 ¹
Fuslier, Damien	Entwicklung eines modularen Einführungskonzepts in der Produktion am Beispiel von Track & Trace-Technologien, (Studienarbeit) 2019 ¹
Neumeyer, Benedikt	Recherche und Evaluation von Technologiebewertungsmethoden für digitale Technologien, (Projektarbeit) 2020 ²
Storck, Alexander	Aufnahme und Vermessung von Produktionssystemen mittels Augmented Reality zur Erstellung eines Fabriklayouts, (Projektarbeit) 2020 ¹
Zhang, Fan	Bewertungstool für den Einsatz von Augmented Reality in Produktionssystemen, (Bachelorarbeit) 2020 ¹
Horn, Yannick	Machbarkeitsanalyse zum Anzeigen des Materialflusses durch Augmented Reality im Produktionssystem, (Projektarbeit) 2020 ¹
Knapp, Adrian	Analyse und Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von künstlichen neuronalen Netzen im Materialfluss am Beispiel der Automobilindustrie, (Studienarbeit) 2020 ²
Baldi, Angelo	Identifikation von Wechselwirkungen zwischen Technologien der I4.0 und den Elementen eines Ganzheitlichen Produktionssystems, (Masterarbeit) 2020 ²
Maihoff, Shuohong	Konzept zur Integration der Physiksimulation in die Steuerung cyber-physischer Produktionssysteme, (Studienarbeit) 2020 ²
Weber, Christian	Vergleichende Analyse und Bewertung klassischer und moderner Vorgehensweisen der Produktentwicklung, (Studienarbeit) 2020 ²
Kinkel, Yann	Nutzung von maschinellem Lernen zur Erkennung von Objekten in einer Fabrik, (Bachelorarbeit) 2020 ²
Kleber, Tabitha	Entwicklung und Implementierung einer Benutzeroberfläche für eine physikbasierte Materialflusssimulation, (Diplomarbeit) 2020 ²
Platz, Jaques	Einsatzmöglichkeiten von künstlichen neuronalen Netzen für Predictive Maintenance von Werkzeugmaschinen, (Projektarbeit) 2020 ²
Blum, Edwin	Einführung der Dichtheitsprüfung von Brennstoffzellen in den Montageprozess des eCitaro von Daimler Buses, (Studienarbeit) 2020 ²
Sethi, Zain Ul Abadin	Value stream analysis in prototype manufacturing of hybrid and electric vehicles, (Projektarbeit) 2020 ¹
Rao, Siddhanth	Optimierung der Sequenzierung bei JIS in der Nutzfahrzeugindustrie mit KI, (Masterarbeit) 2020 ¹
Groh, Arne	Vergleich und (Weiter-) Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Technologiereife von digitalen Technologien, (Studienarbeit) 2020 ¹
Schworm, Philipp	Entwicklung eines AR-basierten Digitalen Zwillings für ein Produktionsmodell, (Studienarbeit) 2020 ²
Foit, Florian	Identifikation der Wechselwirkungen zwischen I4.0 und Ganzheitlichen Produktionssystemen in einer Einzelfertigung, (Masterarbeit) 2020 ²
Brenkmann, Simon	Zusammenhänge und Wechselwirkungen von digitalen Technologien zwischen der Produktion und des Aftersales, (Studienarbeit) 2020 ¹
Wu, Xiangqian	Layout planning by using reinforcement learning and virtual reality, (Masterarbeit) 2020 ²
Storck, Alexander Gärtner, Daniel	Untersuchung der Potenziale des 4D-Drucks, (Masterarbeit) 2020 ² Analyse von Anwendungsfeldern von Quantentechnologien in der Produktion, (Studienarbeit) 2020 ²
Rossfeld, Jonas	Entwicklung eines Bewertungssystems für die Wechselwirkungen zwischen den Technologien der I4.0 und den Elementen eines Ganzheitlichen Produktionssystem anhand einer Massenproduktion, (Masterarbeit) 2020 ²
Jaques Platz Cetinkaya, Taner	Anwendungen von 5G in cyber-physischen Produktionssystemen, (Masterarbeit) 2021 ¹ Vergleichende Analyse und Bewertung von Ansätzen zu 5G in Produktionssystemen, (Studienarbeit), 2021 ¹
Jagtap, Rutika Kleine, Enno Ilg, Christian	Augmented Worker in cyber-physical manufacturing systems, (Masterarbeit), 2021 ¹ Augmented Reality-basierte Wartung einer Werkzeugmaschine, (Masterarbeit), 2021 ¹ Entwicklung und Aufbau der Mechanik einer prototypischen Werkzeugmaschine, (Studienarbeit) 2021 ¹
Fischer, Erik	Implementierung einer Maschinensteuerung für eine prototypische Werkzeugmaschine, (Studienarbeit) 2021 ¹

Chmielewski, Philipp	Entwicklung eines Digitalen Zwillings zur Steuerung einer prototypischen Werkzeugmaschine, (Studienarbeit) 2021 ¹
Shala, Drilon	Kollaboration zwischen Mensch und Roboter, (Projektarbeit) 2021 ¹

¹ Erstbetreuung

² Zweitbetreuung

9 Anhang

9.1 Übersicht existierender Transformationskonzepte

9.1.1 Ansätze zur Digitalisierung produzierender Unternehmen

Tabelle 9-1: Bestehende Ansätze zur Digitalisierung von produzierenden Unternehmen

Titel in Abb.	Ansatz (vollst. Titel)	Autoren	Projekt	Literatur
Bechthold et al. 2014	Industry 4.0 - The Caggemini Consulting View. Sharpening the Picture beyond the Hype	J. Bechthold, A. Kern, C. Lauenstein, L. Bernhofer	-	[Bech14]
Roth 2015	Einführung und Umsetzung von I4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis	A. Roth	-	[Roth16]
Merz & Siepmann 2018	I4.0 – Vorgehensmodell für die Einführung	S. Merz, D. Siepmann		[Merz16]
Plass 2016	Vernetzt arbeiten. Wie Digitalisierung und I4.0 die Arbeitswelt verändern.	C. Plass	-	[Plas16a], [Plas16b], [Plas15]
Seiter et al. 2016	Roadmap I4.0	M. Seiter, C. Bayrle, S. Berlin, U. David, M. Rusch, O. Treusch	-	[Seit16]
Winkelhake 2017	Die Digitale Transformation der Automobilindustrie	U. Winkelhake	-	[Wink17b]
Peter 2017	KMU-Transformation: Als KMU die Digitale Transformation erfolgreich umsetzen	M.K. Peter	-	[Pete17]
Knospe et al. 2018	Leistungssteigerung durch I4.0 für kleine und mittlere Unternehmen	O. Knospe, M. Drwel, T. Mittag, C. Pierenkemper, D. Hobscheidt	INLUMIA	[Pier19], [Pier18], [Knos18]
Appelfeller & Feldmann 2018	Die Digitale Transformation des Unternehmens	W. Appelfeller, C. Feldmann	-	[Appel18]
Wenzel et al. 2018	Ablausimulation in I4.0: Handlungsfelder für die industrielle Digitale Transformation	S. Wenzel, J. Stolipin, U. Jessen	-	
Atanasijevic 2018	Innovative models of digital transformation of business-Leader's experience	S. Atanasijevic	-	[Atan18]
Von Wascinski et al. 2018	I4.0 für die Textil- und Bekleidungsindustrie - Potenziale, Herausforderungen und KMU-spezifische Ansätze	L. von Wascinski, M. Weiß, M. Tilebein	-	[Wasc18]
Schumacher et al. 2019	Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises	A. Schumacher, T. Nemeth, W. Sihh	-	[Schu19]
Nayyar & Kumar 2020	A roadmap to industry 4.0 - Smart production, sharp business and sustainable development	A. Nayyar, A. Kumar	-	[Nayy20]

Entwicklung einer I4.0-Einführungsstrategie nach MERZ & SIEPMANN

Das Vorgehensmodell zur Entwicklung von unternehmensweiten und –spezifischen I4.0-Einführungsstrategien ist in drei Betrachtungsebenen unterteilt (Abbildung 9-1). Auf der Strategischen Betrachtungsebene wird eine Ist-Analyse bezüglich I4.0 durchgeführt, um so die Positionierung des Unternehmens hinsichtlich ihrer I4.0-Strategie identifizieren zu können. Die Taktische Betrachtungsebene wird das Ziel hinsichtlich I4.0 festgelegt, wofür die Frage, wo das Unternehmen sich hin entwickeln möchte, geklärt werden muss. Je nach Ausgangssituation ergeben sich vier mögliche strategische Entwicklungsszenarien mit unterschiedlichen Auswirkungen auf die Geschäftsstrategie und die Umsetzung von I4.0, anhand derer Konsequenzen und Maßnahmen abgeleitet werden können. Nachdem konkrete Projekte zur I4.0 Umsetzung

definiert wurden, werden innerhalb der Operativen Betrachtungsebene“ die Maßnahmen ganzheitlich verfolgt umgesetzt. Hierzu ist das Management von Projekten sowie das Management von untergeordneten Prozessen, (IT-)Technologien, der Organisation und von Mitarbeitern notwendig, um eine ganzheitliche Einführung und Umsetzung von I4.0 gewährleisten zu können [Merz16].

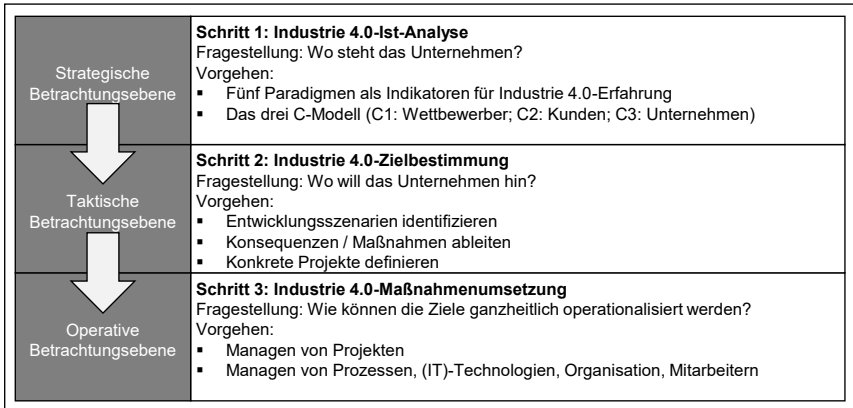


Abbildung 9-1: Entwicklung einer I4.0-Einführungsstrategie nach [Merz16]

Vorgehensmodell zur Digitalen Transformation eines Unternehmens nach PLASS

Das Vorgehensmodell zur Digitalen Transformation setzt auf eine allgemeingültige Vorgehensweise zur Planung und Umsetzung der Digitalisierung und ist branchenunabhängig einsetzbar (Abbildung 9-2). Die Schritte zur Umsetzung werden nur grob beschrieben und nicht weiter ausdetailliert.

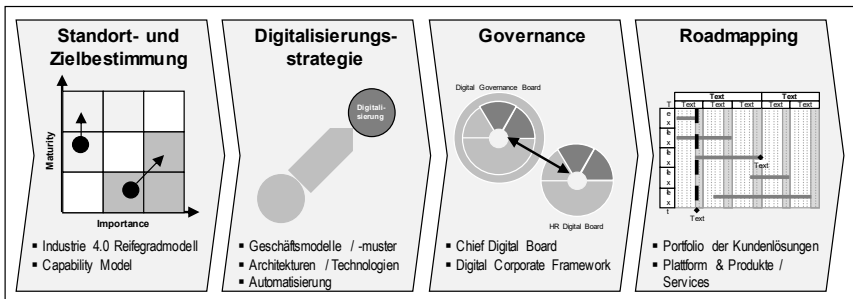


Abbildung 9-2: Vorgehen zur Digitalen Transformation nach [Plas16b], [Plas16a]

In einem ersten Schritt wird eine Standort- und Zielbestimmung hinsichtlich der Digitalisierung im Unternehmen mittels eines Industrie-4.0-Reifegradmodells und Capability-Modellen durchgeführt. Anschließend werden zugehörige Digitalisierungsstrategien entwickelt, welche neue Geschäftsmodelle und –muster sowie Architekturen und Technologien zur Erhöhung des Automatisierungsgrads enthalten. Ein entscheidender Schritt ist die Einführung von sog.n Governance-Strukturen. Hierzu gehört ein „Digital Corporate Framework“, welches den Rahmen und das unternehmensspezifische Verständnis der Governance-Strukturen beinhalten. Ebenso wird

das Implementieren eines zentralen Digital Governance Boards angestrebt, das für die Initiierung, Förderung und Abstimmung von Digitalisierungsmaßnahmen verantwortlich ist. Es dient hierbei als unternehmensübergreifende Plattform. In einem letzten Schritt werden die einzelnen Aktivitäten geplant und in einer Roadmap festgehalten [Plas16b], [Plas16a].

Roadmap zur Digitalen Transformation der Automobilindustrie nach WINKELHAKE

Die entwickelte Digitalisierungs-Roadmap zur Digitalisierung der Automobilindustrie von WINKELHAKE ist Bestandteil des unternehmensweiten strategischen Planungsprozesses (Abbildung 9-3, links). Im ersten Schritt entwickelt das Unternehmen Verständnis der Marktsituation und Kundenforderungen, was als Basis für die Ausgestaltung der Unternehmensstrategie im zweiten Schritt dient. Im dritten Schritt werden zugehörige Geschäftsmodelle entwickelt und die Geschäftsstruktur mit den zugehörigen Prozessen wird entsprechend der Unternehmensstrategie möglichst schlank und effizient ausgerichtet. Im vierten Schritt ist eine Vision zur Ausrichtung und Zielsetzung der Digitalisierung zu definieren und Digitalisierungsfelder zu bestimmen. Ein zugehöriges Zielbild kann mit dem Visionsrahmen zur Digitalisierung von Unternehmen visualisiert werden (Abbildung 9-3, rechts). Für jedes Digitalisierungsfeld ist anschließend eine Vorgehensweise zur Umsetzung der Vision mittels digitaler Technologien zu bestimmen. Die Unternehmenskultur und die IT beeinflussen diese Planungsschritte durchgehend, Sie sind eine Grundvoraussetzung zur erfolgreichen Umsetzung der Digitalisierungs-Roadmap [Wink17b].

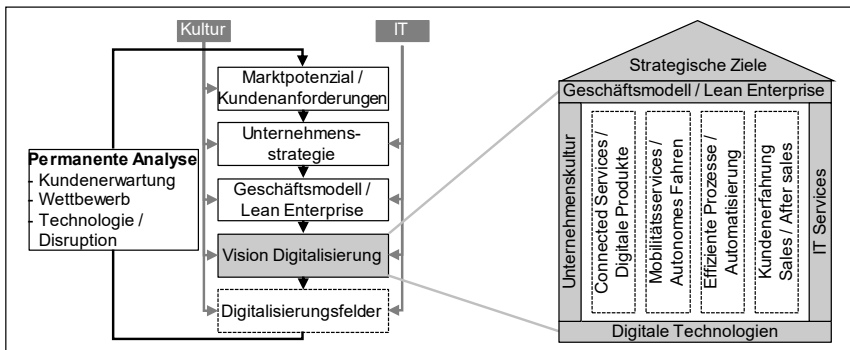


Abbildung 9-3: Roadmap für Digitalisierungsfelder sowie Visionsrahmen zur Digitalisierung eines Unternehmens [Wink17b]

Leistungssteigerung von Unternehmen durch I4.0 nach KNOSPE ET AL.

Das Vorgehensmodell von KNOSPE ET AL. hat das Ziel, Unternehmen zu befähigen, ihre Leistung hinsichtlich I4.0 zu bewerten (Abbildung 9-4). Dadurch kann eine nachhaltige und vorteilhafte Positionierung dieser Unternehmen im globalen Wettbewerb sichergestellt werden. Das Vorgehensmodell beginnt mit einer soziotechnischen Leistungsbewertung der Unternehmen, aus der ein I4.0-Reifegrad resultiert. Mittels eines Industrie-4.0-Benchmarks, der die Dimensionen Technik, Business und Mensch berücksichtigt, wird der Reifegrad für einen Referenzbereich der Produktion (z. B. eine Montagelinie) oder innerhalb eines Referenzprodukts (z. B. Werkzeugmaschine) ermittelt. Im nächsten Schritt wird ein Zielreifegrad definiert, der unter Beachtung zukünftiger Entwicklungen von Markt, Technologie und Geschäftsumfeld des

Unternehmens modifiziert wird. Im letzten Schritt wird die definierte Leistungssteigerung mittels Umsetzungspfade umgesetzt [Knos18]. Diese Umsetzungspfade werden anhand von Musterkarten beschrieben, welche die Elemente Name, Kontext, Problem und Lösung [Alex95] beinhalten. Der Kontext zeigt auf, zu welcher Reifegradstufe die Problemstellung gehört und welche Zielstellung durch die Umsetzung erreicht werden kann. Die Lösung wird mittels eines morphologischen Kastens beschrieben und zeigt die inkrementellen Umsetzungsmuster auf [Knos18].

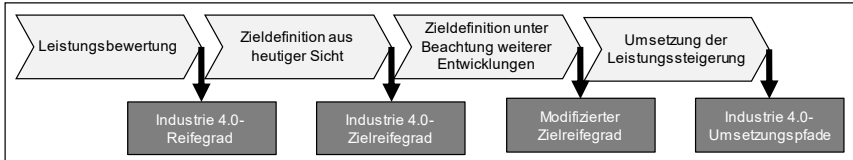


Abbildung 9-4: Vorgehensmodell zur Leistungssteigerung von Unternehmen durch I4.0 nach [Knos18]

Ganzheitliche Digitalisierung von Arbeitsprozessen

Die ganzheitliche Digitalisierung von Arbeitsprozessen basiert auf vier Schritten mit dem Ziel die Produktivität zu verbessern (Abbildung 9-5). Im ersten Schritt beschäftigt sich das produzierende Unternehmen mit I4.0 hinsichtlich digitaler Technologien, Arbeitsinhalte, -prozesse und -umgebungen sowie betriebliche Akteure.

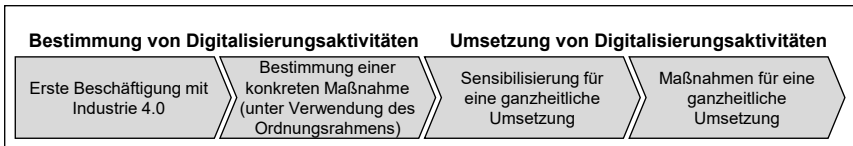


Abbildung 9-5: Bestimmung und Umsetzung von Digitalisierungsmaßnahmen [Ters18]

Mithilfe eines Reifegradmodells wird im zweiten Schritt der Istzustand bestimmt, sowie die Wettbewerbssituation des Unternehmens analysiert. Basierend darauf können passende Digitalisierungsmaßnahmen ausgewählt werden. Die dafür notwendigen digitalen Technologien müssen die Zielsetzung die Produktivität zu erhöhen, sei es durch die Erhöhung des Outputs und/oder die Verringerung des Inputs. Sie müssen somit ein Bestandteil einer klar definierten Strategie zur Digitalisierung von Arbeitsprozessen sein. Unterstützt wird die geeignete Auswahl an digitalen Technologien durch einen Ordnungsrahmen, welche das Produktivitätsziel in Zusammenhang mit Anwendungsgebieten der Digitalisierung sowie direkte und indirekte Bereiche darstellt (Abbildung 9-6). Im dritten Schritt wird die Umsetzung der gewählten Digitalisierungsmaßnahmen durchgeführt. Hierfür wird zunächst das beteiligte Team für mögliche Auswirkungen der Maßnahmen sensibilisiert. Durch die Betrachtung der elf Handlungsfelder Arbeitsgestaltung, Arbeitsorganisation, Arbeits- und Gesundheitsschutz, Qualifikation und Qualifizierung, Betriebs- und Arbeitszeit, Entgelt, Datenschutz, Datensicherheit, Mitbestimmung, externe Unterstützung sowie Wirtschaftlichkeit und Erfolg wird dies erreicht. Im letzten Schritt werden die Digitalisierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der elf Handlungsfelder ganzheitlich umgesetzt [Ters18].

Produktivitätsziel	Anwendungsgebiete der Digitalisierung					Betriebliche Tätigkeiten	
	Datenerfassung	Datenweitergabe	Datenverarbeitung	Datenbereitstellung	Datennutzung	Direkte Bereiche	Indirekte Bereiche
a1	Output ↑ Strategie Kubus (a1, b1, c1)	Strategie Kubus (a1, b2, c1)	Strategie Kubus (a1, b3, c1)	Strategie Kubus (a1, b4, c1)	Strategie Kubus (a1, b5, c1)	(a1, b5, c1)	(a1, b5, c2)
a2	Input ↓ Strategie Kubus (a2, b1, c1)	Strategie Kubus (a2, b2, c1)	Strategie Kubus (a2, b3, c1)	Strategie Kubus (a2, b4, c1)	Strategie Kubus (a2, b5, c1)	(a2, b5, c1)	(a2, b5, c2)
	b1	b2	b3	b4	b5	c1	c5

Abbildung 9-6: Ordnungsrahmen für Produktivitätsstrategien [Ters18]

Ganzheitliche Digitale Transformation

DUMITRESCU et al. entwickelten, basierend auf dem grundlegenden Prozess zur Strategieentwicklung, einen dreistufigen Prozess zur Koordination des Transformationsprozesses (Abbildung 9-7, (1)).

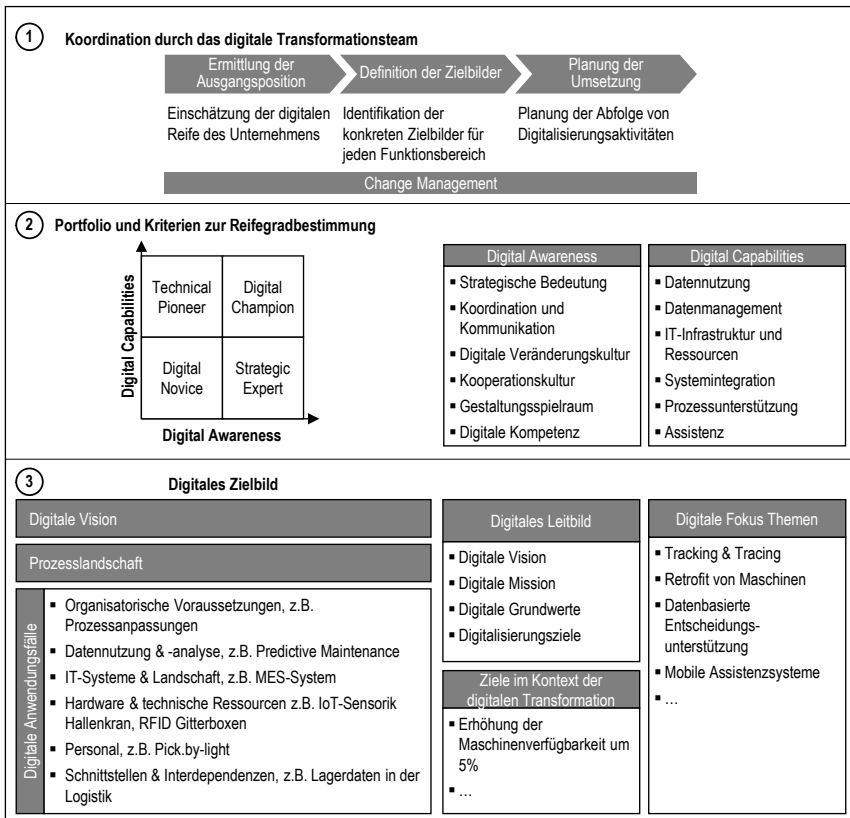


Abbildung 9-7: (1) Vorgehensweise zur Planung der Digitalen Transformation; (2) Reifegradmodell, (3) Erstellung des digitalen Zielbilds [Dumi19]

Im ersten Schritt ermittelt das Unternehmen mithilfe eines Reifegradmodells die Ausgangsposition (Abbildung 9-7, (2)). Das Reifegradmodell betrachtet zum einen die Dimension Digital Capabilities, welche die technologische sowie die infrastrukturellen Fähigkeiten des Unternehmens repräsentiert. Und zum anderen die Dimension Digital Awareness, welche strategische, organisatorische und kulturelle Aspekte der Digitalisierung umfasst. Beide Dimensionen werden in jeweils sechs Handlungsfelder unterteilt, z. B. strategische Bedeutung, digitale Kompetenz, Datennutzung oder auch Prozessunterstützung. Jedes Handlungsfeld wird im Rahmen von Workshops bewertet. Der Mittelwert ergibt den jeweiligen Reifegrad der einzelnen Dimensionen, was im Rahmen eines Ergebnisportfolios visualisiert wird. Basierend auf der Ausgangsposition werden Zielbilder definiert. Zur Entwicklung einer Digitalisierungsstrategie wird zunächst eine digitale Unternehmensvision erarbeitet und ein digitales Leitbild abgeleitet. Anhand des Leitbilds werden konkrete Digitalisierungsziele definiert (Abbildung 9-7, (3)). Abschließend werden konkrete Umsetzungsmaßnahmen festgelegt, um die gesetzten Ziele zu erreichen. Hierfür werden die Maßnahmen in einer Roadmap in eine zeitliche Abfolge gebracht. Parallel zum dreistufigen Prozess erfolgt das Changemanagement, welches die wesentlichen Stakeholder im Unternehmen in den Transformationsprozess integriert [Dumi19].

Nachhaltige Digitalisierung von Unternehmen nach KUMAR & GUPTA

Nach Kumar & Gupta sind neun Technologien und Standards im Herstellprozess zu integrieren, um I4.0 erfolgreich implementieren zu können: Internet der Dinge, Big Data, erweiterte Realität, fortgeschrittene Robotik, Cybersicherheit, Simulation, Additive Fertigung, horizontal/vertikal Integration und Cloud. Hierbei müssen sechs Schritte zur Umsetzung berücksichtigt werden (Abbildung 9-8). Im ersten Schritt werden ein allgemeines Verständnis sowie eine erste Vision festgelegt. Im nächsten Schritt werden die vorhandenen Ressourcen geprüft, um so die Umsetzung der Technologien und Standards sicherstellen zu können. Im dritten Schritt werden klare Ziele zur Implementierung von I4.0 definiert, anschließend an die Mitarbeiter kommuniziert und diese werden auch bei der Umsetzung involviert. Im fünften Schritt wird ein passendes Geschäftsmodell entwickelt. Bevor die Technologien und Standards implementiert werden, wird die aktuelle technische Bereitschaft sowie der Digitalisierungsgrad des Unternehmens bestimmt, um so einen konkreten Ausgangspunkt zu erhalten [Kuma20].



Abbildung 9-8: Vorgehen zur nachhaltigen Digitalisierung von Unternehmen nach [Kuma20]

Digitalisierte Produktionsunternehmen

Die entwickelte Modellplattform I4.0 für Produktionsunternehmen besteht aus den drei Ebenen Marktplatzportale / Dienste-Broker, Digital Engineering und Smart Production (Abbildung 9-9). Die erste Ebene stellt die zukünftigen Geschäftsmodelle dar und diese wird direkt an die

zweite Ebene angebunden. Auf der Ebene des Digital Engineering werden Ablaufprozesse digital verknüpft und innovative Softwarelösungen durchgängig vernetzt. Durch eine einheitliche Datenstruktur wird ein freier Austausch zwischen den Softwarekomponenten gewährleistet. Weiterhin wird über echtzeitfähige Schnittstellen zwischen dem ERP- und dem MES-system eine bessere Feinplanung der Shopfloorebene und ein effektiveres Produktivitätsmanagement erzielt. Durch die einheitlich strukturierten und zentral abgespeicherten Daten können umfassende Analysen mittels Business Analytics oder KI, zu z. B. Produktivität, Maschinenauslastungen oder auch Prozessabläufe durchgeführt werden. Die dritte Ebene der Modellplattform ist die Smart Production. Die Produktion ist durchgängig vernetzt und besteht aus modularen Systemarchitekturen, sodass diese flexible und schnell konfiguriert werden kann. Zur Umsetzung der smart Production können z. B. Mensch-Roboter-Kollaborationen, Digitale Zwillinge oder auch Montage-Assistenz-Systeme implementiert werden [Köbl20].

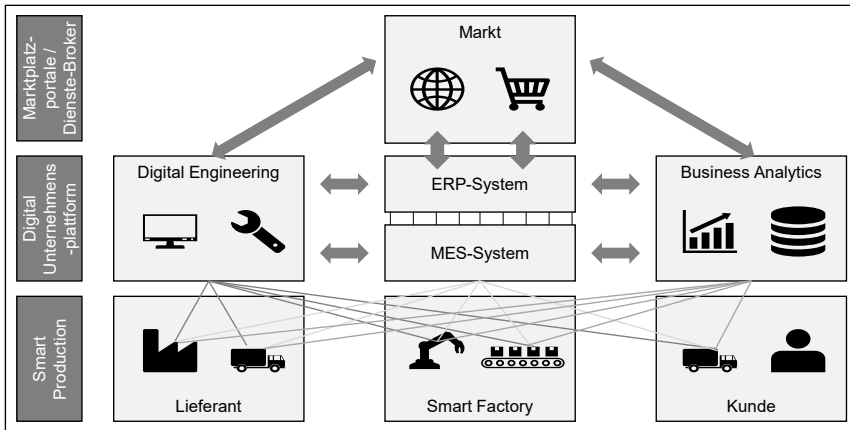


Abbildung 9-9: Modellplattform für I4.0 [Köbl20]

Zu Digitalen Transformationen setzen KÖBLER et al. die einzelnen Schritte in Relation zur Zeit und des Reifegrads der Modellfabrik der I4.0. Um eine ganzheitliche Digitalisierung zu erzielen müssen alle Transformationsschritte durchgeführt werden (Abbildung 9-10). Basierend auf einer „schlanken“ Produktion werden Kunden, Lieferanten sowie alle an der Wertschöpfung beteiligten Stakeholder und Komponenten digital vernetzt. Das hierfür benötigte IT-Netzwerk und dessen Sicherheit wird im dritten Transformationsschritt umgesetzt. Im Rahmen der smart Production organisiert sich die Produktion selbst basierend auf den Produktionsschritten und den zur Verfügung stehenden Fertigungsanlagen und Logistiksystemen. Hierfür werden die Produkt- und Prozessdaten im Digital Engineering bereitgestellt. Zur Auswertung der Datenmengen sowie zur Erkennung von Mustern und Zusammenhängen können Business-Analytics-Methoden angewandt werden. Im nächsten Schritt vernetzen sich Produkte untereinander zu Smart Products. Sie kommunizieren und sammeln Daten zu ihrer Fertigungs- und Nutzungsdauer. Im letzten Schritt werden neue, unternehmensindividuelle Geschäftsmodelle entwickelt, sodass sich aufgrund der Digitalisierung neue Möglichkeiten zur Wertschöpfung ergeben [Köbl20].

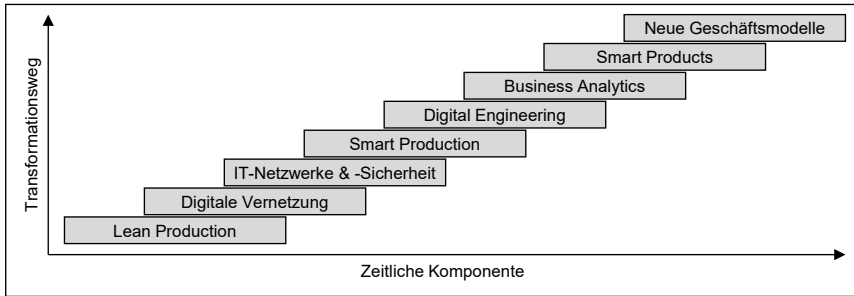


Abbildung 9-10: Transformationsschritte zum digitalisierten Unternehmen [Köbl20]

9.1.2 Ansätze zur Digitalisierung von Produktionssystemen

Tabelle 9-2: Bestehende Ansätze zur Digitalisierung von Produktionssystemen

Titel in Abb.	Ansatz (vollst. Titel)	Autoren	Projekt	Literatur
Rudolf 2006	Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie	H. Rudolf	-	[Rudo06]
Kühn 2006	Digitale Fabrik	W. Kühn	-	[Kühn06]
VDI e.V. 2008	Digitale Fabrik	VDI e.V.	-	
Günthner & ten Hompel 2010	Internet der Dinge in der Intralogistik	W. Günthner, M. ten Hompel	Internet der Dinge	[Günt10a]
Vogel-Heuser et al. 2012	Forschungsfragen in „Produktionsautomatisierung der Zukunft“	B. Vogel-Heuser, G. Bayrak, U. Frank	ProCPS	[Voge12]
Kagermann et al. 2012	Im Fokus: Das Zukunftsprojekt I4.0 - Handlungsempfehlungen zur Umsetzung	H. Kagermann, W. Wahlster, J. Helbig	-	[Kage12]
Landherr et al. 2013	Digitale Fabrik	M. Landherr, M. Neumann, J. Volkmann, C. Constantinescu	-	[Land16, Land13, West13b]
Lucke 2013	Smart Factory	D. Lucke	-	[Luck13, West13b, Luck08b]
Reinhart et al. 2013	Cyber-Physische Produktionssysteme. Produktivitäts- und Flexibilitätsteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik	G. Reinhart, P. Engelhardt, F. Geiger, T.R. Philipp, W. Wahlster, D. Zühlke, J. Schlick, T. Becker, M. Löckelt, B. Pirvu, P. Stephan, S. Hodel, B. Scholz-Reiter, K. Thoben, C. Gorltd, K. A. Hribernik, D. Lappe, M. Veigt	CyProS	[Pirv16, Köhl15, Rein15, Well14, Rein13, Well13]
Salmen 2016	Gestaltungsmodell für den digital vernetzten Shopfloor im Werkzeugbau	M. Salmen	-	[Salm16]
Morlock et al. 2016	I4.0-Transformation für produzierende Unternehmen.	F. Morlock, T. Wienbruch, S. Leineweber, D. Kreimeier, B. Kuhlenskötter	ADAPTION	[Lein18a, Lein18b, Abel17, Herr17, Mor16]
Albers et al. 2016	Procedure for Defining the System of Objectives in the Initial Phase of an Industry 4.0 Project Focusing on Intelligent Quality Control Systems	A. Albers, B. Gladysz, T. Pinner, V. Butenko, T. Stürmlinger	IQ 4.0	[Seit17, Albe16]
Bernady & Jordan 2016	CPS von KMU für KMU - Aufbau einer Plattform zur anforderungsge-rechten Auswahl cyber-physischer Systeme	A. Bernady, F. Jordan	cyberKMU2	[Bern18b, Schu17b, Bern16]
Weinert et al. 2017	Metamorphose zur intelligenten und vernetzten Fabrik	N. Weinert, M. Plank, A. Ullrich	MetamoFAB	[Knot17, Wein17, Rimm16]

Titel in Abb.	Ansatz (vollst. Titel)	Autoren	Projekt	Literatur
Gausemeier et al. 2017	Mit I4.0 zum Unternehmenserfolg - Integrative Planung von Geschäftsmodellen und Wertschöpfungssystemen	J. Gausemeier, J. Wieske, B. Echterhoff, L. Linsenberger, C. Koldewey, T. Mittag, M. Schneider	GEMINI	[Gaus17]
Horler & Müller 2017	Strukturplanung zukünftiger Produktionssysteme.	S. Horler, E. Müller	-	[Horl18, Horl17]
Marrenbach 2017	Alle Technik hilft nichts, wenn die Mitarbeiter nicht mitziehen - Projektporträt	D. Marrenbach	myCPS	[Bauc19, Bauc18, Hämm18, Bauc17, Klap17, Marr17]
Langer et al. 2017	Modulbaukasten Digitalisierung	T. Langer, A. Singer, K. Wenzel, D. Bolev	CyProAssist	[Lang17]
Kolberg 2018	Entwicklung einer Referenzarchitektur zur Realisierung von Methoden der Lean Production mittels digitaler Technologien	D. Kolberg	-	[Kolb18, Kolb15]
Liu et al. 2018	Framework for designing Production Systems 4.0	Y. Liu, J.-P. Prote, M. Molitor, G. Schuh	-	[Liu18]
Lanza & Nyhuis 2018	I4.0 für die Praxis - Befähigungs- und Einführungsstrategien	G. Lanza, P. Nyhuis	Intro 4.0	[Lanz18, Lieb18a, Lieb18b, Lieb18c, Olef18, Hübn17, Lanz17, Lieb17]
Feldmann & Ziegenbein 2018	Digital Lean – Mit dem Crossroads-Modell zu mehr Effizienz.	C. Feldmann, R. Ziegenbein	-	[Feld18]
Wagner 2018	I4.0 für die Praxis	R. M. Wagner	STEPS	[Holz19, Nöhr19, Klin18, Lott18, Nöhr18, Scha18, Wagn18, Wien18, Wöst17, Nöhr16, Wöst16]
Block & Kuhlenkötter 2018	Digital Factory Implementation Approach starting from the Macroscopic Perspective with an Example for Holistic Planning in Assembly Systems	C. Block, B. Kuhlenkötter	-	[Bloc18]
Anderl et al. 2018	Efficient Factory 4.0 Darmstadt - I4.0 Implementation	R. Anderl, O. Anokhin, A. Arndt	-	[Send18]
Matt et al. 2018	I4.0 Assessment	D.T. Matt, M. Unterhofer, E. Rauch, M. Riedl, R. Brozzi	-	[Matt18]
Peukert et al. 2020	Process model for the successful implementation and demonstration of SME-based industry 4.0 showcases in global production networks	S. Peukert, S. Treber, S. Balz, B. Haefner, G. Lanza	-	[Peuk20]

Konzept zur Umsetzung einer wissenschaftlichen Montageplanung in der Digitalen Fabrik

Komplexe Planungen von Produkten, Prozessen und Ressourcen in der Montage der Digitalen Fabrik können mit Hilfe von wissenschaftlichen Systemen abgebildet werden. Hierfür entwickelte Rudolf ein Konzept zur Umsetzung einer wissenschaftlichen Montageplanung in der Digitalen Fabrik, welches aus einem werkzeugunabhängigen Grobkonzept und einem werkzeugabhängigen Feinkonzept besteht (Abbildung 9-11). Zunächst wird untersucht, wie kommerzielle Planungssysteme der Digitalen Fabrik Variantenplanungen auf der Basis von verwaltenden Funktionen unterstützen und wie diese Systeme um wissenschaftliche Elemente erweitert werden können. Weiterhin wurde eine Möglichkeit geschaffen die Grunddaten der digitalen Prozessplanung aus dem kommerziellen Planungssystem in das entwickelte System Generischer Planer (GenPlanner) zu überführen. Mithilfe des wissenschaftlichen Systems GenPlanner werden bestehende Grundfunktionalitäten der kommerziellen Planungssysteme unterstützt und der Anwender wird von einer Vielzahl an manuellen Tätigkeiten entlastet. Zusätzlich kann das Planungs-wissen zwischen verschiedenen Projekten übertragen werden, sodass sich eine aufwändige manuelle Neuerstellung von Planungsstrukturen vermeiden lässt [Rudo06].

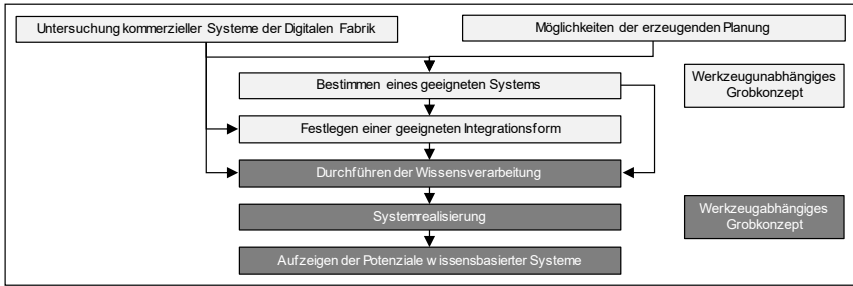


Abbildung 9-11: Konzept zur Umsetzung einer wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik nach [Rudo06]

Vorgehensmodell zur Materialflusssteuerung mithilfe des Internet der Dinge

Aufgrund eines schwer bestimmbar Kundenverhaltens, beeinflusst durch Trends und Hypes, sind auch Absatzmärkte fast unprognostizierbar. Unternehmen müssen ihre organisatorischen und technischen Prozesse schnell auf Marktveränderungen anpassen, um so den Kundenwünschen gerecht werden zu können. Besonders davon betroffen ist das Materialflusssystem im Unternehmen. Allerdings ist dieses den stetig wachsende Anforderungen an Wandelbarkeit und Dynamik noch nicht gewachsen [Günt10a]. Mithilfe des Internets der Dinge entsteht eine intelligente Infrastruktur, die sich mit Transporteinheiten abstimmt und ein dezentrales, kooperatives und beliebig veränderbares Transportnetzwerk realisiert (Abbildung 9-12) [Günt10b].

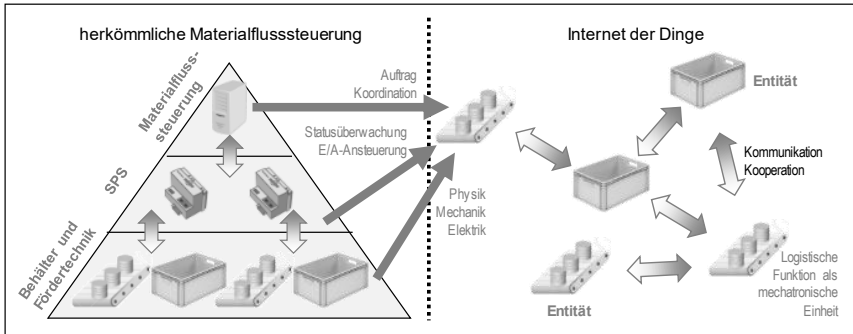


Abbildung 9-12: Internet der Dinge in der Materialflusssteuerung nach [Günt10b]

Zur Steigerung der Flexibilität werden die Systeme modular aufgebaut. Dabei werden drei Bausteintypen oder Entitäten benötigt: Fördertechnikmodule, intelligente Transporteinheiten und unterstützende Softwaredienste [Niek10]. Hierbei ist die Granularität der Module abhängig von der erreichbaren Wiederverwendbarkeit, so muss ein Modul der Fördertechnik nicht zwingend auf der Ebene der einzelnen Förderelemente (Weiche, Kurve, etc.) gebildet werden [Hauß10].

Konzept zur Einführung cyber-physischer Systemmodule in der Intralogistik und Produktionsplanung nach REINHART (CyProS)

Mit dem Fokus auf der Intralogistik sowie Produktionsplanung und dem Eskalationsmanagement wurden im Projekt „Cyber-Physische Produktionssysteme (CyProS)“ Cyber-Physische Systemmodule basierend auf einer Referenzarchitektur entwickelt, welche als wiederverwendbare und übertragbare Implementierungsvorlage für CPPS dient (Abbildung 9-13) [Rein15].

Des Weiteren werden CPPS-spezifische Steuerungsmethoden für die Abläufe in der Produktion entwickelt, welche aus einer Kombination aus anerkannten Planungs- und Steuerungsmethoden sowie aus Anforderungen der CPS, resultierend aus deren Eigenschaften, bestehen [Rein13]. Zur Befähigung der Unternehmen zum wirtschaftlichen Einsatz der entwickelten Cyber-Physischen Systemmodule in der Praxis dienen interaktive Handbücher zur Mitarbeiterschulung sowie Leitfäden für die methodische Entwicklung und Einführung der Module [Baue14b]. Das übergeordnete Ziel des Konzepts ist die Entwicklung einer CPS-Systemarchitektur, welche die Vernetzung von CPS-Systemmodulen zu CPPS und ihrer Umsetzung und Anwendung in der Praxis ermöglicht [Köhl15].

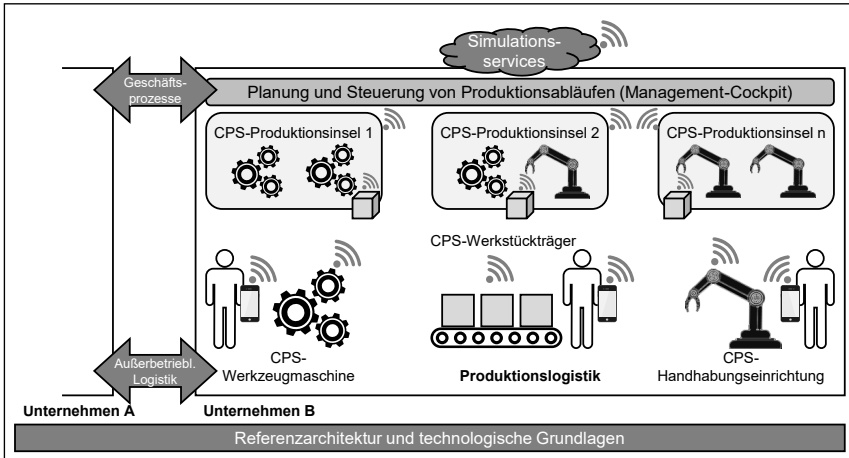


Abbildung 9-13: cyber-physische Systemmodule in der Intralogistik [Rein13]

Digitalisierung der Qualitätssicherung nach ALBERS et al.

ALBERS et al. entwickelten ein Verfahren zur Definition eines Zielsystems der intelligenten Qualitätskontrolle in der Anfangsphase eines Industrie-4.0-Projekts. Unter Berücksichtigung der maschinenbezogenen und organisatorischen Prozessanalyse, wird ein deskriptives Modell entwickelt, welches die relevanten Systeme, ihre Schnittstellen, Interdependenzen und Einflussparameter, sowie generierte Dokumente und die Anforderungen von Wertschöpfungspartnern, beinhaltet. Das Modell basiert auf drei Phasen: (1) Initialisierungsphase, (2) Analyse des Istzustands der Qualitätskontrolle und (3) Synthese des Zielsystems (Abbildung 9-14). In der Initialisierungsphase wird ein Anwendungsszenarien im Zusammenhang mit intelligenten Qualitätskontrollsystemen, gemeinsam mit dem Hersteller, dem Qualitätsmanagement des Herstellers sowie dem Maschinenlieferanten, definiert. Hierfür werden sowohl das zu kontrollierende Produkt mit den zugehörigen qualitätsrelevanten Merkmalen, z. B. Maßangaben, als auch das Produktionssystem beschrieben, die als Grundlage für die Messung der Produktqualität und somit auch für das intelligente Qualitätskontrollsystem dienen. Im Rahmen eines Workshops werden die Merkmale identifiziert, beschrieben und dokumentiert. Das Ziel der Analyse des Istzustands ist es, einen formalisierten Überblick über bereits im Einsatz befindliche Qualitätskontrollsysteme innerhalb des Wertschöpfungsnetzwerks Industry 4.0 zu geben. Das aus Fragebögen resultierende Beschreibungsmodell bildet die Grundlage für die Identifizierung von Schnittstellen innerhalb des Wertschöpfungsnetzwerks sowie für die detaillierte Definition von

Zielzuständen der Qualitätskontrolle. In der letzten Phase wird basierend auf dem definierten Anwendungsszenario sowie des beschriebenen Istzustands der Zielzustand des intelligenten Qualitätskontrollsystems definiert. In einem ersten Schritt werden organisatorische Ziele und Voraussetzungen, wie verfügbare Ressourcen, rechtliche Aspekte, etc., geklärt und in einer Zielvorgabe dokumentiert. Im nächsten Schritt werden die technischen Anforderungen an das Qualitätssicherungssystem in der Entwicklung definiert und in einem Anforderungsdokument dokumentiert. Dieses resultierende Dokument ist als Arbeitsdokument gedacht, das den Anforderungsprozess während der Entwicklung des Qualitätskontrollsystems unterstützt [Albe16].

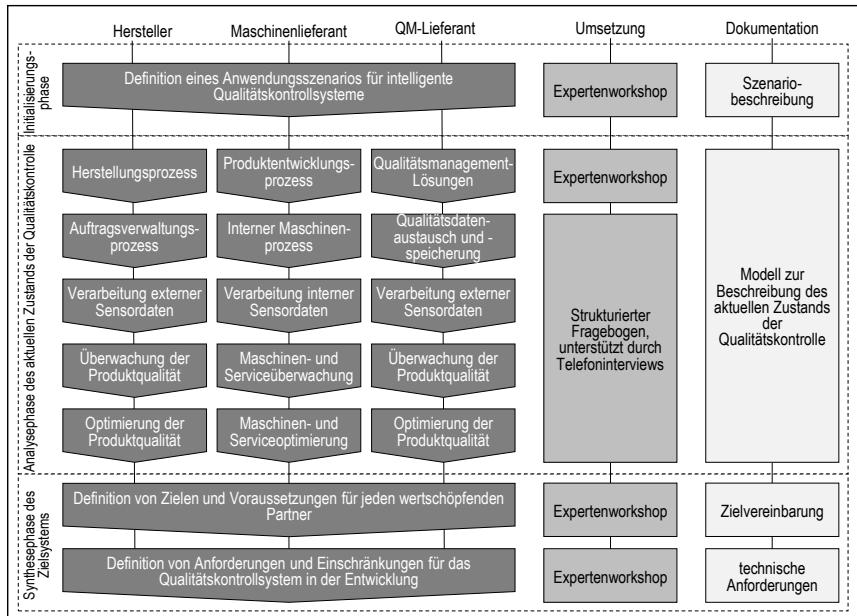


Abbildung 9-14: Analyse des Istzustands und die Definition des Sollzustands in der Aufbauphase eines Industry 4.0-Wertschöpfungsnetzwerks [Albe16]

CPS-Matchmaker für KMU

Im Rahmen des Projekts „cyberKMU2 - Cyberphysische Systeme von kleinen und mittleren Unternehmen für kleine und mittlere Unternehmen“ wird eine Matching-Logik entwickelt, welche eine plattformbasierte, anforderungsgerechte Auswahl von cyber-physischen System (CPS) trifft [Bern16]. Der Leitgedanke des sog. Matchmakers ist, dass CPS-Technologien nur erfolgversprechend eingesetzt werden können, wenn Sie aufgrund konkreter Zielstellungen implementiert werden. Als Grundlage dient ein morphologischer Kasten, der die identifizierten Technologien systematisch beschreibt [Jord17b]. Im Matchmaker werden im ersten Schritt konkrete Handlungsfelder vorgeschlagen, wodurch der Anwender seine Ausgangssituation bzw. sein Problem genauer definieren kann (Abbildung 9-15). Im zweiten Schritt wird ein Grobkonzept ausgewählt, welches zur Eingrenzung des Gesamtkatalogs dient. Im nachfolgenden Schritt werden die Anforderungen an das gewählte Grobkonzept genauer spezifiziert [Schu17b]. Im letzten Schritt, wird basierend auf der vorhergehenden Auswahl verschiedene Technologievorschlage zur Losung des Anwendungsfalls presentiert. Neben den jeweiligen Technologien enthalt das

Ergebnis eine kurze Beschreibung dieser sowie eine Liste potenzieller Anbieter [Jord17a]. Der CPS-Matchmaker wurde auf einer online-Plattform implementiert und wird kontinuierlich erweitert [Bern18a].

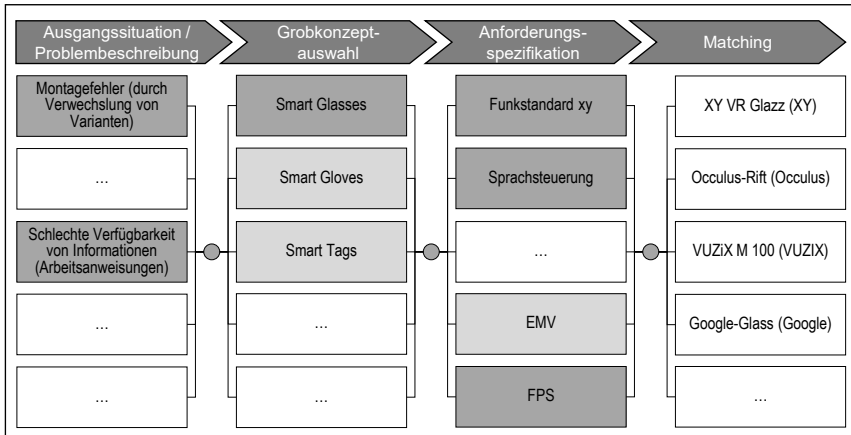


Abbildung 9-15: Ablaufschema des CPS-Matchmakers [Jord17a]

Methode zur ganzheitlichen virtuellen Absicherung der Fabrikstruktur

Die Umsetzung einer Smart Factory wirkt sich auf die Strukturplanung eines Produktionssystems aus. Die Strukturösungen sind über den Fabriklebenszyklus wechselnden Anforderungen ausgesetzt. Aufgrund dessen müssen insbesondere die Planung und der Betrieb integriert betrachtet werden. HORLER ET AL. identifizierten hierfür planerisch-inhaltliche Herausforderungen wie technologische Funktionserfüllung für hohe Produktindividualisierung, zunehmend dynamische Dimensionierung der Flussystemelemente und Modellierung der Prozesslogiken der Informations-, Kommunikations- und Materialflüsse sowie räumliche Verortung der Flussystemelemente unter wechselnden Anforderungen (Abbildung 9-16) [Hor17]. Zur Absicherung der Fabrikstruktur wird ein Digital Mock-Up (DMU) im Sinne eines Struktur-DMU gewählt [Köni13]. Basierend auf der Absicherung der Fabrikstruktur wird eine ganzheitliche Methode erfolgt, welche die drei Phasen Planung Betrieb und Adaption beinhaltet. Den Kern bilden virtuelle Strukturmodelle der CPS, welche eine durchgängige digitale Grundlage ermöglichen und somit Strukturösungen anforderungsgerecht entwickeln und simulieren lassen [Hor17].

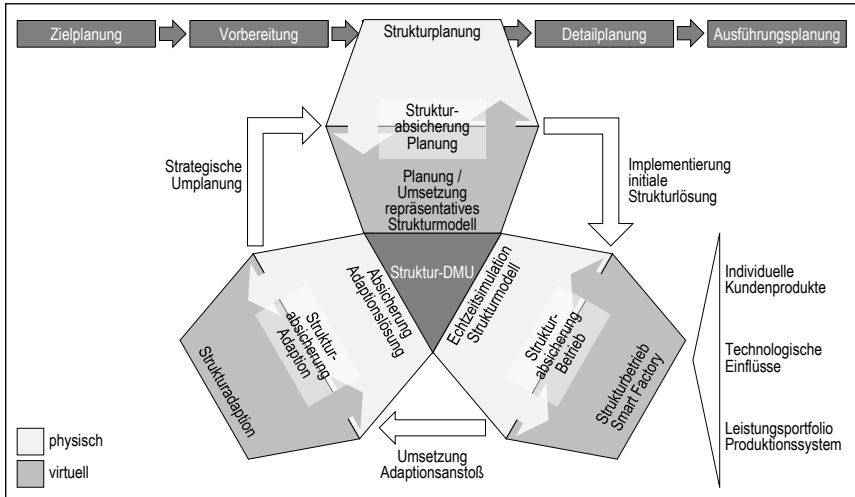


Abbildung 9-16: Transformation für die Planung und den Betrieb der Smart Factory [Hor117]

Entwicklung eines modularen Assistenzsystems für die Produktion (CyProAssist)

Das Projekt „Fertigungsassistenzsystem unter Verwendung soziocyber-physischer Produktionssysteme (CyProAssist)“ verfolgt das Ziel, das Fertigungsassistenzsystem FRIENDLYIMPROVER zu schaffen und dies unter realen Produktionsbedingungen anzuwenden. Das Assistenzsystem stellt den Menschen als kreativen Problemlöser in den Mittelpunkt der Fertigung und unterstützt ihn dabei, seine kognitiven Fähigkeiten zielgerichtet in den Produktionsprozess einzubringen [Pfab17]. Die informationstechnische Grundlage für das Fertigungsassistenzsystem wird durch einer Datenanalyse und -integration ermöglicht (Abbildung 9-17).

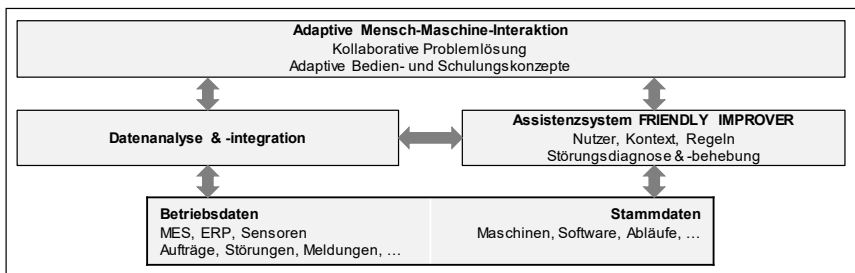


Abbildung 9-17: Modulares Assistenzsystems für die Produktion

Unterschiedliche Informationen, die bspw. ein einfacher Arbeiter an der Maschine oder ein Fertigungsleiter benötigen, zielgruppenspezifische Formen der Informationsdarstellung sowie Interaktionskonzepte zum Umgang mit cyber-physischen Systemen und Assistenzlösungen werden dadurch spezifiziert. Anhand von definierten Anforderungen wird die Mensch-Maschine-Schnittstelle neugestaltet. Hierzu werden die Dimensionen Mensch, Technologie und Organisation analysiert und adaptive Bedien- und Schulungskonzepte zur kollaborativen Problemlösung entwickelt [Wenz16].

Leitfaden zur Anpassung und Erweiterung eines konventionellen Produktionssystems mithilfe von I4.0

Das vorgestellte Framework dient als Leitfaden für produzierende Unternehmen bei der Gestaltung zukünftiger Produktionssysteme im Kontext von I4.0. Hierbei werden Lean Methoden und I4.0 im Produktionssystem zu einem Produktionssystem 4.0 (PS 4.0) mit agilen Prozessinnovationen verknüpft. Das PS 4.0 besteht aus Basiselementen des konventionelle Produktionssystems um seine bisherigen Vorteile weiterhin beibehalten zu können. Mithilfe von I4.0 können zum einen die Produktivität und das Komplexitätsmanagement durch Anpassung des konventionellen Produktionssystems verbessert werden (Abbildung 9-18). Zum anderen können die radikalen Potenziale von I4.0 systematisch genutzt werden, indem konventionelle Produktionssysteme dediziert erweitert werden [Liu18]. Basierend auf einer Studie [Schu15], wurden die Dimensionen Methode und Kultur als Kernelemente der Anpassung eines konventionellen Produktionssystems identifiziert. Methoden im konventionellen Produktionssystem sind hauptsächlich Lean Methoden [Kraf88], wie z. B. Just in Time, Kanban oder Poka Yoke. Im Rahmen einer Anpassung zum PS 4.0 müssen dies Methoden entsprechend angepasst und neue Methoden systematisch identifiziert werden. Die zweite Dimension Kultur zeigt einen starken Einfluss auf Veränderungsprozesse und bestimmt maßgeblich den Erfolg eines Unternehmens [Kott92]. Aus diesem Grund muss die Veränderung zum PS 4.0 genauestens geplant und ausgeführt werden [Liu18]. Die Erweiterung des Produktionssystems mithilfe von I4.0 basiert auf dem Internet of Production (IoP) [Schu17c] und fokussiert Datenanalytik sowie Industrie Apps. In der Dimension Datenanalytik werden eine angemessene Datenqualität sowie Standards definiert und notwendige Daten gesammelt und ausgewertet. Mithilfe der Industrie Apps werden Informationen, Datenauswertungen, etc. an Mitarbeiter weitergegeben [Liu18].

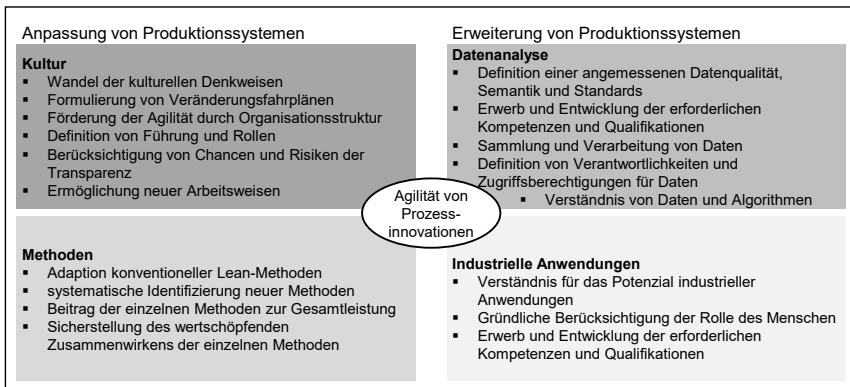


Abbildung 9-18: Schwerpunkte der Dimensionen zur Anpassung und Erweiterung eines konventionellen Produktionssystems mithilfe von I4.0 nach [Liu18]

Crossroads-Modell zur Steuerung des Materialflusses in Produktions- und Logistiksystemen

Das Crossroads-Modell von FELDMANN ET AL. zielt darauf ab, reale Produktions- und Logistiksysteme im Spannungsfeld zwischen Lean und digitalen Ansätzen der I4.0 zu veranschaulichen. Es dient der Analyse und Verbesserung der Istsituation indem es konkrete Handlungsempfehlungen für ein Unternehmen ableitet. Das Modell spannt eine Matrix mit vier Felder auf, wobei

die x-Achse die Dynamik von Produktvarianten-Mix und Ausbringungsmenge von niedrig bis hoch und die y-Achse die Komplexität der Struktur der Aufträge beschreiben (Abbildung 9-19). Jedes Feld beschreibt einen Steuerungsansatz: Statische Regeln, dynamische Regeln, Lean und digital Lean. Jeder Steuerungsansatz wird durch individuelle Prinzipien sowie Vor- und Nachteile gegenüber den anderen Steuerungsansätzen beschrieben. Die Handlungsempfehlungen für einen Steuerungsansatz ergeben sich aus der Verknüpfung der Merkmale Dynamik und Komplexität des betrachteten Produktions- bzw. Logistiksystems [Feld18].

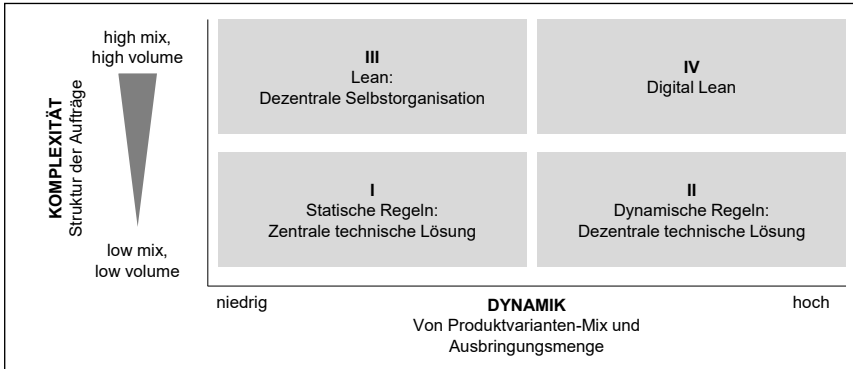


Abbildung 9-19: Crossroads-Modell [Feld18]

Einführungskonzept der Digitalen Fabrik aus makroskopischer Sicht

Das Konzept der Digitalen Fabrik fokussiert die Entwicklung von Produkten und Produktionssystem, lässt aber die Planung und Steuerung der Produktion in Echtzeit wie z. B. Materialflüssen außer Acht. BLOCK ET AL. entwickelte ein Einführungskonzept, welches I4.0, Simulation sowie Planung und Steuerung vereint [Bloc18]. Das Konzept besteht aus drei Phasen, wobei die ersten zwei Phasen sich auf den Materialfluss im Unternehmen konzentrieren (Abbildung 9-20). In der ersten Phase werden zunächst eine einheitliche Semantik und Syntax für die zu entwickelnden Modell entwickelt. Neben den strukturbeschreibenden Daten müssen die Daten auch Informationen enthalten, die die Prozesse und die wirtschaftliche Situation eines Unternehmens beschreiben. Die Verwaltung der Daten erfolgt dezentral mithilfe von CPS und die über geeignete Schnittstellen können diese in das ausgewählte Datenmodell übertragen werden. Basierend auf einem CPPS wird eine automatische Datenerfassung ermöglicht, sodass durch eine Aggregation der Modellkomponenten eine automatische Modellgenerierung und -ausführung erfolgt. Die dynamisch erzeugten Modelle ermöglichen eine flexible, automatisierte Modellierung von Teilprozessen, wie es der betrachtete Prozess erfordert. In der zweiten Phase wird eine semi-autonome simulative Planungsunterstützung entwickelt. Hierfür werden zunächst konkrete Szenarien definiert und gemäß den individuellen Prozessanforderungen modelliert. Mit dem Fokus auf eine ganzheitliche Produktionsvernetzung ist eine automatische Auslösung von Simulationen im CPPS-Umfeld möglich. So kann der Benutzer die Simulationsergebnisse und eine visuelle Entscheidungshilfe automatisch erhalten. In der dritten Phase wird dem CPS ermöglicht ohne externe Simulationssoftware oder Modellbereitstellung Simulationen durchzuführen. Für die CPPS-Simulation teilen die einzelnen CPS ihren aktuellen Zustand sowie Simulationsergebnisse mit, welche wiederum vom CPPS zur Simulation verwendet

werden. Darüber hinaus ermöglicht die Erweiterungsphase, dass andere Systeme und Simulationen, die sich nicht auf der CPS befinden, mit den dezentralen Simulationen interagieren. Dies wird durch die Vernetzung und standardisierte Schnittstellen im CPPS realisiert. In dieser Phase müssen die aktuell vorhandenen Spezialwerkzeuge um die definierten Schnittstellen erweitert werden. Dieser Schritt bildet den Abschluss des Prozessmodells. Die Implementierung des DF bietet die Möglichkeit einer Autonomieerweiterung, bei der Entscheidungen automatisch über das vorgestellte Modell- und Simulationsnetzwerk generiert werden [Bloc18].

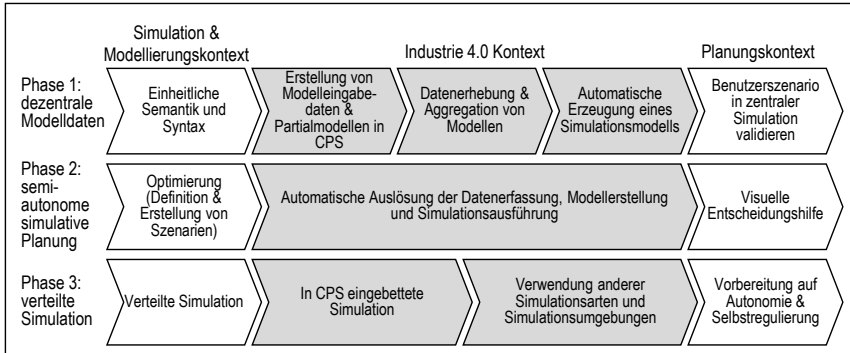


Abbildung 9-20: Konzept zur Einführung der Digitalen Fabrik aus makroskopischer Sicht nach [Bloc18]

Modulbaukasten Digitalisierung für die Implementierung von Informations- und Kommunikationssystemen

Um schnelle und aufwandsarme Aussagen über den aktuellen Stand der Produktion sowie zuverlässige Prognosen treffen zu können, sind geeignete Informations- und Kommunikationssysteme notwendig. Zur Überwindung der informationstechnischen Heterogenität in der Produktion wurden Lösungsbausteine entwickelt, die Verfahren und Spezifikationen, vor allem aber auch konkrete Anwendungen und Umsetzungen, umfassen (Abbildung 9-21) [Lang17]. Die Standardisierung der Bausteine orientiert sich am „Referenzarchitekturmodell I4.0“ (RAMI4.0) [Adol15]. Der Lösungsbaustein Smarte Systeme fokussiert die Einbindung von Maschinen in die Daten- und Informationsgewinnung durch das Aufrüsten mit Sensorik und Aktorik. Smarte Objekte ermöglichen eine Identifikation und Standortermittlung von Gegenständen bzw. mobilen Endgeräten. Basierend auf der Identifikation können Produkte und Behälter in der Produktion verfolgt werden. Der zentrale Lösungsbaustein LinkedFactory bildet die Vernetzung der Daten und Dienste in der Produktion. Dadurch können etablierte Kommunikationsprotokolle in der Feldebene, Datenquellen in höheren Schichten der Automatisierungspyramide wie MES- und ERP-Systemen und Applikationen zur Datenerfassung, -visualisierung und -auswertung verknüpft werden. Der vierte Lösungsbaustein Visualisierung und Interaktion fokussiert die Entwicklung von adaptive Bedienkonzepte, um den Mitarbeitern entsprechend ihrer Rolle, ihrer Fähigkeiten und ihrer Situation bedarfsgerechte Informationen und Interaktionsmöglichkeiten geben zu können. Zur Analyse und Data Science werden IKT und neue Methoden verwendet, wie z. B. Data Mining und Maschinelles Lernen [Lang17]. Diese ermöglichen es bisher ungenutzte Einsparungs- oder Verbesserungspotenziale zu nutzen [Saeu11].

Diese modularen und kombinierbaren Anwendungen und Dienste lassen sich als Unterstützungssysteme in Produktion und Logistik implementieren, um so die Komplexität beherrschen zu können [Lang17].

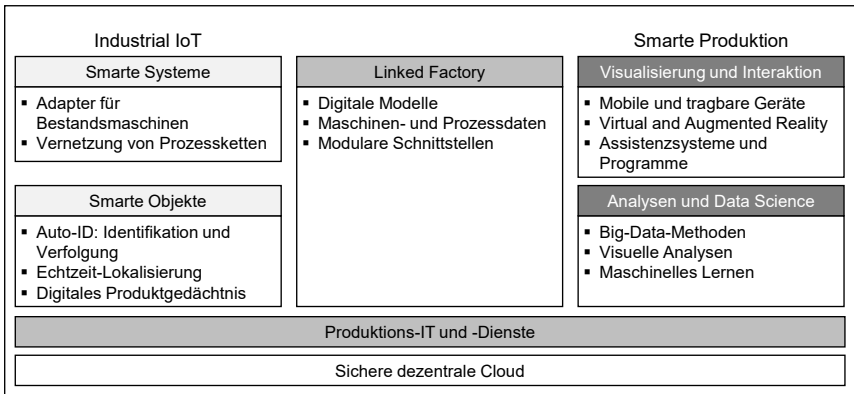


Abbildung 9-21: Lösungsbausteine zur Umsetzung flexibler Produktionssysteme nach [Lang17]

Digitalisierung der Logistik

Das Vorgehensmodell zur Implementierung eines intelligenten Logistikraums besteht aus einer Herangehensweise und einem Methodenportfolio und berücksichtigt die Anforderungen der Digitalen Transformation an bestehende Logistikkonzepte. Im ersten Schritt wird festgestellt, wo Handlungsbedarfe in der logistischen Kette bestehen (Abbildung 9-22).

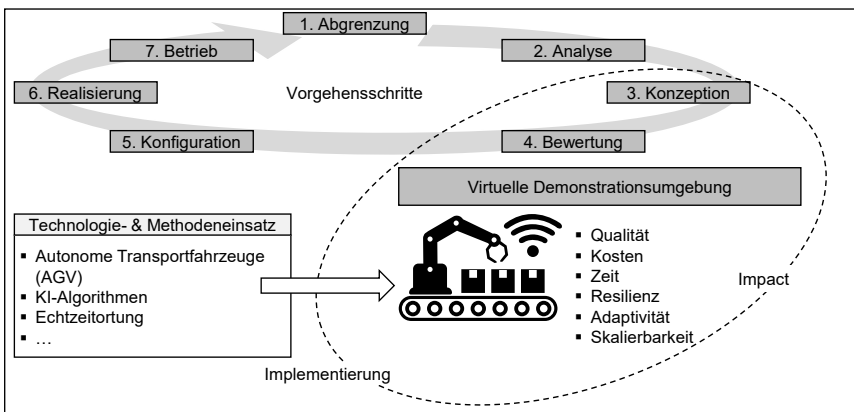


Abbildung 9-22: Vorgehensmodell des intelligenten Logistikraums nach [Behr19]

Zur Definition der Zielstellungen werden die Logistikräume analysiert, indem die Betrachtungsebenen System, Prozess, Objekt und Infrastruktur betrachtet werden. Dabei werden die Ebenen nicht nur aus physischer (Material, Maschine, Prozess), sondern auch aus informationstechnischer (Daten), energetischer und finanzieller Sicht betrachtet. In der Konzeptionsphase werden durch eine Technologiemorphologie Logistikkösungen identifiziert, welche verändert, neu entwickelt oder kombiniert werden. Basierend auf der Konzeption wird ein digitales

Modell entwickelt, welches hinsichtlich Leistungskennzahlen, wie z. B. Resilienz; Adaptivität oder auch Skalierbarkeit, bewertet und optimiert wird. Anschließend wird das optimierte Konzept prototypisch umgesetzt. Nach erfolgreicher Testphase erfolgt ein Rollout und das Konzept wird in den Serienbetrieb aufgenommen. Das Vorgehensmodell stellt einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess dar, um so mittel- bis langfristige Ziele umsetzen zu können [Behr19].

9.1.3 Sonstige Ansätze

Tabelle 9-3: Sonstige bestehende Ansätze zur Digitalisierung von Unternehmen

Hauptquelle	Ansatz (vollst. Titel)	Autoren	Projekt	Literatur
Fritz 2004	Zielführende Modellierung und Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der digitalen Fabrik	J.U. Fritz	-	[Frit07]
Kagermann et al. 2012	Im Fokus: Das Zukunftsprojekt 14.0 - Handlungsempfehlungen zur Umsetzung	H. Kagermann, W. Wahlster, J. Helbig	-	[Kage12]
Landherr et al. 2013	Digitale Fabrik	M. Landherr; M. Neumann, J. Volkman, C. Constantinescu	-	[Land16, Land13, West13b]
Steinbeis 2015	I-RAMP3 - Intelligent Network Devices for fast Ramp-up	Steinbeis-Europa-Zentrum der Steinbeis Innovation gGmbH	i-RAMP3	[Höpt14]
Warschat 2015	Synchronisierte Technologieadaption als Treiber der strategischen Produktinnovation	J. Warschat	synTech	[Wars15]
Bleider & David 2016	Strategische Ausrichtung der Unternehmens-IT zur Umsetzung von Industrie-4.0-Konzepten	M. Bleider, C. David	DigiKMU	[Blei16]

Modellierung schlanker Fertigungssysteme mit der Digitalen Fabrik nach FRITZ

Der Großteil des Aufwands zur Erstellung eines Modells der Digitalen Fabrik stellt die Datenbeschaffung dar. Nicht immer ist dieser Aufwand gerechtfertigt, da eine detaillierte Simulationsuntersuchung des Materialflusses und des zugehörigen Modellaufbaus nicht immer zielführend und damit notwendig ist. Fritz entwickelte hierfür eine Heuristik zur Entscheidungsfindung sowie Methoden und Werkzeuge zur zielführenden Analyse, Modellierung und Auswertung einer Materialflusssimulation (Abbildung 9-23).

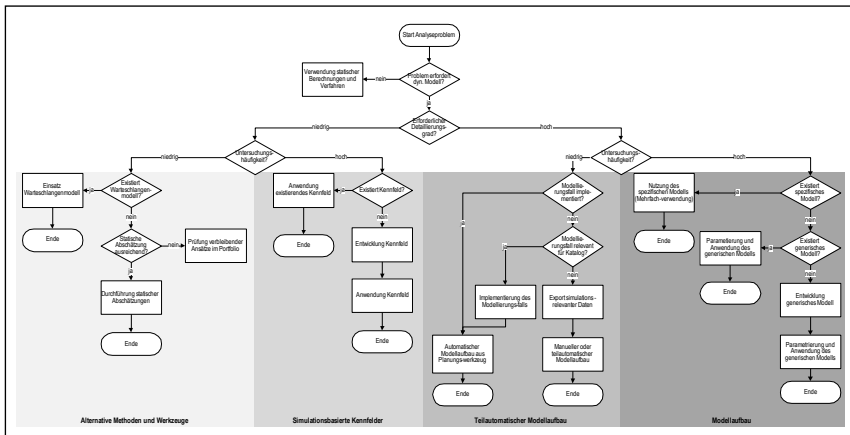


Abbildung 9-23: Heuristik zur Entscheidungsfindung zur Materialflusssimulation [Frit07]

Weiterhin wurde eine geeignete Schnittstelle für einen automatischen Simulationsaufbau basierend auf statischen Fertigungsmodellen der Digitalen Fabrik konzipiert und implementiert [Frit07].

Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der Smart Factory nach KAGERMANN

Ziel der Handlungsempfehlung von KAGERMANN ist die Umsetzung der Smart Factory in produzierenden Unternehmen unter Berücksichtigung der Schwerpunkte „Reales Umfeld“, „Wirtschaftliches Umfeld“, „Faktor Mensch“ sowie „Faktor Technologie“ (Abbildung 9-24). Der Schwerpunkt Reales Umfeld betrachtet die Machine-2-Machine Kommunikation, Ressourceneffizienz und die Netzinfrastruktur, wohingegen Geschäftsmodelle, Dienste/Services und die Unternehmenssoftware im wirtschaftlichen Umfeld im Fokus stehen. Der Faktor Mensch betrachtet u. a. die Mensch-Maschine-Interaktion, Akzeptanz & Safety, sowie Aus- und Weiterbildung. Der vierte Schwerpunkt zielt u. a. auf Kommunikationstechnologien, Sensorik und Aktuatorik sowie Smart Engineering ab. Für jeden einzelnen Schwerpunkt wurden Maßnahmen und Handlungsempfehlungen entwickelt, welche in kurzfristige und mittelfristige Handlungsfelder unterteilt wurden. Auf dieser Basis können produzierende Unternehmen individuelle die geeignetsten Maßnahmen auswählen und implementieren. [Kage12]

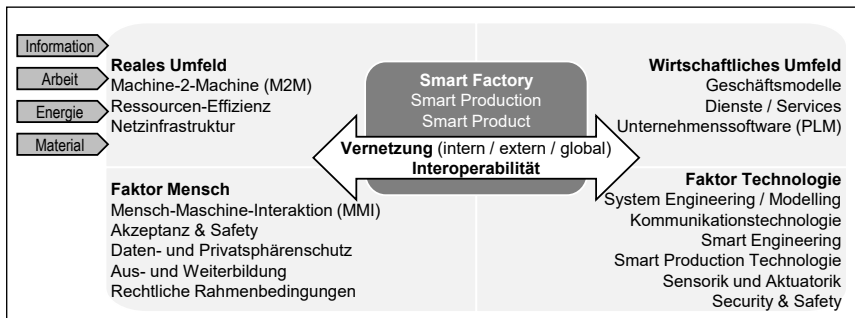


Abbildung 9-24: Smart Factory nach [Kage12]

Implementierung einer Digitalen Fabrik nach LANDHERR ET AL.

Landherr et al. verfolgen einen ganzheitlichen Ansatz zur Umsetzung der digitalen Fabrik, indem kurz-, mittel-, und langfristige Ziele gemeinsam betrachtet werden (Abbildung 9-25). Auf Fabrikebene werden die Produktentwicklung, Prozess- und Fabrikplanung vernetzt und parallelisiert, sodass das Produktionswissen bereits in frühen Phasen bereitgestellt werden kann. Durch diese Vernetzung wird der Kennwert „Time to Production“ verkürzt. Auf der Netzwerkebene werden durch Cloud-Lösungen externe Interessengruppen angebunden. Durch die Nutzung der Cloud-Lösungen erfolgt ein gezielter und sicherer Datenaustausch zwischen der Fabrik und den internen und externen Interessensgruppen [Land13].

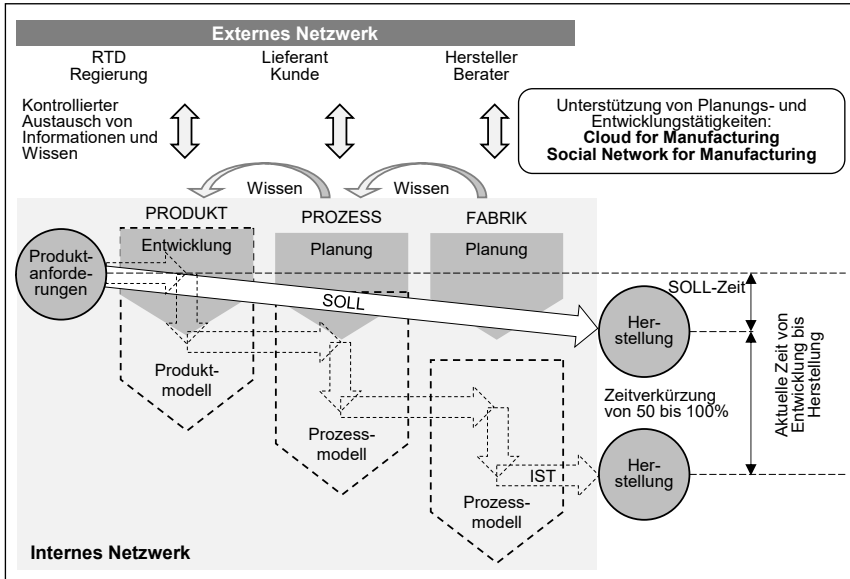


Abbildung 9-25: Zukunftsvision der digitalen Fabrik [Land13]

Intelligente Netzwerkgeräte für einen beschleunigten Ramp-up (i-RAMP3)

Das Projekt „Intelligent network devices for fast ramp-up (I-RAMP³)“ hat zum Ziel die Anlaufphasen von Produktionssystemen, die sog. ramp-up-Phasen zu optimieren und zu verkürzen [Höpt14]. Konventioneller Produktionsanlagen werden dabei in netzwerkfähige Geräte (NETDEVs) umgewandelt, die die Bausteine eines heterogenen Produktionsnetzwerks bilden [Gonc14]. Diese agentenbasierten Produktionsgeräte sind mit standardisierten Schnittstellen und standardisierten Kommunikationsprotokollen sowie mit selbstbeschreibenden Fähigkeiten ausgestattet [Reis14]. NETDEVs sind in der Lage, sich an unterschiedliche Produktionseinrichtungen und Produktionsbedingungen anzupassen, indem sie miteinander über die optimale Konfiguration verhandeln. Darüber hinaus können auch Sensoren und Sensorgitter problemlos in das NETDEV-basierte Fertigungssystem integriert werden. Dieser ganzheitliche Ansatz ermöglicht die schnelle Integration und den Austausch von Komponenten sowie die schnelle Anpassung des gesamten Fertigungssystems an veränderte Kundenanforderungen [Höpt14].

Synchronisierte Technologieadaption

Das Projekt „Synchronisierte Technologieadaption als Treiber der strategischen Produktinnovation (syncTech)“ verfolgt das Ziel Defizite bezüglich Lösungen und Werkzeugen entlang des Prozesses der Technologieadaption zu beheben. Hierfür wurde das syncTech Modell entwickelt (Abbildung 9-26), welches aus den Phasen Identifikation, Bewertung und Integration besteht. In der Identifikationsphase werden Technologien mithilfe eines Recherchetools identifiziert und in einem TechnologieWiki inklusiver Beschreibung gespeichert. Ein Technologiereifegradmodell unterstützt die Bewertung des Reifegrads sowie der Potenziale der identifizierten Technologie. Darauf basierend kann die Technologie hinsichtlich seiner Einsatzmöglichkeiten in Projekten bewertet werden. In der Integrationsphase werden Rollenmodelle und Verantwortlichkeiten hinsichtlich der Verwendung der Technologie festgelegt und die organisatorische

Einbindung z. B. in bestehende Prozesse geplant und umgesetzt. Durch die sich ständig erweiternde Wissensbasis im TechnologieWiki sowie der strukturierten Vorgehensweise kann der Prozess der synchronen Technologieadaption verbessert werden [Kore15].

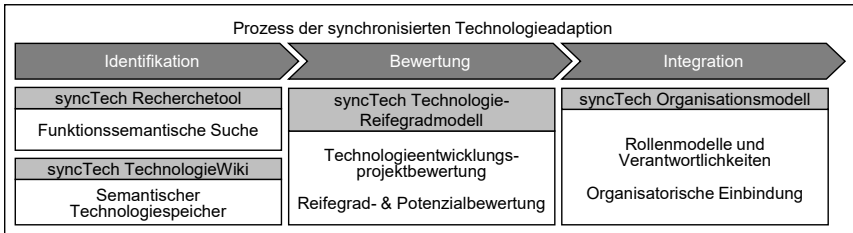


Abbildung 9-26: syncTech Model [Kore15]

Gestaltungsmodell für den digital vernetzten Shopfloor im Werkzeugbau

Salem entwickelte eine Gestaltungsmodell zur systematischen und strukturierten Gestaltung der Wertschöpfung auf dem digital vernetzten Shopfloor im Werkzeugbau [Salm16]. Das Gestaltungsmodell basiert auf den Dimensionen Struktur, Aktivitäten und Verhalten, welche im Rahmen des operativen Managements nach BLEICHER definiert wurden [Blei17]. Die Dimension Struktur beinhaltet digitale Plattformen mit dem Ziel intelligente IT-Plattformen unter Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten bereit zu stellen (Abbildung 9-27).

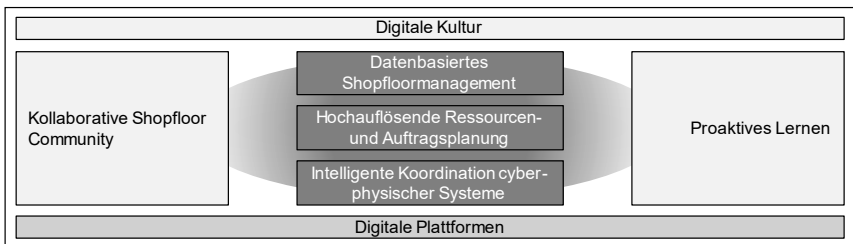


Abbildung 9-27: Gestaltungsmodell für den digital vernetzten Shopfloor im Werkzeugbau nach [Salm16]

Die Aktivitätselemente fokussieren ein datenbasiertes Shopfloormanagement, eine hochauflösende Ressourcen- und Auftragsplanung sowie eine intelligente Koordination von CPS. Mithilfe des Datenbasierten Shopfloormanagements soll die Mitarbeiterverantwortung durch die Unterstützung von IT-Systemen erhöht werden, sodass Aufträge zielorientiert bearbeitet werden können. Das Ergebnis einer hochauflösenden Ressourcen- und Auftragsplanung ist eine gesteigerte Effektivität, Effizienz und Transparenz. Durch geeignete aufbereitete Daten können dabei Entscheidungen unterstützt werden, sodass eine autonome Umplanung bestimmter Fertigungsaufträge möglich ist. Eine intelligente Koordination von CPS ermöglicht eine Synchronisierung von System und Shopfloor, aber sie führt auch zu einer optimalen Zusammenarbeit zwischen Maschinen und Menschen. Die Dimension Verhalten beinhaltet die Gestaltungselemente Digitale Kultur, Proaktives Lernen sowie kollaborative Shopfloor Community. Die Digitale Kultur resultiert in einer Akzeptanz der Mitarbeiter gegenüber digitalen Technologien und zugehörigen neuen Arbeitsweisen. Basierend auf digital aufbereiteten Daten erfolgt das kollektive organisationale Lernen, aber auch das individuelle Lernen der einzelnen Mitarbeiter. Dadurch kann der Shopfloor datengestützt weiterentwickelt werden. Im Rahmen der kollaborativen Shopfloor

Community findet eine Kooperation und Kollaboration nicht nur zwischen den Mitarbeitern statt, sondern auch mit externen Wertschöpfungspartnern und Kunden. Dadurch wird die Produktivität des Shopfloors erhöht und es wird eine Basis zum aktiven Wissensaustausch gebildet [Salm16].

Die Gestaltungselemente stehen in Wechselwirkungen zueinander und zu anderen Bereichen außerhalb des Shopfloors. Bspw. erfolgt die Aufnahme von Daten im Gestaltungselement intelligente Koordination von CPS. Diese Daten dienen als Grundlage für die hochauflösende Ressourcen- und Auftragsplanung, aber auch für das proaktive Lernen sowie das datenbasierte Shopfloormanagement. Weiterhin hart die Infrastruktur, welche im Strukturelement Digitale Plattformen beschrieben wurde, Wechselwirkungen mit der im Unternehmen bestehenden IT-Infrastruktur. Um eine Durchgängigkeit der Daten und Informationen gewährleisten zu können müssen die Digitalen Plattformen auf dem Shopfloor mit den IT-System im restlichen Unternehmen kompatibel sein [Salm16].

Referenzarchitektur zur Realisierung von Lean Production mit digitalen Technologien

Kolberg entwickelte basierend auf einer Referenzarchitektur einheitliche, technologieunabhängige informationstechnische Schnittstellen für die Lean Production, um so eine Nutzung digitaler Technologien in bestehenden Lean-Methoden zu ermöglichen. Die Referenzarchitektur besteht aus einer Systemarchitektur, einem Informationsmodell sowie einer Softwarearchitektur. Im Rahmen der Systemarchitektur werden Rollen und Ressourcen, z. B. Verwalter, Logistiksystem oder auch Werker, sowie deren Zusammenhänge beschrieben und durch die benötigten Funktionalitäten aus dem Informationsmodell ergänzt. Dabei wird für jeden Anwendungsfall der 30 berücksichtigten Lean-Methoden ein Kommunikationsdiagramm erstellt. Die Softwarearchitektur beschreibt die Schnittstellen, indem sie das gemeinsame Netzwerk, das Rollen-Interface, Prozesslogik, Ressourcen-Interface und Arbeitsstationen berücksichtigt und deren Zusammenhänge aufzeigt [Kolb18].

9.1.4 Bewertung der Transformationskonzepte

Tabelle 9-4: Qualitative Bewertung der Transformationskonzepte

Nr. Ansätze		Anforderungen						
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Digitalisierung von Unternehmen	1 Caggemini Consulting Industry 4.0 Framework [Bech14]	○	◐	◑	●	●	○	○
	2 Entwicklung einer unternehmensweiten I4.0-Einführungsstrategie [Merz16]	○	●	○	◐	●	◐	○
	3 Digitale Transformation eines Unternehmens [Plas16a]	○	◐	○	●	●	◐	○
	4 Roadmap I4.0 [Seit16]	○	●	○	○	●	●	●
	5 Roadmap zur Digitalen Transformation der Automobilindustrie [Wink17a]	○	◐	◑	●	●	◐	○
	6 Digitale Transformation in KMU [Pete17]	●	●	◐	●	●	◐	○
	7 Strategische Ausrichtung der Unternehmens-IT zur Umsetzung von Industrie-4.0-Konzepten [Köni17]	●	●	◐	●	●	○	○
	8 Leistungssteigerung von Unternehmen durch I4.0 [Knos18]	○	◐	○	●	●	○	○
	9 Vorgehensmodell zur Digitalen Transformation von Unternehmen [Appel18]	○	●	◐	●	●	○	○
	10 I4.0 für KMU in der Textil- und Bekleidungsindustrie [Wasc18]	●	◐	○	○	○	◐	○
	11 Ganzheitliche Digitalisierung von Arbeitsprozessen [Ters18]	○	◐	○	◐	●	○	●
	12 Digitalisierung produzierender Unternehmen [Schu19]	○	●	●	●	●	○	○
	13 Ganzheitliche Digitale Transformation [Dumi19]	○	◐	◑	●	●	◐	●
	14 Digitalisierung des Mittelstands [EIS19]	●	●	◐	●	●	◐	○

	Nr. Ansätze	Anforderungen						
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Digitalisierung von Un-	15 Nachhaltigen Digitalisierung von Unternehmen [Kuma20]	○	◐	○	●	●	○	○
	16 Modulares Transformationskonzept zur Digitalisierung von produzierenden Unternehmen [Auri20]	○	●	●	●	●	●	●
	17 Toolkit zur Einführung von I4.0 in KMU [Sopa20]	●	◐	○	○	●	○	●
	18 Model[platform 14.0 für Produktionsunternehmen [Köbl20]	○	◐	●	◐	○	○	○
Digitalisierung des Produktionssystems	1 Umsetzung einer wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik [Rüdo06]	○	●	●	○	●	○	○
	2 Materialflusssteuerung mithilfe des Internet der Dinge [Günt10b]	○	○	●	◐	○	◐	○
	3 Einführung cyber-physischer Systemmodule in der Intralogistik und Produktionsplanung [Rein15]	○	◐	●	●	○	◐	○
	4 Vorgehensmodell zur Migration zum CPPS [Mor116]	○	●	●	◐	●	◐	◐
	5 Digitalisierung der Qualitätssicherung [Albe16]	○	●	●	●	●	○	○
	6 CPS-Matchmaker für KMU [Jord17a]	●	○	●	○	●	●	○
	7 Transformationsprozess zur intelligenten und vernetzten Fabrik [Wein17]	○	●	●	●	●	◐	○
	8 Ganzheitlichen virtuellen Absicherung der Fabrikstruktur [Hor117]	○	◐	●	●	○	○	○
	9 Menschenzentrierte CPS im Mittelstand [Schu18]	●	◐	●	●	●	○	◐
	10 Modulare Assistenzsysteme für die Produktion [Wenz16]	○	○	●	○	○	●	○
	11 Anpassung und Erweiterung eines konventionellen Produktionssystems mithilfe von I4.0 [Liu18]	○	○	●	●	○	○	○
	12 Reifegradbasierter Handlungsleitfaden zur Einführung von IKT [Lanz18]	○	●	●	◐	●	●	○
	13 Crossroads-Modell zur Steuerung des Materialflusses in Produktions- und Logistiksystemen [Feld18]	○	○	●	●	○	○	○
	14 Modulare, sozio-technische Gestaltungs- und Einführungssystematik [Nöhr19]	○	◐	●	◐	●	○	◐
	15 Einführungskonzept der Digitalen Fabrik aus makroskopischer Sicht [Bloc18]	○	◐	●	◐	○	○	○
	16 Modulbaukasten Digitalisierung für die Implementierung von Informations- und Kommunikationssystemen [Lang17]	○	○	●	●	○	◐	○
	17 Vorgehensmodell zur Digitalisierung der Logistik [Behr19]	○	◐	●	○	●	◐	○
	18 Vorgehensmodell zur erfolgreichen Umsetzung von I4.0 in KMU [Peuk20]	●	●	●	●	○	○	○
Sonstige Ansätze	1 Modellierung schlanker Fertigungssysteme mit der Digitalen Fabrik [Frit07]	○	●	●	○	◐	○	○
	2 Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der Smart Factory [Kage12]	○	○	●	◐	○	○	○
	3 Implementierung einer Digitalen Fabrik [Land13]	○	○	●	●	○	○	○
	4 Intelligente Netzwerkgeräte für einen beschleunigten Ramp-up [Höpt14]	○	○	●	○	○	●	○
	5 Synchronisierte Technologieadaption [Kore15]	○	◐	●	○	○	●	○
	6 Gestaltungsmodell für den digital vernetzten Shopfloor im Werkzeugbau [Salm16]	○	○	●	●	○	◐	○
	7 Realisierung von Lean Production mit digitalen Technologien [Kob18]	○	●	●	◐	●	◐	○

● Anforderung vollständig erfüllt ◐ Anforderung teilweise erfüllt ○ Anforderung nicht erfüllt

9.2 Herausforderungen von KMU

Tabelle 9-5: Herausforderungen der Digitalisierung von KMU

Quelle	Kompetenzen / Ressourcen	Ökonomisch / Finanzen	Kulturell / Organisatorisch	Rechtliche und politische Rahmenbedingungen	Technisch	Implementierungsprozess
[Demal6]	<ul style="list-style-type: none"> □ Veränderung der Anforderungen an Mitarbeiter, mangelnde Kompetenzen und deren Qualifizierung [Bard16, DIHK16a, Hamm16, Baue14a, Geis14] □ Mangel an technischem Personal, Fachkräftemangel, Personalmangel [Birk16c, Birk16a, Birk16b, DIHK16b, Birk15a, Bund15, Löwe15, Risc15, Stal15, Geis14, GfK14, Ramm05] □ Komplexität des Themas (Nutzen von I4.0 unklar) [Bard16, Birk16b, Nieb15] 	<ul style="list-style-type: none"> □ Kosten und Investitionen sind schwer abschätzbar, da Digitalisierung der Wertschöpfungskette sehr komplex [DIHK16b, BMW115, Comm15, Geis14] □ Profitabilität unklar [DIN20a, Comm15] □ Fehlende finanzielle Ressourcen [DIHK16a, BMW115, Ems14] □ Unklarer wirtschaftlicher Nutzen bei hohem Investitionsbedarf [Bard16, Birk16a, Birk16b, Birk15b] 	<ul style="list-style-type: none"> □ Digitalisierungshemmnisse → Bereichsdenken, Missgunst, Neid, Unwille zu Veränderungen, Widerstand [Birk16b, Bitz90] □ Unklare Zuständigkeiten [Comm15] □ Sinkende Produktivität in der Umstellungsphase [Comm15] □ Mangelnde Motivation, Prozesse und Abläufe zu erfassen und analysieren [Welz15] 	<ul style="list-style-type: none"> □ Bisherige Gesetze und Richtlinien unklar bzw. nicht ausreichend [MUNCI15, Nieb15, Risc15, Bund14] □ Wettbewerbsrecht, Eigentumsrecht, Schutz des geistigen Eigentums [DIHK16a, DIHK16b] □ Datenschutz und Datenschutz-Grundverordnung [HWK15, IHK15] □ Outsourcing und Cloud-Computing □ Verantwortung, Zusammenarbeit von Handlungsebene □ Zeit- und kostenaufwendige Zulassungsverfahren [Birk16a, DIHK16a] 	<ul style="list-style-type: none"> □ Unmittelbare, organisatorische und personelle IT-Sicherheit [BMW16a, DIHK16a, Gayel15, Risc15, GfK14, Spat13] □ Datensicherheit und IT-Kriminalität [Bard16, Birk16a, Birk16b, Buss16, Birk15b, Birk15a, Bund15, Comm15, Löwe15, Geis14] □ Sicherheit von Technologien [DIHK16b, Nieb15] □ Sicherheitszertifizierung □ Zahlreiche analog-digitale Schnittstellen [Brau15, Nieb15] □ Fehlende Standards, Produktstandards [Bard16, Birk16b, DIHK16a, Comm15, Risc15, Geis14] □ Unbemerkte Effizienzverluste □ Mangelnde Breitbandversorgung v.a. im ländlichen Raum [DIHK16a, Risc15] □ Infrastruktur, z. B. Übertragungsräte, unzureichende Netzwerksicherheit / Datenspeicherung [Birk16a, BMW115, Bund15, Nieb15, Risc15, ZDH14] □ Abhängigkeit von Technologien / Funktionsverlässlichkeit [Löwe15, GfK14] □ Niedriger Reifegrad der erforderlichen Technologien [Geis14] 	<ul style="list-style-type: none"> □ Profitabilität unklar → Digitalisierungsstrategie selten vorhanden □ Sinkende Produktivität in der Umstellungsphase [Comm15]

Quelle	Kompetenzen / Ressourcen	Ökonomisch / Finanzen	Kulturell / Organisatorisch	Rechtliche und politische Rahmenbedingungen	Technisch	Implementierungsprozess
[Orze20] [Orze18]	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Mangel an technischem Wissen <input type="checkbox"/> Komplexität <input type="checkbox"/> Hoher Koordinationsaufwand <input type="checkbox"/> Notwendigkeit, einen geeigneten Forschungsmerkmalen zu finden <input type="checkbox"/> Mangelnde Kenntnis von industriellen 4.0-Technologien und Technologieanwendungen <input type="checkbox"/> Einschränkungen beim Fabriklayout 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Hohe erforderliche Investitionen <input type="checkbox"/> Mangel an Geldmitteln <input type="checkbox"/> Mangel an klar definierten wirtschaftlichen Nutzen <input type="checkbox"/> Produktkennzeichen 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Mangelndes Vertrauen zwischen den Partnern <input type="checkbox"/> Mangelnde Unterstützung durch das Top-Management <input type="checkbox"/> Beschränkte Autonomie <input type="checkbox"/> Restriktive Denkweise <input type="checkbox"/> Nicht unterstützende Organisationsstruktur <input type="checkbox"/> Akzeptanz der Mitarbeitenden <input type="checkbox"/> Mangelnde Unterstützung durch Kunden Lieferanten <input type="checkbox"/> Fokus auf das Tagesgeschäft <input type="checkbox"/> Bewusstsein über die Potenziale von Robotern <input type="checkbox"/> Mangelnde Unterstützung durch die IT-Abteilung 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Bedenken hinsichtlich der Datensicherheit <input type="checkbox"/> Mangelnde Unterstützung durch die Regierung <input type="checkbox"/> Bürokratie <input type="checkbox"/> Eingesschränkte Gesetze und Vorschriften 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Mangel an Standards <input type="checkbox"/> Unvollständigkeit über die Zuverlässigkeit der Systeme <input type="checkbox"/> Schwache IT-Infrastruktur <input type="checkbox"/> Sicherheitsdaten <input type="checkbox"/> Schwierige Interoperabilität <input type="checkbox"/> Hohe Kompatibilität <input type="checkbox"/> Unreife der Technologie <input type="checkbox"/> Zustand des Maschinenparks 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Bedarf an neuen Geschäftsmodellen <input type="checkbox"/> Fehlen eines methodischen Ansatzes für die Implementierung <input type="checkbox"/> Hoher Koordinationsaufwand <input type="checkbox"/> Erfordliche Zeit für die Implementierung <input type="checkbox"/> Erforderliche Änderungen für die Implementierung <input type="checkbox"/> Schwierigkeit bei der Nachtragsprognose <input type="checkbox"/> Produktkennzeichen
[Ulas19]	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Mangel an Finanzmitteln <input type="checkbox"/> Hohe Kosten für Computer und Netzwerk 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Mangel an Finanzmitteln <input type="checkbox"/> Hohe Kosten für Computer und Netzwerk 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Unternehmensmerkmale (einschließlich Größe, Art des Unternehmens) <input type="checkbox"/> Bisherige Erfahrungen mit Veränderungen <input type="checkbox"/> Widerstand gegen Veränderungen 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Datenschutz und Sicherheit (Bedenken hinsichtlich rechtlicher Fragen) <input type="checkbox"/> Gesetzliche Anforderungen, die sich aus der Digitalen Transformation ergeben 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Datenschutz und Sicherheit (Bedenken hinsichtlich der Sicherheit im Internet) <input type="checkbox"/> Infrastruktur <input type="checkbox"/> Die Bereitstellung von Richtlinien für geeignete Hardware und Software <input type="checkbox"/> Das Fehlen von Programmen für den Informationsaustausch 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Das Fehlen einer technologischen Roadmap und des Knows-how für die Digitalen Transformation (Beteiligte wie Technologieanbieter, Investoren, Öffentlichkeit, Benutzer, Bildungseinrichtungen)
[Lind17]	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Qualifikationsanforderungen an die Mitarbeiter 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Zielkonflikt zwischen der langfristigen Strategie der Unternehmen und der hohen Geschwindigkeit sowie Komplexität von Innovationen und Veränderungsprozessen [Koffel 6] 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Arbeits- und Gesundheitsschutz 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Adaptierbarkeit von IT-Systemen <input type="checkbox"/> Ablauf einer Mensch-Maschine-Kooperation <input type="checkbox"/> Sicherheit von Unternehmensdaten 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Umsetzung von (digitalen) Innovationen KMU oft als zu komplex und teuer angesehen teilweise auch als nicht relevant eingestuft wurde

Quelle	Kompetenzen / Ressourcen	Ökonomisch / Finanzen	Kulturell / Organisatorisch	Rechtliche und politische Rahmenbedingungen	Technisch	Implementierungsprozess
[Domb18]	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Qualifikation und Sensibilisierung der Mitarbeiter <input type="checkbox"/> Mangelnden Ressourcen an GPS 4.0-Experten <input type="checkbox"/> Entscheidungskompetenz <input type="checkbox"/> Nicht ausreichend Ressourcen und Kapazitäten für die Abarbeitung der im Projekt der 14.0-Implementierung anfallenden Aufgaben 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Investitionsaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Auslastung durch das Tagessgeschäft <input type="checkbox"/> Akzeptanz bezüglich neuer Technologien <input type="checkbox"/> Alle für die entscheidende Entscheidung relevanten Daten aufbereitet zur Verfügung gestellt → data-driven-decision-making (DDDM)“ Organisation <input type="checkbox"/> Prozessorientierung (Ein Prozess eine wiederkehrende Abfolge von Tätigkeiten in Vorgänger-Nachfolger-Beziehung, mit definiertem Anfangs- und Endzeitpunkt. Das Ziel eines Prozesses ist es, wertsteigernd Inputs in Outputs zu transformieren) 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Datenschutz 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Eignung einer Technologie (potenzielle Handlungsfelder auswählen sollen, die ausgereift sind, sich aufwärts- und rückwärts in die bestehenden Prozesse und in soziotechnische Systeme integrieren lassen) <input type="checkbox"/> IT- und Software-Infrastruktur --> KMU hinken hier meist dem auf dem Markt zur Verfügung stehenden Angeboten hinterher. <input type="checkbox"/> Produktionsequipment und Maschinen --> Eignung für I4.0 prüfen <input type="checkbox"/> IT-Sicherheit → Auch hier haben KMU wenig Erfahrung und teilweise wenig Expertenwissen, was wiederum zu einem Hindernis hinsichtlich der I4.0-Implementierung führt. 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Derzeitige Umsetzungsstand bzw. Reifegrad des soziotechnischen Systems <input type="checkbox"/> Prozessbeschreibungen (Input, Output, Zielgrößen und Kennzahlen) <input type="checkbox"/> Projektorganisation zur Implementierung (I4.0 Experten, Prozesseigner, Mitarbeitervertreter und IT-Spezialisten)
[Lind19]	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Personalmangel 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Wenig Budget 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Fokus auf rentables Tagessgeschäft <input type="checkbox"/> Arbeit und Remotearbeit kein Phänomene wie Technostress und Resilienzverlust <input type="checkbox"/> Mitarbeiter sollten von Führungskräften entsprechend geschult werden <input type="checkbox"/> Team ist eine erhöhte Selbstorganisation, die von Mitarbeitern geleitet ist. <input type="checkbox"/> Herausforderungen für Führungskräfte sind: Führung auf Distanz, aktuell Teams führen sowie hybride (online/offline) Führung. 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/>

Quelle	Kompetenzen / Ressourcen	Ökonomisch / Finanzen	Kulturell / Organisatorisch	Rechtliche und politische Rahmenbedingungen	Technisch	Implementierungsprozess
[Voig19]	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Geändertes Anforderungsprofil (Technisches Verständnis, IT-Kompetenzen) <input type="checkbox"/> Überlastungen und Überforderungen (Neue Anforderungen, Weiterführende Aufgaben) 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Lange und ungewisse Horizonszeiten <input type="checkbox"/> Hohe Investitionen und Personalkosten <input type="checkbox"/> Wettbewerbsdruck <input type="checkbox"/> Leistungsdruck <input type="checkbox"/> Preis- und Kostendruck <input type="checkbox"/> Marktunrisikobarrieren <input type="checkbox"/> Veränderung von Geschäftsmodellen <input type="checkbox"/> Ressourcenbereitstellung <input type="checkbox"/> Abhängigkeiten (Anbieter, Systemlieferanten) 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Interner Widerstand → Akzeptanz <input type="checkbox"/> Fehlerkultur <input type="checkbox"/> Kommunikation und Informationsaustausch <input type="checkbox"/> Arbeitsplatzverlust → Verschlebung der Kompetenzen, Automatisierung, Wegfall von Prozessschritten 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Schutz des geistigen Eigentums <input type="checkbox"/> Netzusbau <input type="checkbox"/> Netzabdeckung <input type="checkbox"/> Datengeheimhaltung <input type="checkbox"/> Standards auf nationaler Ebene und auf supranationaler Ebene <input type="checkbox"/> Datenplatzrichtlinien <input type="checkbox"/> Arbeitszeit <input type="checkbox"/> Arbeitsschutz 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Abhängigkeit (Softwareausfall, Systemausfall) <input type="checkbox"/> Überlastung der Infrastruktur <input type="checkbox"/> Organisatorische Einbindezeit <input type="checkbox"/> Vielfalt der Systeme <input type="checkbox"/> Cybersicherheit (Bewusstsein, Technische Lösungen, Organisatorische Maßnahmen) <input type="checkbox"/> Cloud-Computing (Datenlagerung, Programme betreiben) 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/>
[Beck13]	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Know-how der Mitarbeiter 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Kostentransparenz der digitalen Wertschöpfungskette <input type="checkbox"/> Realisierung von Fordernissen <input type="checkbox"/> Kalkulation von Lizenzgebühren und Erlösen <input type="checkbox"/> Buchung von immateriellen Vermögensgegenständen <input type="checkbox"/> Kalkulation von Steuern <input type="checkbox"/> Budget für Technologien 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Transparenz über Erfolg und Misserfolge <input type="checkbox"/> Akzeptanz der Mitarbeiter <input type="checkbox"/> Interne Entscheidungsfindung 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Vertrags- und Rechtmanagement 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Datensicherheit <input type="checkbox"/> Datenqualität <input type="checkbox"/> Skalierbarkeit <input type="checkbox"/> IT-Infrastruktur <input type="checkbox"/> Zu schnelle Veränderungen der bestehenden Softwarelösungen 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Auswahl einer geeigneten Technologie <input type="checkbox"/> Implementierungsprobleme
[Beck20]	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Qualifizierung der Mitarbeiter 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Investition und Finanzierung <input type="checkbox"/> Ermittlung des Wertbeitrags 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Change Management <input type="checkbox"/> Digitale Vision und Kultur 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Datenschutz 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Datensicherheit <input type="checkbox"/> Geschwindigkeit der Innovationsverbundung <input type="checkbox"/> Definition von Industriestandards 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Vollständige Digitalisierung der Wertschöpfungsprozesse <input type="checkbox"/> Digitalisierung des Produktions- und Serviceengpass <input type="checkbox"/> Umsetzung von I4.0-Projekten <input type="checkbox"/> Identifizierung von Industrie-4.0-Projekten <input type="checkbox"/> Einführung neuer Geschäftsmodelle

Quelle	Kompetenzen / Ressourcen	Ökonomisch / Finanzen	Kulturell / Organisatorisch	Rechtliche und politische Rahmenbedingungen	Technisch	Implementierungsprozess
[Libo20]	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Begrenzte Ressourcen (finanziell, technisch, Personal, das in mehreren Bereichen der Organisation tätig ist) <input type="checkbox"/> Branchenwissen mit Schwerpunkt in einem bestimmten Bereich 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Begrenzte Ressourcen (finanziell, technisch, Personal) <input type="checkbox"/> Starke Kunden/Lieferanten-Beziehungen <input type="checkbox"/> Geringe Investitionen in F&E und fehlende Allianzen mit Universitäten 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Organisatorische Struktur weniger komplex mit informeller Strategie- und Entscheidungsfindung <input type="checkbox"/> Kultur mit geringer Flexibilität für Veränderungen und Experimente <input type="checkbox"/> Geringe Berücksichtigung von Geschäftsprozessen und Standards <input type="checkbox"/> Starke Kunden/Lieferanten-Beziehungen 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Produktentwicklung mit hohem Anpassungsgrad <input type="checkbox"/> Geringer Einsatz neuer Technologien 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/>
[Inga20]	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Schlecht qualifizierte Mitarbeiter <input type="checkbox"/> Notwendigkeit ausländische Mitarbeiter zu beschäftigen <input type="checkbox"/> Mangel an Infrastruktur für Auswanderer <input type="checkbox"/> Sprachbarrieren für ausländische Mitarbeiter <input type="checkbox"/> Mangel an polnischen Arbeitsnehmern auf dem Arbeitsmarkt <input type="checkbox"/> Widerstand der Arbeitnehmer gegen den Erwerb neuer Kompetenzen <input type="checkbox"/> Mangel an Mitarbeiterschulung <input type="checkbox"/> Kontinuierliche Personalrotation <input type="checkbox"/> Mangel an Spezialisten auf diesem Gebiet <input type="checkbox"/> Engpässe bei der Beschäftigung 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Kein Kapital zum Kauf neuer Maschinen und Anlagen <input type="checkbox"/> Schwierigkeiten bei der Beschaffung eines Darlehens <input type="checkbox"/> Hohe Kosten für den Erwerb von Spezialisten 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Zu geringe Produktivität <input type="checkbox"/> Keine Management-Vorbereitung <input type="checkbox"/> Fehlendes Pull-System 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Zu alte und inkompatible Maschinen und Anlagen <input type="checkbox"/> Keine Software <input type="checkbox"/> Zu große Erwartungen an die Technologie 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Falsche Vorstellung über den Zeitpunkt der Implementierung der Technologie
[Meyl9]	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Es fehlen klare Haftungsregeln 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Es fehlen klare Haftungsregeln 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Es fehlen klare Haftungsregeln 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Eine Datensicherheit kann nicht garantiert werden. 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/>
[Ott17]	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Digitalisierungsgeriebene Beschaffung und Wartung der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) <input type="checkbox"/> Schulung der Mitarbeiter zum effektiven Einsatz der Technik 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Auslagerung unternehmenskritischer Daten und Prozesse 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Zunehmende Vernetzung der Systeme <input type="checkbox"/> Möglichkeit des Fremdzugriffs in Form der Datenveränderung oder -löschung 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/>

9.3 Referenzmodelle der Digitalisierung

Referenzmodelle für ein digitalisiertes Unternehmen sind z. B. das Capgemini Framework (Kapitel 2.2.1), das Referenzmodell nach APPELFELLER & FELDMANN (Kapitel 2.2.1) oder das Rahmenwerk für innovative Modelle der Digitalen Transformation. Das **Rahmenwerk für innovative Modelle der digitalen Transformation** nach ATANASIJEVIC basiert auf der erfolgreichen Einführung digitaler Bausteine, welche in die drei Säulen Kundenerfahrung, Betriebsprozess und Geschäftsmodell unterteilt sind (Abbildung 9-28). Das Identifizieren der zehn Bausteine, die die Qualität und Effektivität des Wandels maßgeblich beeinflussen, ist eine Voraussetzung für den Erfolg im Prozess der digitalen Transformation. In Verbindung mit weiteren Elementen entsteht ein Framework zur digitalen Transformation von Unternehmen. Dabei kann jedes Element kann einzeln als Ausgangspunkt für die Implementierung verwendet werden. Die Elemente sind miteinander verbunden, was bedeutet, dass die Umsetzung der digitalen Transformation ein iterativer Prozess ist, der spiralförmig die Phasen der kontinuierlichen Kommunikation mit allen Beteiligten, einschließlich der Kunden, durchläuft und auf der Grundlage der gemessenen Effekte die Planung und Umsetzung der Veränderungen und die Einführung neuer digitaler Initiativen erfolgt. Die Steuerung des Prozesses erfolgt in drei Schritten: (1) Erstellen einer Vision eines digitalen Unternehmens und Kommunikation dieser, (2) Investitionen in digitale Initiativen und Fähigkeiten, welche die Veränderung unterstützen und (3) Steuerung der Veränderungen in einem festgelegten Prozess mit Metriken und Zielen [Atan18].

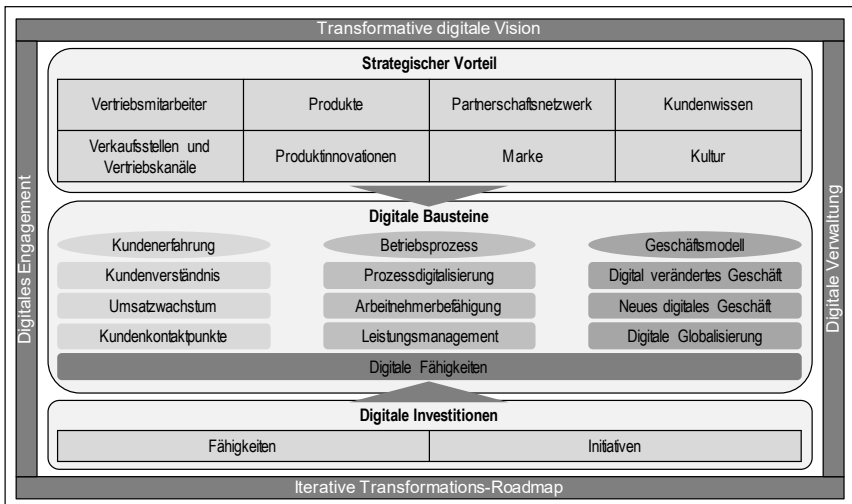


Abbildung 9-28: Rahmenwerk zur Umsetzung der Digitalen Transformation [Atan18]

Auf **IT-technischer Ebene** stellt das Referenzarchitekturmodell I4.0 (RAMI4.0) ein Referenzmodell dar. **RAMI 4.0** dient als anschauliche und einfache Referenz für den I4.0-Lösungsraum und wird durch geeignete vorhandene Normen und Standards ergänzt. Ziel ist es ein gemeinsames Verständnis für I4.0 und den zugehörigen Standards, Anwendungsfälle sowie Normen zu schaffen. Aufgaben und Abläufe können so in überschaubare Teile zerlegt werden und der Sachverhalt wird veranschaulicht, um so eine Standardisierung und Normung zielgerichtet anzuwenden [Adol15]. RAMI 4.0 spannt dabei die drei Achsen Lebenszyklus & Wertstrom (Life

Cycle & Value Steam), Hierarchieebenen (Hierarchy Levels) und die Aufteilung in physische und Informationswelt (Layers) auf (Abbildung 9-29) [Heid17]. Die Achse Hierarchy Levels basiert auf der internationalen Norm IEC 62264 [DIN13] zur Integration der Unternehmens-EDV und Leitsystemen. Die Hierarchiestufen stellen Funktionalitäten innerhalb der Fabrik dar, wie z. B. Field Device, und wird um die Stufen Product und Connected World ergänzt. Die Achse Life Cycle & Value Stream basiert auf der Norm IEC 62890 [DIN17] und stellt den Lebenszyklus von Produkten und Anlagen dar [Hank15]. In der Phase Type entsteht das Produkt oder auch die Maschine, welche nach Tests und er Validierung für die Produktion freigegeben wird. Das Produkt wird dann in der Phase Instanz gefertigt und werden anschließend vom Kunden genutzt [Adol15]. Die Achse Layers beschreibt das digitale Abbild von z. B. einer Maschine oder eines Produkts, Schicht für Schicht [Hank15]. Das Asset Layer beschreiben die reale Welt, wie z. B. Komponenten, Maschinen und Fabriken, welche im Integration Layer digital umgesetzt und somit virtuell repräsentiert werden. Somit stellt der Integration Layer den Übergang von der realen zur Informationswelt dar [Heid17]. In der Communication Layer werden Daten und Dateien übertragen, wobei die relevanten in der Information Layer abgespeichert werden. Der Functional Layer beinhaltet die notwendigen Funktionen, welche formal beschrieben werden und im Business Layer werden alle zugehörigen Geschäftsprozesse abgebildet [Adol15].

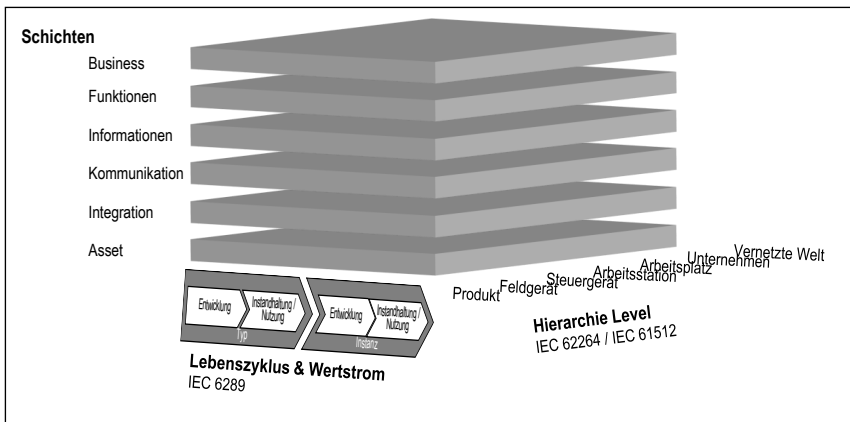


Abbildung 9-29: Das Referenzarchitekturmodell I4.0 [Heid17]

9.4 Reifegradmodelle im Kontext der Digitalisierung

9.4.1 Bestimmung des Digitalisierungsgrads von Unternehmen

Tabelle 9-6: Bestimmung des Digitalisierungsgrads von Unternehmen

Name des Reifegradmodells	Forschungsinhalt	Fokus	Reifegradstufen	Dimensionen	Literatur
I4.0-Readiness	Digitalisierungsgrad von Unternehmen im deutschen Maschinen- und Anlagenbau	Produzierende Unternehmen	0: Außenstehender 1: Anfänger 2: Fortgeschrittener 3: Erfahrener 4: Experte 5: Exzellenz	Strategie und Organisation; Smart Factory; Smart Operations; Smart Products; Data-driven Services; Mitarbeiter	[Lich15]
Digital Maturity Check	Reifegrad hinsichtlich der Digitalisierung in Unternehmen aus Deutschland und Österreich	Alle Branchen	Erfüllungsgrade: Bis 20 % 21 bis 40 % 41 bis 60 % 61 bis 80 % 81 bis 100 %	Customer Experience; Produktinnovation; Strategie; Organisation; Prozessdigitalisierung; Zusammenarbeit; Informationstechnologie; Kultur & Expertise; Transformationsmanagement	[Berg15]
Industry 4.0 Maturity Model	Bewertung des Industrie-4.0-Reifegrads von Industrieunternehmen im Bereich der diskreten Fertigung	Produzierende Unternehmen	Likert-Skala: 1 bis 5 1: trifft nicht zu 5: trifft vollständig zu	Produkte; Kunden; Operations; Technologie; Strategie; Rechtliche Rahmenbedingungen; Unternehmenskultur; Mitarbeiter	[Schu16]
Three Stage Maturity Model	Prozessmodell zur Entwicklung einer Vision und Einführung von I4.0 in KMU	Produzierende KMU	Initial Managed Defined Transform Detailed Business Model	Envision; enable; enact	[Ganz16]
Reifegradmodell I4.0	Reifegradmodell als strategiegeleitetes Vorgehensmodell zur Implementierung von I4.0	Produzierende Unternehmen	Skala von 0 bis 10 0: keine Aspekte von I4.0 sind umgesetzt 10: I4.0 ist vollständig umgesetzt	Daten; Intelligenz; Digitale Transformation	[Jod16]
Reifegradmodell für Cloud-Computing	Das Reifegradmodell ermöglicht die richtige Auswahl von Komponenten für ein Cloud-Geschäftsmodell	Alle Branchen	Stufen 1 bis 4, sowie „keinen Service“: 1: Initial 2: Repeatable 3: Defined 4: Managed 5: Optimized	On-demand Self Service; Broad network Access; Resource Pooling; Rapid Elasticity; Measured Service; Sicherheit; Standardisierung; SLA; Verfügbarkeit	[Pelz16]
4i-Audit	Orientierungshilfe für die Entwicklung von unternehmensindividuellen Industrie-4.0-Roadmaps und der Steuerung der zugehörigen Maßnahmen	Auftragsabwicklungsprozesses produzierender Unternehmen	0: Rahmenbedingungen I4.0 1i: Informationsgenerierung 2i: Informationsverarbeitung und -vernetzung 3i: Interaktion cyberphysischer Systeme 4i: intelligente, selbststeuernde Prozesse	N/a	[Reut16]
e-Business Reifegrad	Bewertung des Reifegrads hinsichtlich eBusiness	Alle Branchen	1: erkannt 2: punktuell 3: definiert 4: strukturiert 5: etabliert	Organisation; Kooperation; Datenmanagement; Unternehmen	[FIR16]
Readiness-Check „Digitalisierung“	Bestimmung des digitalen Reifegrads von Unternehmen und Ableitung von Handlungsempfehlungen	Produzierende KMU	Erkunder Einsteiger Fortgeschrittener Experte Vorreiter	Strategie; Technologie; Produkte & Dienstleistungen; Organisation & Prozesse; Mitarbeiter	[Boss17], [Hell18]

Name des Reifegradmodells	Forschungsinhalt	Fokus	Reifegradstufen	Dimensionen	Literatur
Maturity Index	Das Ziel ist es, den aktuellen Reifegrad von I4.0 in Unternehmen zu ermitteln und konkrete Maßnahmen zu identifizieren, um den wirtschaftlichen Nutzen von I4.0 und der Digitalisierung zu maximieren.	Produzierende Unternehmen	1: Computerisation 2: Connectivity 3: Visibility 4: Transparency 5: Predictive capacity 6: Adaptability	Resources; Information systems; Organisational structure; Culture	[Schul7a]
Digital Readiness Assessment Maturity model (DREAMY)	Messung der digitalen Bereitschaft von produzierenden Unternehmen	Produzierende Unternehmen	ML1: Initial ML2: Managed ML3: Defined ML4: Integrated and interoperable ML5: Digital-oriented	Process; Monitoring and Control; Technology; Organization	[Caro17a], [Caro17b]
Digitalization Maturity Model	Bewertung des digitalen Reifegrads von Unternehmen	Produzierende Unternehmen	Gewichtete Berechnung mit Werten zwischen 0 und 3	Strategy; Processes; Technologies; Products & services; People	[Cane18]
I4.0-Assessment	reifegradbasiertes Bewertungsinstrument zur Verbesserung der Implementierung von Industry 4.0 in KMU	Produzierende KMU	Stufen 1 bis 5 mit individueller Beschreibung	Operations; Organization; Socio-Culture; Technology	[Rauc20], [Matt18], [Matt19]
I4.0-Benchmark	Leistungssteigerung von KMU durch I4.0	KMU im Maschinenbau	Stufen 1 bis 4 mit individueller Beschreibung	Technik; Business; Mensch	[Knos18]
Quick Check	Ermittlung des Digitalisierungsgrads von KMU in NRW	KMU in NRW	Skala 1 bis 5 1: nicht vernetzt 5: vollständig vernetzt	Digitales Geschäftsmodell; Produktentstehung und -entwicklung; IT-Systeme; Qualitäts- und Prozessmanagement; Produktionsplanung; Produktionssteuerung und -regelung; Interne Logistik; Supply-Chain-Management; Mensch-Maschine-Integration.	[Krau18]
Digital Readiness Level 4.0 (DRL 4.0)	Bewertungsmodell für die digitale Bereitschaft von KMU	Produzierende KMU in Italien	DRL1: Unternehmen ist nicht an Industry 4.0-Pilotinitiativen beteiligt. DRL2: Unternehmen hat I4.0 in seine strategische Orientierung aufgenommen DRL3: Unternehmen hat eine I4.0-Strategie formuliert DRL4: Unternehmen implementiert die I4.0-Strategie DRL5: Unternehmen hat I4.0-Strategie implementiert und überwacht sie.	Strategy; People; Processes; Technology; Integration	[Piro19]
Bereitschaft für die Implementierung von I4.0	Bewertung des Grades der Bereitschaft eines produzierenden Unternehmens vor, die I4.0-Prinzipien und Praktiken zu übernehmen	Produzierende Unternehmen	0 < 10 %: Embryonic 10 < 25 %: Initial 25 < 50 %: Primary 50 < 75 %: Intermediate 75 < 90 %: Advanced 90 ≤ 100 %: Ready	Digitale Technologien	[Pacc19]
Industry 4.0 Maturity Model	Beurteilung der Reife von Industry 4.0 in KMU	Produzierende KMU	Likert Skala von 1 bis 5	Strategy; Technology; Production; Products; People	[Trot19]

Name des Reifegradmodells	Forschungsinhalt	Fokus	Reifegradstufen	Dimensionen	Literatur
InAsPro-Reifegradmodell	Bewertung des individuellen Digitalisierungsgrads	Produzierende Unternehmen	1: Erkunder 2: Anfänger 3: Fortgeschrittener 4: Experte	Mensch, Technik, Organisation, Strategie	[Sied20c]

9.4.2 Bestimmung des Digitalisierungsgrads von Produktionssystemen

Tabelle 9-7: Bestimmung des Digitalisierungsgrads von Produktionssystemen

Name des Reifegradmodells	Forschungsinhalt	Fokus	Reifegradstufen	Dimensionen	Literatur
I4.0-Readiness	I4.0 in der Wertschöpfung	Produktionssystem	N/a	N/a	[Bild14]
Reifegradbasierte Kopplung	Migrationsszenario von der zentralen PPS zur dezentralen, I4.0-fähigen Selbststeuerung	Produktionsplanung und -steuerung	N/a	Sensorik / Aktorik; PPS-Logik; Organisation	[Rehd14]
Werkzeugkasten I4.0	Identifikation von Potenzialen für Produkte und Produktion hinsichtlich I4.0 in KMU	Produktion und Produkte	Fünfstufige Bewertung mit individueller Beschreibung	Produkt; Produktion	[Ande15]
Categorical framework of manufacturing for Industry 4.0 and beyond	Hierarchisches Rahmenwerk zur Implementierung von I4.0	Produktionssystem	Control Integration Intelligence	Machine; Process; Factory	[Qin16]
Industrie-4.0-Audit	Digitalisierungsgrad von Produktionssystemen	Produktionssystem und angrenzende Bereiche	Ausprägungen: 0 bis 7 mit individuellen Beschreibungen	Technik, Organisation, Personal	[Morl16], [Lein18b], [Lein18a]
Industry 4.0-MM	Bewertung der Implementierung von Industry 4.0-Technologien	Produktionsumgebung	Level 0: Incomplete Level 1: Performed Level 2: Managed Level 3: Established Level 4: Predictable Level 5: Optimizing	Vermögensverwaltung; Datenverwaltung; Anwendungsverwaltung; Prozess-Transformation; organisatorische Ausrichtung	[Göka17]
Smart Manufacturing System Readiness Level (SMSRL)	Bewertung der Bereitschaft zur Implementierung digitaler Technologien in der Fabrik	Fabrik	0: not performed 1: Initial 3: Managed 5: Defined 7: Qualitative 9: Optimizing	Organisation; IT; Leistungsmanagement; Informationskonnektivität	[Jung17b], [Jung17a]
Quick-Check	Bewertung der Einführung von I4.0 in der Produktion und im produktionsnahen Bereich	Produktionssystem und produktionsnahe Bereiche	Stufen 1 bis vier mit individueller Beschreibung	Organisation und Administration; Produktionsplanung und -steuerung; Qualitäts- und Störungsmanagement; Station; Produkt	[Lanz18], [Hüb18], [Hüb17]
M2DD4.0M	Reifegradmodell für IT-Architekturen für eine datengetriebene Produktion	Produktion	0: Nonexistent IT Integration 1: Data and system integration 2: Integration of cross-life-cycle data 3: Service orientation 4: Digital twin 5: Self-optimizing factory	Datenspeicherung und -berechnung; Service-orientierte Architektur; Integration von Informationen; Digitaler Zwilling; Fortgeschrittene Analytik; Echtzeitfähigkeiten	[Webe17]

Name des Reifegradmodells	Forschungsinhalt	Fokus	Reifegradstufen	Dimensionen	Literatur
Produktionsassessment 4.0	Reifegradmodell erfasst bereits implementierte Lean Management-Prinzipien und zeigt realisierbare, individuelle Migrationspfade in Richtung I4.0 aus	Produktion im verarbeitenden Gewerbe	Fertigkeitsgrad (FG) 1: fehlende oder rudimentäre Erfüllung der Charakteristika FG2: Geringe Erfüllung der Charakteristika FG3: gute Erfüllung der Charakteristika FG4: Vollständige Erfüllung der Charakteristika auf Best Practice Niveau	Lean Management; I4.0 Grundlagen; I4.0 Excellence	[Poko17]
Basis- und Fachcheck des Industrie-4.0-Reifegrades	Beurteilung des aktuellen Stands hinsichtlich der Digitalisierung	Produktion	Stufe 0: Beobachter (manuell) Stufe 1: Einsteiger (Computerisierung) Stufe 2: Erfahrener (Automatisierung) Stufe 3: Fortgeschrittener (Vorhersagbarkeit) Stufe 4: Experte (Autonomisierung)	Organisation; Arbeit; Prozesse; Produkt; Recht/Sicherheit; Usability	[Müll18]
SM adoption framework	Rahmenwerk zur Einführung von „Smart Manufacturing“ in KMU	Produktion	Level 0 bis 4	Finanzen; Mensch, Strategie; Process, Produkt	[Mitt20]

9.4.3 Sonstige Reifegradmodelle hinsichtlich der Digitalisierung

Tabelle 9-8: Sonstige Reifegradmodelle hinsichtlich der Digitalisierung

Name des Reifegradmodells	Forschungsinhalt	Fokus	Reifegradstufen	Dimensionen	Literatur
Wettbewerbsfaktor Analytics	Erfassung des Reifegrads von Unternehmen bei der Nutzung von Business Analytics sowie die Identifikation von Wirtschaftlichkeitspotenzialen	Gesamtes Unternehmen	1: defizitärer 2: Adhoc 3: Etabliert 4: Nachhaltig	Bereitschaft zu Business Analytics; Datenqualität; Wirtschaftlichkeitspotenziale von Business Analytics;	[Gron13, Univ13]
Digitization index	Digitalisierungsindex für Länder	Länderebene	N/a	Erschwinglichkeit, Zuverlässigkeit der Infrastruktur, Netzzugang, Kapazität, Nutzung, Humankapital	[Kat13]
The Connected Enterprise Maturity Model	Bewertung des IT-Netzwerks einer Organisation	IT-Netzwerk	N/a	Informationsinfrastruktur; Steuerungen und Geräte, die Daten einspeisen und empfangen; Netzwerke, die all diese Informationen bewegen; Sicherheitsrichtlinien	[Rock14]
The industrial internet maturity model	Ermöglichung einer koordinierten, systematischen und schrittweisen Einführung des industriellen Internets	Industrial Internet	N/a	N/a	[Meno16]

Name des Reifegradmodells	Forschungsinhalt	Fokus	Reifegradstufen	Dimensionen	Literatur
SIMMI 4.0	Klassifikation und Analyse der Anwendungssystemlandschaft hinsichtlich der Anforderungen von I4.0	Anwendungssystemlandschaft	1: Bereichsübergreifende Digitalisierung 2: Bereichsübergreifende Digitalisierung 3: Horizontale und vertikale Digitalisierung 4: vollständige Digitalisierung 5: optimierte vollständige Digitalisierung	Vertikale Integration; horizontale Integration; digitale Produktentstehung; Querschnittstechnologie	[Leyh16a, Leyh16b]
4.0 READY	reifegradorientierten Ansatz zur systematischen und ganzheitlichen Planung und Steuerung der Einführung dieser interaktiven Assistenzsysteme	Interaktive Assistenzsysteme (IAS) in KMU	RG0: keine Einführung des IAS möglich RG1: Einführung des IAS mit hohem Aufwand möglich RG2: Einführung des IAS mit Aufwand möglich RG3: Einführung des IAS mit geringem Aufwand möglich RG4: Einführung des IAS sofort möglich	Mensch; Technik; Organisation	[Will16], [Will17]
Einkauf 4.0 Reifegradmodell	Vollständige Umsetzung des Einkaufs 4.0	Einkauf / Beschaffung	1: Traditionell 2: Beginner 3: Etabliert 4: Experte 5: Exzellenz	Strategien; Warengruppen; Organisation; Einkäufer / Personal; Autonome Prozesse; Vernetzung; Lieferantenbeziehung	[Klee17]
PLM maturity model	Vereinfachung und Optimierung PLM-Implementierung durch ein PLM-Reifegradmodell in KMU	PLM in KMU	1: Unstructured 2: Repeatable but intuitive 3: Defined 4: Managed and measured 5: Optimal	Strategie und Politik; Management und Kontrolle; Organisation & Prozesse; Menschen & Kultur; Informationstechnologie	[Paav17]
SCM 4.0	Bestimmung der Reife von SCM-Systemen und Intralogistik	Supply Chain Management und Intralogistik	1: Außenstehender 2: Anfänger 3: Fortgeschrittener 4: Erfahrener 5: Experte 6: Exzellenz	Connected Supply Chain; Data-driven Logistics; Smarte SCM Strategie und Organisation; Smart Logistics Objects; Smart Warehousing & Transportation	[Sies17]
Maturity Model for Business Model Management in I4.0	Reifegradmodell für das Management von Geschäftsmodellen, das eine den Anforderungen und der strategischen Ausrichtung einer Organisation entsprechende Unterstützung bietet.	Management von Geschäftsmodellen	1: Implicit 2: Defined 3: Validated / Standardized 4: Analyzed 5: Optimized	Kundensegment; Wert-Angebote, Kanäle, Kundenbeziehung, Einkommensquelle, Schlüsselressourcen, Schlüsselaktivitäten, Schlüsselpartner, Kostenstruktur	[Rübe18]
Logistics 4.0 Maturity Model	Bewertung des Stands von Logistik 4.0 und Entwicklung einer Roadmap für Verbesserungspotenziale	Logistik	1: Ignoring 2: Defining 3: Adopting 4: Managing 5: Integrated	Management; Materialfluss; Informationsfluss	[Oleś19]

Name des Reifegradmodells	Forschungsinhalt	Fokus	Reifegradstufen	Dimensionen	Literatur
3M4.0	Reifegradmodell, um die betriebliche Effizienz zu steigern, die Integration physischer und virtueller Strukturen zu verbessern und mehrere Interessensgruppen durch eine ganzheitliche Sicht der Lieferkette mit sozialen, ökologischen und wirtschaftlichen Auswirkungen zu führen.	Schwellenländer	1: conceptual 2: managed 3: advances 4: self-optimized	Supply Chain Management; Technologie; Vertriebs- und Betriebsmanagement; Wissen, Fähigkeiten und Haltung	[Caia20]

9.4.4 Sonstige Reifegradmodelle für produzierende Unternehmen

Tabelle 9-9: Sonstige Reifegradmodelle für Unternehmen

Name des Reifegradmodells	Forschungsinhalt	Fokus	Reifegradstufen	Dimensionen	Literatur
Systems Readiness Level	Bewertung der Integration, Interoperabilität und Aufrechterhaltung von Systemen in einer Betriebsumgebung	Produzierende Unternehmen	1: Concept Refinement 2: Technology development 3: System development & demonstration 4: Production & development 5: Operations & Support	Technology Readiness Level (TRL); Integration Readiness Level (IRL)	[Saus06]
SPICE	Prozess-Referenz-Modell zur Bewertung der Prozesse im Unternehmen	Prozesse	Level 0: Unvollständig Level 1: Durchgeführt Level 2: Manged Level 3: Etabliert Level 4: Vorhersagbar Level 5: Optimierend	Prozessdimension; Fähigkeitsdimension	[Wagn08]
CoPS-RM-CMM	Mehrstufiges Rahmenwerk für das Risk Management von komplexen Produktsystemen	Komplexe Projekte	Level 1: Ad Hoc Level 2: Initial Level 3: Defined Level 4: Managed Level 5: Optimizing	Kultur; Stakeholder-Koalition; Führung; Organisationsstruktur; Risiko-Management-Prozess; Projektmanagementprozess; Technologie / Systementwurf	[Yeo09]
SCPM3	Bewertung von Lieferkettenprozessen und Identifikation von Best Practices	Supply Chain Process Management	Level 1: Foundation Level 2: Structure Level 3: Vision Level 4: Integration Level 5: Dynamics	Nachfragesteuerung und -prognose; Strategisches Planungsteam; Strategische Verhaltensweisen; Beschaffungsteam; Verwaltung des Versorgungsnetzes; Produktionsplanung und -steuerung; Verwaltung des Vertriebsnetzes; Auftragsverwaltung; Prozess-Governance; Fundamentbau; Reaktionsfähigkeit; kollaborativ integrierte Praktiken; Kundenintegration	[Oliv11]

Name des Reifegradmodells	Forschungsinhalt	Fokus	Reifegradstufen	Dimensionen	Literatur
Automotive Technology and Manufacturing Readiness Levels	Bewertung der Technologie- und Herstellreife	Automobilindustrie	TRL 1 bis TRL 10; MRL 1 bis MRL 10	n/a	[Will11]
Kombiniertes Referenzmodell für Umformverfahren	Bewertung neuer Umformverfahren mithilfe eines Reifegradmodells, welches Informationsunsicherheiten berücksichtigt	Umformverfahren	%-Angaben	Ziele und Anforderungen; Systementwurf und -analyse; Konzeption und Konstruktion; Modellbildung; Versuche; Ursache-Wirkung-Beziehungen und Wechselwirkungen; Evaluierung und Validierung; Optimierung; Messsystem	[Akka13], [Akka12], [Weck12], [Weck13]
Complexity Management Systems	Bewertung des Reifegrads des fortgeschrittenen Komplexitätsmanagements	Komplexitätsmanagement	0: Initial 1: Definiert 2: Qualitativ 3: Quantitativ 4: Analysiert 5: Verwaltet; 6: Harmonisiert	Waren und Dienstleistungen (Waren- und Dienstleistungsportfolio, Kundenportfolio, Märkte und Materialien); Prozess (Technologien, Auftragsabwicklung und IT-Systeme); Organisation (Netzwerk, Produktion und Personal)	[Klut14]
Maturity model for service systems	Ganzheitliche Bewertung der Informationssystemunterstützung von Dienstleistungssystemen in der Schwermaschinenindustrie	Dienstleistungssysteme im Schwermaschinenbau	Level 1: Rudimentärer Ersatzteildienst Level 2: Reaktiver Wartungsdienst Level 3: Vorausschauender Wartungsdienst Level 4: Dienstleistung für Leistungsverträge Level 5: Verwaltung des Kundenbetriebs	IT-Artefakt; Organisation; Umwelt; Strategie	[Neff14]
Lean Logistics Maturity Model (LLMM)	Evaluierung einer schlanken Logistikstruktur	Logistik	Ausprägungsstufe 1 (FG1): rudimentäre oder fehlende Merkmalsausprägung FG2: geringe Merkmalsausprägung FG3: gute Merkmalsausprägung FG4: Best Practice-/Common Practice-Merkmalsausprägung	Allgemeine Determinanten; Intralogistische Determinanten; Festlegung der relevanten Erfolgsfaktoren; Prozesse	[Spec14]
Sustainable Manufacturing Maturity Model (SM3)	Identifikation des aktuellen Stands einer nachhaltigen Produktion mit Fokus auf Material-, Energie- und Wasserverbrauch	Nachhaltige Produktion in KMU	Ebene 0: Anfänglich Ebene 1: konform Ebene 2: Baseline Ebene 3: Verbessert Ebene 4: Klassenbesten	Energieintensität; Materialintensität; Wasserintensität	[Rach14]
Crowd Logistics Maturity Model	Bewertung von Crowd Logistics Geschäftsmodellen	Logistik	0-15 % nicht erreicht 16-50 % teilweise erreicht 51-85 % größtenteils erreicht >85 % vollständig erreicht	Umwelt; Ökonomie; Kommunikation; Sicherheit	[Mehm15]

Name des Reifegradmodells	Forschungsinhalt	Fokus	Reifegradstufen	Dimensionen	Literatur
Organizing for digital	Bewertung der Organisation hinsichtlich der Digitalisierung	Unternehmensorganisation	10-22,5: abwügend 22,5-35: initiiert 35-47,5: engagiert 47,5-60: selbstverstärkend	Digital first Denkweise; Praktiken: digitalisierte Operationen; Praktiken: datengesteuerte Entscheidungen; Praktiken: kollaboratives Lernen; Talent: Technologie-Erfahrung; Talent: digitale Fähigkeiten; Talent: hohes Engagement; Datenzugriffs- und Kollaborationswerkzeuge: Echtzeit-Customer-Daten; Werkzeuge für Datenzugriff und Zusammenarbeit: integrierte Betriebsdaten	[Bonn15]
Reifegradmodell Geschäftsprozesse	Bewertung von spezifischen Geschäftsprozessen in Unternehmen	Geschäftsprozessmanagement	N/a	Primärer Prozess / Kundenbeziehung; sekundärer Prozess / interne Integration; Managementprozess / Basis & Durchsetzung	[Simu15]
MESA MOM-CMM	Bewertung, wie gut die Verhaltensweisen, Praktiken und Prozesse einer Produktionsorganisation die benötigten Produkte zuverlässig und nachhaltig, termingerecht, mit höchster Qualität und unter Verwendung gut gewarteter Ausrüstung herstellt.	produzierende Unternehmen	Level 0 bis 5	Zeitplanung; Dispatching; Ausführungsmanagement; Ressourcenmanagement; Definitionsmanagement; Datenerfassung; Verfolgung; Leistungsanalyse	[Bran16], [Li17]
Productivity Management Model	Integrierte Umsetzung von Prozessen im Rahmen des Produktionsmanagements zur Steigerung der Produktivität	Produktionsmanagement	Level 1 bis 5 Level 1: effektiv ausgeführte Produktionsprozesse Level 5: optimierte Produktionsprozesse	5S; Lean Management; Total Productive Maintenance; Total Quality Management; Six Sigma; Kaizen; Theory of constraints; Business Process Reengineering	[Kosi17]
Lean Production	Verknüpfung von Lean-Production-Methoden mit den Anforderungen an die Unternehmenskultur	Schlankes Produktionssystem	0: konventionelle / unwissend 1: erkennend 2: wissend 3: durchgehend anwendend 4: etabliert / gesichert 5/ kontinuierliche Verbesserung	Kundennutzen; Wertstrom; Fluss; Pull; Perfektion.	[Schw17b]

9.4.5 Bewertung der Reifegradmodelle

Tabelle 9-10: Qualitative Bewertung der Reifegradmodelle (Gesamt)

Nr. Ansätze	Anforderungen					
	A1	A2	A3	A4	A5	
Digitalisierungsgrad von Unternehmen	1 I4.0-Readiness [Lich15]	○	○	●	○	○
	2 Digital Maturity Check [Berg15]	○	○	○	○	●
	3 Industry 4.0 Maturity Model [Schu16]	○	○	●	○	●
	4 Three Stage Maturity Model [Ganz16]	○	●	○	○	○
	5 Reifegradmodell I4.0 [Jod116]	○	○	○	○	○
	6 Reifegradmodell für Cloud-Computing [Pelz16]	○	○	●	○	○
	7 4i-Audit [Reut16]	○	○	○	●	●
	8 e-Business Reifegrad [FIR16]	○	○	●	○	●
	9 Readiness-Check „Digitalisierung“ [Boss17], [Hell18]	○	○	●	○	●
	10 Maturity Index [Schu17a]	○	○	○	●	●
	11 Digital REadiness Assessment MaturitY model (DREAMY) [Caro17a], [Caro17b]	○	○	○	○	●
	12 Digitalization Maturity Model [Cane18]	○	○	○	○	○
	13 I4.0-Assessment [Matt18], [Matt19], [Rauc20]	○	○	○	○	○
	14 I4.0-Benchmark [Knos18]	○	○	○	○	○
	15 Quick Check [Krau18]	○	○	○	○	○
	16 Digital Readiness Level 4.0 (DRL 4.0) [Piro19]	○	○	○	○	○
	17 Bereitschaft für die Implementierung von I4.0 [Pacc19]	○	○	○	○	○
	18 Industry 4.0 Maturity Model [Trot19]	○	○	○	○	○
	19 InAsPro-Reifegradmodell [Sied20c], [Zeih20]	○	○	○	○	○
Digitalisierungsgrad des Produktionssystems	1 I4.0-Readiness [Bild14]	●	○	○	○	○
	2 Reifegradbasierte Kopplung [Rehd14]	●	○	○	○	○
	3 Werkzeugkasten I4.0 [Ande15]	●	○	○	○	○
	4 Categorical framework of manufacturing for Industry 4.0 and beyond [Qin16]	●	○	○	○	○
	5 Industrie-4.0-Audit [Mor16], [Lein18a], [Lein18b]	●	○	○	○	○
	6 Industry 4.0-MM [Göka17]	●	○	○	○	○
	7 Smart Manufacturing System Readiness Level (SMSRL) [Jung17a], [Jung17b]	●	○	○	○	○
	8 Quick-Check [Hüb17], [Hüb18], [Lanz18]	●	○	○	○	○
	9 M2DDM [Webe17]	●	○	○	○	○
	10 Produktionsassessment 4.0 [Poko17]	●	○	○	○	○
	11 Basis- und Fachcheck des Industrie-4.0-Reifegrades [Müll18]	●	○	○	○	○
	12 SM adoption framework [Mitt20]	●	○	○	○	○
Sonstige Reifegradmodelle hinsichtlich der Digitalisierung	1 Wettbewerbsfaktor Analytics [Gron13], [Univ13]	○	○	○	○	○
	2 Digitization index [Katz13]	○	○	○	○	○
	3 The Connected Enterprise Maturity Model [Rock14]	○	○	○	○	○
	4 The industrial internet maturity model [Meno16]	○	○	○	○	○
	5 SIMMI 4.0 [Leyh16a], [Leyh16b]	○	○	○	○	○
	6 4.0 READY [Will16], [Will17]	○	○	○	○	○
	7 Einkauf 4.0 Reifegradmodell [Klee17]	○	○	○	○	○
	8 PLM maturity model [Paav17]	○	○	○	○	○
	9 SCM 4.0 [Sies17]	○	○	○	○	○
	10 Maturity Model for Business Model Management in I4.0 [Rübe18]	○	○	○	○	○
	11 Logistics 4.0 Maturity Model [Oleś19]	○	○	○	○	○
	12 3M4.0 [Caia20]	○	○	○	○	○

	Nr. Ansätze	Anforderungen					
		A1	A2	A3	A4	A5	
Sonstige Ansätze	1	Systems Readiness Level [Saus06]	●	○	◐	○	◐
	2	SPiCE [Wagn08]	○	○	●	○	○
	3	CoPS-RM-CMM [Yeo09]	○	○	◐	●	◐
	4	SCPM3 [Oliv11]	◐	○	◐	◐	◐
	5	Automotive Technology and Manufacturing Readiness Levels [Will11]	◐	○	◐	◐	◐
	6	Organisatorisches Regelwerk in der Produktion [Zol�11]	◐	○			
	7	Kombiniertes Referenzmodell f�r Umformverfahren [Akka13], [Akka12], [Weck12], [Weck13]	◐	○	◐	◐	○
	8	Complexity Management Systems [Klut14]	○	○	◐	◐	○
	9	Maturity model for service systems [Neff14]	○	○	◐	◐	◐
	10	Lean Logistics Maturity Model (LLMM) [Spec14]	◐	○	◐	◐	◐
	11	Sustainable Manufacturing Maturity Model (SM3) [Rach14]	◐	●	○	◐	○
	12	Crowd Logistics Maturity Model [Mehm15]	○	○	◐	●	●
	13	Organizing for digital [Bonn15]	◐	○	●	●	●
	14	Reifegradmodell Geschäftsprozesse [Simo15]	○	○	◐	●	○
	15	MESA MOM-CMM [Bran16], [Li17]	◐	○	◐	●	●
	16	Productivity Management Model [Kosi17]	◐	○	●	◐	○
	17	Lean Production [Schw17b]	◐	○	◐	◐	○

● Anforderung vollständig erfüllt ◐ Anforderung teilweise erfüllt ○ Anforderung nicht erfüllt

9.5 Entwicklung von Reifegradmodellen

9.5.1 Übersicht bestehender Ansätze zur Reifegradmodellentwicklung

Zur Entwicklung von Reifegradmodelle existieren verschiedene Ansätze [Mett11], welche grundsätzlich ähnlich aufgebaut sind [Lahr10], [Lahr11]. Sie basieren auf dem top-down Ansatz und unterteilen sich in verschiedene Phasen, welche teilweise iterativ ausgeführt werden können [Mett11]. Die Entwicklungsvorgehen werden von DE BRUIN et al. [Brui05], BECKER et al. [Beck09b], [Beck09a], METTLER [Mett10b], [Mett11], [Mett10a], K BEL [K be13], AKKASOGLU [Akka13], PELZL et al. [Pelz16], KHAN [Khan16], RAUCH et al. [Rauc20], SIEDLER et al. [Sied20c] und SINNWELL [Sinn20b] genauer erläutert und werden in Abbildung 9-30 aufgezeigt.

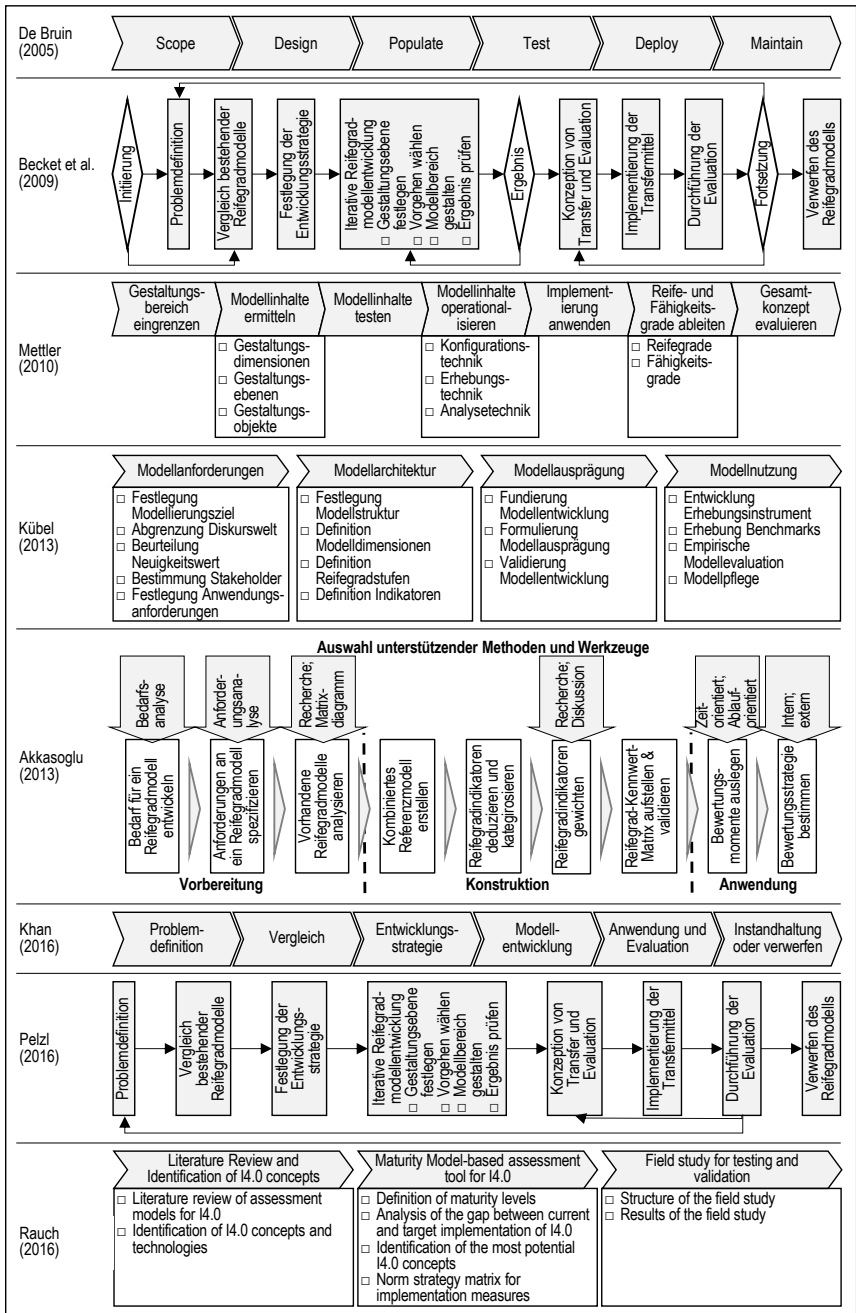


Abbildung 9-30: Vorgehen zur Reifegradmodellentwicklung nach [Khan16], [Sinn20b]

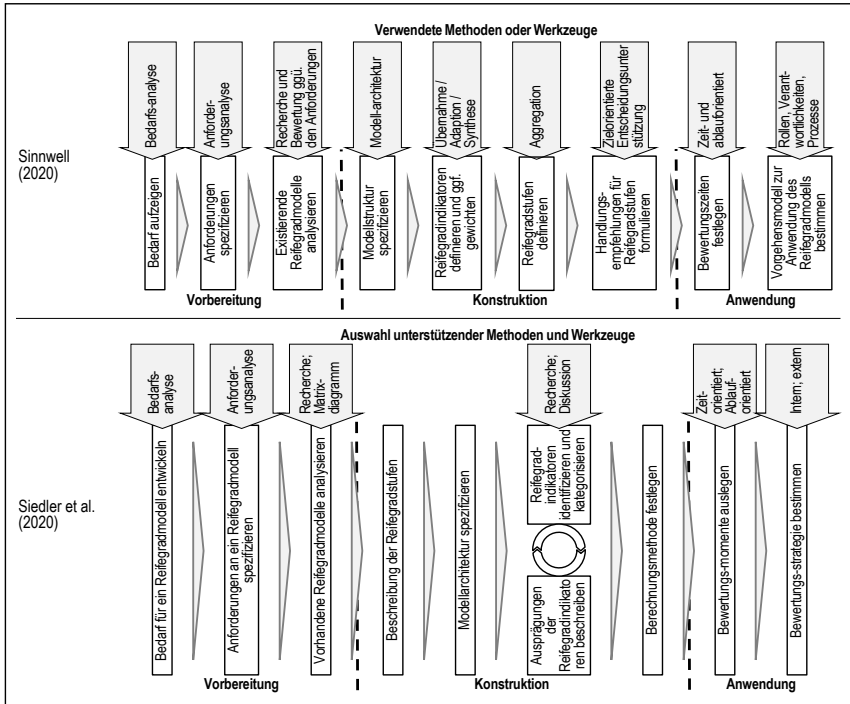


Abbildung 9-30: Vorgehen zur Reifegradmodellentwicklung nach [Khan16], [Sinn20b] (Fortsetzung)

9.5.2 Vorgehen zur Reifegradmodellentwicklung in dieser Dissertation

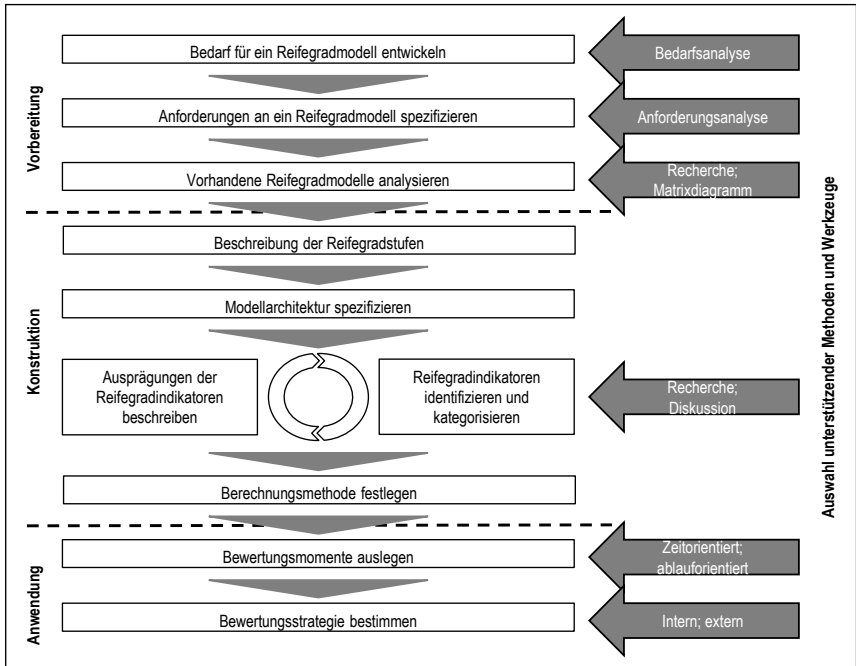


Abbildung 9-31: Vorgehen zur Reifegradmodellentwicklung [Sied20c]

9.6 Technologietrends der Digitalisierung

Tabelle 9-11: Trends und digitale Technologien der Digitalisierung und I4.0

Schibler et al. 2017 [Sch17]	IT-Sicherheit	Murck et al. 2017 [Mur17]	Müller-Jones et al. 2017 [Mül17]	Gautschieer et al. 2017 [Gaus17]	Klinkenberg et al. 2018 [Kli18]	Saucedo-Martínez et al. 2018 [Sauc18]	Alcázar & Cruz-Machado 2019 [Alcá19]
	Machine-to-Machine-Kommunikation	Virtual Reality & Augmented Reality	Cloud Computing	Cloud Computing	Informations- und Kommunikationstechnologien	Additive Manufacturing	The Industrial Internet of Things
	Predictive / Preventive Maintenance	Predictive / Preventive Maintenance	Big Data Analytics	Track and Trace	Business Intelligence	horizontal and vertical system integration	Cloud Computing
	Mustererkennung unstrukturierter Daten	Mustererkennung unstrukturierter Daten	Internet of Things	Analytics	Data Mining	Cyber security	Big Data
	Industrial-Cyber-Security-Konzept	Industrial-Cyber-Security-Konzept	Virtual Reality / Augmented Reality	Assistenzsysteme	Maschinelles Lernen	Augmented Reality	Simulation
	Cloud-Lösungen für Lieferanten / Kunden	Cloud-Lösungen für Lieferanten / Kunden	3D-Druck	Sensornetze	Predictive Analytics	The cloud	Augmented Reality
	"Offene" Cloud-Lösungen	"Offene" Cloud-Lösungen	Künstliche Intelligenz	Additive Fertigung	Prescriptive Analytics	Autonomous robots	Additive Manufacturing
	Interpretation / Entscheidungsunterstützung (SPS)	Interpretation / Entscheidungsunterstützung (SPS)	Robotik	Virtualisierung / Simulation		The industrial internet of things	Horizontal and Vertical Systems Integration
	Unternehmensinterne Rechenzentren (M2M)	Unternehmensinterne Rechenzentren (M2M)	Blockchain	Maschinelle Intelligenz	Big data & analytics	Big data & analytics	Autonomous Robots
	Kommunikations-Schnittstellensysteme	Kommunikations-Schnittstellensysteme	Vernetzung / Sicherheit	Vernetzung / Sicherheit	Simulation	Simulation	Cybersecurity

9.7 Ansätze zur Bestimmung von Wechselwirkungen

Ein Ansatz zur Bestimmung von Zusammenhängen und Wechselwirkungen ist die **Relationenprüfmatrix** oder auch **Zielrelationenmatrix**. Diese vergleicht Anforderungen paarweise und charakterisiert diese als unabhängig (indifferent) (i), unterstützend (u), gegenläufig (g) oder widersprüchlich (w) [Baue03]. Für unabhängige und unterstützende Zusammenhänge zwischen den Kriterien werden keine weiteren Maßnahmen gefordert, während dies für gegenläufige und widersprüchliche Relationen notwendig ist [Brei97], [Daen92].

Das Ziel der **Einflussmatrix** [Vest15] ist die Erfassung von komplexen Zusammenhängen zwischen verschiedenen Einflussfaktoren sowie die Ermittlung relevanter Einflussgrößen. Hierbei können zur Darstellung der Komplexität die Einflussfaktoren und ihre positiven und negativen Einflüsse zunächst grafisch dargestellt und mittels der Angaben der Einflussstärke (hoch, mittel, gering) sowie der zeitlichen Verzögerung (kurz-, mittel-, langfristig) ausdetailliert werden. Mithilfe einer Matrix lassen sich die Größen der Problemsituation gegenseitig in Beziehung setzen und anhand einer Skala von Null (keine Beeinflussung) bis drei (starke Beeinflussung) bewerten [Auma16]. Durch diese Quantifizierung lässt sich die Einflussmatrix rechnerisch bewertbar machen [Wörd12]. Die Aktivsumme oder auch kumulierte Einflussstärke setzt sich aus der Summe der jeweiligen Zeile zusammen. Je höher die Aktivsumme eines Einflussfaktors ist, desto höher ist dessen Einflussstärke auf alle anderen Faktoren. Die Passivsumme bzw. kumulierte Beeinflussbarkeit wird aus der Summe der jeweiligen Spalte gebildet. Dieser Wert beschreibt, wie stark ein einzelner Einflussfaktor vom Gesamtsystem beeinflusst wird [Auma16]. Anhand eines Systemgrids [Gaus96] kann visualisiert werden, welche Größen eher eine aktive, reaktive, kritische oder auch eine träge Rolle spielen. Hierbei haben aktive Einflussfaktoren den größten Einfluss auf andere Größen, während passive Einflussfaktoren kaum oder keinen Einfluss besitzen, sich aber stark von anderen beeinflussen lassen. Die kritischen Einflussfaktoren sind am stärksten vernetzt und wirken sowohl aktiv als auch passiv auf andere Faktoren ein. Sie beeinflussen das Systemverhalten maßgeblich. Träge Einflussgrößen dahingegen sind kaum mit anderen Faktoren vernetzt und wirken sich somit wenig auf das Systemverhalten aus [Prob91].

Die Methode der **Design-Structure-Matrix (DSM)** [Stew81] ermöglicht die Identifikation von Unsicherheiten in einem komplexen System [Eppi12] durch das Strukturieren der Problemstellung [Dani05]. Hierbei können Elemente einer Art in Bezug gesetzt werden, wenn sie über eine vergleichbare Beziehungsart untereinander verbunden sind. Dies können Produkte oder auch Prozesse sein [Stew81]. In einem ersten Schritt werden Zusammenhänge und Reihenfolgen der Elemente des Problems grafisch dargestellt [Dani05], sodass diese anschließend in einer $n \times n$ -Matrix zu sich selbst abgebildet werden können [Bart07]. Die Erweiterung der DSM um einen weiteren Betrachtungsbereich wird mittels der **Domain-Mapping-Matrix (DMM)** mithilfe einer $m \times n$ -Matrix analysiert [Dani04]. Der Vergleich von Mustern bereichsübergreifend erlaubt eine Beurteilung der Effektivität der Prozesse und Organisation um beispielsweise ein bestimmtes Produkt zu entwickeln [Eppi02]. Anwendung findet die DMM hauptsächlich in der Produktentwicklung [Dani07] indem bspw. Produktanforderungen den Funktionsanforderungen oder auch den Produktspezifikationen gegenübergestellt und analysiert werden [Dani04]. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit stellt die Identifikation eines angemessenen Detailgrads eines Simulationsmodells zur Virtuellen Kommissionierung dar. Hierbei werden Module den Kommissionierungsprozessen gegenübergestellt und ihre Abhängigkeiten bewertet. [Schm15]. Bei

der Betrachtung von mindestens drei Betrachtungsbereichen kann die **Multiple-Design-Structure-Matrix (MDSM)** herangezogen werden, welche eine Bewertung von bereichsübergreifenden Zusammenhängen ermöglicht [Eich06].

Weitere Möglichkeiten zur Bestimmung und Darstellung von Wechselwirkungen bietet die **Theorie des erfinderischen Problemlösens (TRIZ)**. Zur Identifikation und Darstellung von Zusammenhängen und Wechselwirkungen kann die Widerspruchsanalyse [Savr00] angewandt werden. Ein Widerspruch liegt immer dann vor, wenn eine Eigenschaft bzw. ein Parameter eines Systems verbessert werden soll, wodurch sich jedoch eine andere Eigenschaft, eines anderen Parameters, verschlechtert. Mittels der Widerspruchsanalyse sollen diese Widersprüche identifiziert und beseitigt werden [Ma09], wodurch unterschiedliche Regeln zur Problemlösung für komplexe, lose Systeme und hochintegrierte komplexe Systeme herangezogen werden können [Boga04]. Anwendung findet diese Analyse bspw. in der Verfahrenstechnik zur Lösung von Problemstellungen [Pokh15].

Die **Objektmodellierung** stellt ein neues TRIZ Werkzeug dar. Hierbei wird ein technisches System grafisch nachgebildet und die zugehörigen positiven und negativen Interaktionen zwischen den Elementen gekennzeichnet als Ergebnis erhält man ein Netz aus verknüpften Objekten [Kahl01] und somit eine grafische Darstellung der Objekte eines technischen Systems sowie der vorhandenen Verknüpfungen/Interaktionen untereinander [Nähl18].

Eine weitere Darstellungsform von Wechselwirkungen ist das sog. **Wechselwirkungsdiagramm**. Dieses basiert auf der Kontrastmethode aus dem Gebiet der Effektberechnung. Der berechnete Wechselwirkungseffekt gibt an, wie stark die für eine Randbedingung aufgeteilte Effektlinie im Wechselwirkungsschaubild vom Haupteffekt abweicht. Hierbei kann der Effekt eines Faktors A für zwei unterschiedliche Randbedingungen (B+ und B-) dargestellt werden. Die punktierte Hilfslinie beschreibt den Haupteffekt von A. Eine Steigungsänderung der Geraden ist gleichbedeutend mit einer Wechselwirkung. Wenn die eingezeichneten Linien parallel sind, so existieren keine Wechselwirkungen. Bei sehr starken Wechselwirkungen könne sich die Linien auch kreuzen. [Sieb10]

9.8 Kennzahlen zur Zieldefinition von Projekten

9.8.1 Vensim™-Modell

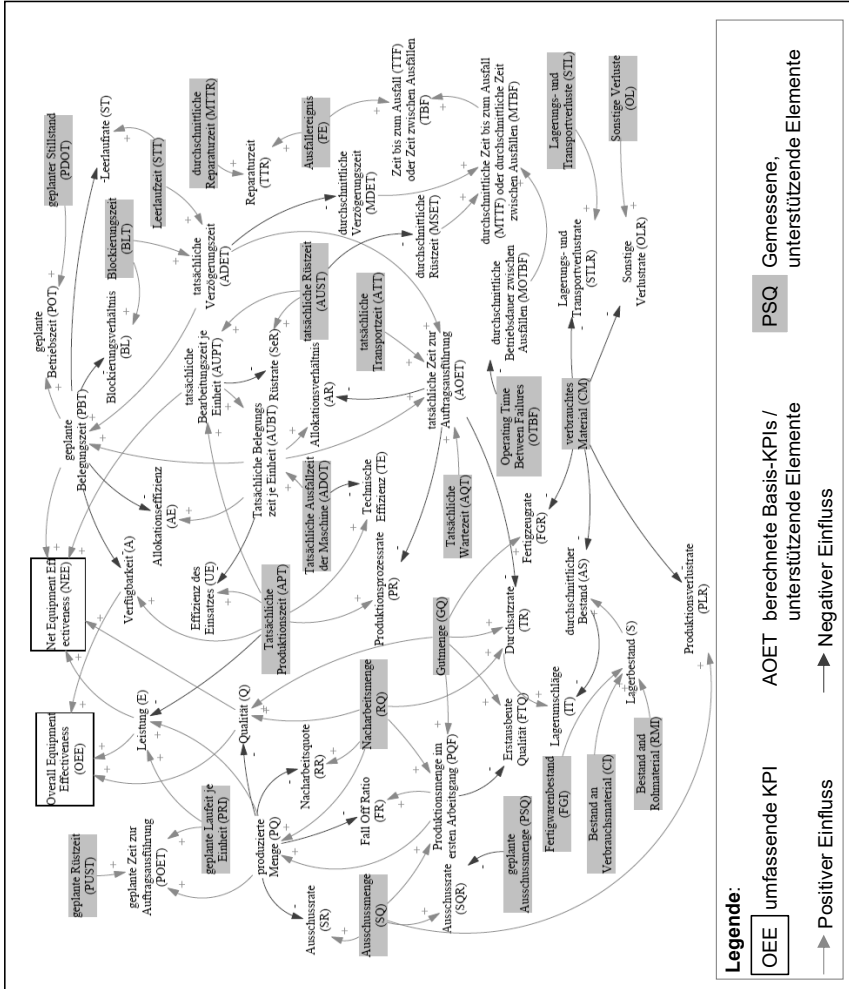


Abbildung 9-32: Vensim™-Modell für KPI und deren Einflüsse

Zugehörige Formeln

- (01) "Allokationseffizienz (AE)"= ("Tatsächliche Belegungszeit je Einheit (AUBT)"/"geplante Belegungszeit (PBT)")*100 Units: Percentage
- (02) "Allokationsverhältnis (AR)"= ("Tatsächliche Belegungszeit je Einheit (AUBT)"/"tatsächliche Zeit zur Auftragsausführung (AOET)")*100 Units: Percentage
- (03) "Ausfallereignis (FE)"=1 Units: Dmnl
- (04) "Ausschussmenge (SQ)"=2 Units: Piece
- (05) "Ausschussrate (SQR)"= ("Ausschussmenge (SQ)"/"geplante Ausschussmenge (PSQ)")*100 Units: Percentage
- (06) "Ausschussrate (SR)"= ("Ausschussmenge (SQ)"/"produzierte Menge (PQ)")*100 Units: Percentage
- (07) "Bestand an Verbrauchsmaterial (CI)"=200 Units: Piece
- (08) "Bestand and Rohmaterial (RMI)"=200 Units: Piece

(09)	"Blockierungsverhältnis (BL)"="Blockierungszeit (BLT)"/"geplante Belegungszeit (PBT))*100	Units: Percentage
(10)	"Blockierungszeit (BLT)"=5	Units: Minute
(11)	"Durchsatzrate (TR)"="Gutmenge (GQ)"/"Nacharbeitsmenge (RQ)"/"tatsächliche Zeit zur Auftragsausführung (AOET))*100	Units: Piece / Minute
(12)	"durchschnittliche Betriebsdauer zwischen Ausfällen (MOTBF)"= SMOOTH("Operating Time Between Failures (OTBF)", 7200)	Units: Minute
(13)	"durchschnittliche Reparaturzeit (MTTR)"=20	Units: Minute
(14)	"durchschnittliche Rüstzeit (MSET)"=SMOOTH("tatsächliche Rüstzeit (AUST)", 7200)	Units: Minute
(15)	"durchschnittliche Verzögerungszeit (MDET)"=SMOOTH("tatsächliche Verzögerungszeit (ADET)", 7200)	Units: Minute
(16)	"durchschnittliche Zeit bis zum Ausfall (MTTF) oder durchschnittliche Zeit zwischen Ausfällen (MTBF)"="durchschnittliche Verzögerungszeit (MDET)"+"durchschnittliche Betriebsdauer zwischen Ausfällen (MOTBF)"+"durchschnittliche Rüstzeit (MSET)"	Units: Minute
(17)	"durchschnittlicher Bestand (AS)"="Lagerbestand (S)"/"verbraucht Material (CM)"	Units: Piece
(18)	"Effizienz des Einsatzes (UE)"="Tatsächliche Produktionszeit (APT)"/"Tatsächliche Belegungszeit je Einheit (AUBT))*100	Units: Percentage
(19)	"Erstaubeute Qualität (FTQ)"="Gutmenge (GQ)"/"Produktionsmenge im ersten Arbeitsgang (PQF))*100	Units: Percentage
(20)	"Fall Off Ratio (FR)"=1-("Produktionsmenge im ersten Arbeitsgang (PQF)"/"produzierte Menge (PQ))*100	Units: Percentage
(21)	"Fertigwarenbestand (FGI)"= 50	Units: Piece
(22)	"Fertigzeugerate (FGR)"="Gutmenge (GQ)"/"verbraucht Material (CM)"	Units: Piece
(23)	FINAL TIME = 7200	Units: Minute
	The final time for the simulation.	
(24)	"geplante Ausschussmenge (PSQ)"= 2	Units: Piece
(25)	"geplante Belegungszeit (PBT)"="Tatsächliche Belegungszeit je Einheit (AUBT)"+"tatsächliche Verzögerungszeit (ADET)"	Units: Minute
(26)	"geplante Betriebszeit (POT)"="geplante Belegungszeit (PBT)"+"geplanter Stillstand (PDOT)"	Units: Minute
(27)	"geplante Laufzeit je Einheit (PRI)"=132	Units: Minute
(28)	"geplante Rüstzeit (PUST)"= 5	Units: Minute
(29)	"geplante Zeit zur Auftragsausführung (POET)"="geplante Laufzeit je Einheit (PRI)**"produzierte Menge (PQ)"+"geplante Rüstzeit (PUST)"	Units: Minute
(30)	"geplanter Stillstand (PDOT)"=900	Units: Minute
(31)	"Gutmenge (GQ)"=35	Units: Piece
(32)	INITIAL TIME = 0	Units: Minute
	The initial time for the simulation.	
(33)	"Lagerbestand (S)"="Bestand an Verbrauchsmaterial (CI)"+"Bestand an Rohmaterial (RMI)"+"Fertigwarenbestand (FGI)"	Units: Piece
(34)	"Lagerumschläge (IT)"="Durchsatzrate (TR)"/"durchschnittlicher Bestand (AS)"	Units: Dmnl
(35)	"Lagerungs- und Transportverluste (STL)"= 3	Units: Dmnl
(36)	"Lagerungs- und Transportverluste (STLR)"="Lagerungs- und Transportverluste (STL)"/"verbraucht Material (CM)"	Units: Dmnl
(37)	"Leerlauftrate (ST)"="Leerlaufzeit (STT)"/"geplante Belegungszeit (PBT))*100	Units: Percentage
(38)	"Leerlaufzeit (STT)"=1	Units: Minute
(39)	"Leistung (E)"="geplante Laufzeit je Einheit (PRI)**"produzierte Menge (PQ)"/"Tatsächliche Produktionszeit (APT))*100	Units: Percentage
(40)	"Nacharbeitsmenge (RQ)"=3	Units: Piece
(41)	"Nacharbeitsquote (RR)"="Nacharbeitsmenge (RQ)"/"produzierte Menge (PQ))*100	Units: Percentage
(42)	"Net Equipment Effectiveness (NEE)"="("tatsächliche Bearbeitungszeit je Einheit (AUBT)"/"geplante Belegungszeit (PBT))*("Leistung (E)"/100)*("Qualität (Q)"/100))*100	Units: Percentage
(43)	"Operating Time Between Failures (OTBF)"=480	Units: Minute
(44)	"Overall Equipment Effectiveness (OEE)"="Verfügbarkeit (A)/100)*("Leistung (E)"/100)*("Qualität (Q)"/100))*100	Units: Percentage
(45)	"Produktionsmenge im ersten Arbeitsgang (PQF)"="Gutmenge (GQ)"+"Nacharbeitsmenge (RQ)"+"Ausschussmenge (SQ)"	Units: Piece
(46)	"Produktionsprozessrate (PR)"="Tatsächliche Produktionszeit (APT)"/"tatsächliche Zeit zur Auftragsausführung (AOET))*100	Units: Percentage
(47)	"Produktionsverluste (PLR)"="Ausschussmenge (SQ)"/"verbraucht Material (CM)"	Units: Dmnl
(48)	"produzierte Menge (PQ)"="Produktionsmenge im ersten Arbeitsgang (PQF)"+"Nacharbeitsmenge (RQ)"	Units: Piece
(49)	"Qualität (Q)"="("Nacharbeitsmenge (RQ)"+"Gutmenge (GQ)"/"produzierte Menge (PQ))*100	Units: Percentage
(50)	"Rüstrate (SeR)"="tatsächliche Rüstzeit (AUST)"/"tatsächliche Bearbeitungszeit je Einheit (AUBT))*100	Units: Percentage
(51)	"Reparaturzeit (TTR)"="durchschnittliche Reparaturzeit (MTTR)**"Ausfallereignis (FE)"	Units: Minute
(52)	SAVEPER = TIME STEP	Units: Minute [0,?]
	The frequency with which output is stored.	
(53)	"Sonstige Verluste (OL)"=20	Units: Dmnl
(54)	"Sonstige Verluste (OLR)"="Sonstige Verluste (OL)"/"verbraucht Material (CM)"	Units: Dmnl
(55)	"Tatsächliche Produktionszeit (APT)"=6300	Units: Minute

- (56) "tatsächliche Bearbeitungszeit je Einheit (AUPT)"="Tatsächliche Produktionszeit (APT)"+"tatsächliche Rüstzeit (AUST)" Units: Minute
- (57) "Tatsächliche Ausfallzeit der Maschine (ADOT)"=5 Units: Minute
- (58) "Tatsächliche Belegungszeit je Einheit (AUBT)"="Tatsächliche Ausfallzeit der Maschine (ADOT)"+"tatsächliche Bearbeitungszeit je Einheit (AUPT)" Units: Minute
- (59) "tatsächliche Rüstzeit (AUST)"=10 Units: Minute
- (60) "tatsächliche Transportzeit (ATT)"=5 Units: Minute
- (61) "tatsächliche Verzögerungszeit (ADET)"="Blockierungszeit (BLT)"+"Leerlaufzeit (STT)" Units: Minute
- (62) "Tatsächliche Wartezeit (AQT)"=2 Units: Minute
- (63) "tatsächliche Zeit zur Auftragsausführung (AOET)"="Tatsächliche Wartezeit (AQT)"+"tatsächliche Transportzeit (ATT)"+"Tatsächliche Belegungszeit je Einheit (AUBT)"+"tatsächliche Verzögerungszeit (ADET)" Units: Minute
- (64) "Technische Effizienz (TE)"=(("Tatsächliche Produktionszeit (APT)"/("Tatsächliche Produktionszeit (APT)"+"Tatsächliche Ausfallzeit der Maschine (ADOT)"))*100 Units: Percentage
- (65) TIME STEP = 1 Units: Minute [0,?]
The time step for the simulation.
- (66) "verbraucht Material (CM)"=100 Units: Piece
- (67) "Verfügbarkeit (A)"=(("Tatsächliche Produktionszeit (APT)"/"geplante Belegungszeit (PBT)")*100 Units: Percentage
- (68) "Zeit bis zum Ausfall (TTF) oder Zeit zwischen Ausfällen (TBF)"="Ausfallereignis (FE)"* "durchschnittliche Zeit bis zum Ausfall (MTTF) oder durchschnittliche Zeit zwischen Ausfällen (MTBF)" Units: Minute

9.8.2 Kennzahlen der Kategorie „Unterstützende Elemente“

Tabelle 9-12: unterstützende Elemente und ihre Beschreibung

KPI	Symbol	unterstützendes Element	Kategorie	Beschreibung
Tatsächliche Produktionszeit (Actual Production Time)	APT	Zeit	Auftrag	Die tatsächliche Produktionszeit ist die tatsächliche Zeit, in der eine Arbeitseinheit produziert wird. Sie umfasst nur die wertschöpfenden Funktionen.
Tatsächliche Wartezeit (Actual Queuing Time)	AQT	Zeit	Auftrag	Die tatsächliche Zeit, während der das Material darauf wartet, einen Fertigungsprozess zu durchlaufen, d.h. die Wartezeit in einem Puffer. Manchmal wird eine solche Wartezeit auch als Verweilzeit im Puffer bezeichnet.
Tatsächliche Transportzeit (Actual Transport Time)	ATT	Zeit	Auftrag	Die tatsächliche Transportzeit ist die tatsächliche Zeit, die für den Transport zwischen Arbeitseinheiten benötigt wird
Tatsächliche Ausfallzeit der Einheit (Actual Unit Down Time)	ADOT	Zeit	Maschine	Die tatsächliche Ausfallzeit der Arbeitseinheit ist die tatsächliche Zeit, in der die Arbeitseinheit die Auftragsproduktion nicht ausführt, obwohl sie verfügbar ist.
Tatsächliche Rüstzeit der Einheit (Actual Unit Setup Time)	AUST	Zeit	Maschine	Die tatsächliche Rüstzeit einer Einheit ist die Zeit, die für die Vorbereitung eines Auftrags an einer Arbeitseinheit benötigt wird.
Stillstandszeit (Blocking Time)	BLT	Zeit	Maschine	Die Stillstandszeit einer Anlage während Störungen, bei denen Teile nicht weiterproduziert werden können.
Bestand an Verbrauchsmaterial (Consumable inventory)	CI	Quantität	Produktionslogistik	Bei dem Verbrauchsmaterialbestand handelt es sich um Material, das während des Produktionsprozesses in Menge oder Qualität umgewandelt wird und nicht mehr für den Einsatz in Produktionsbetrieben zur Verfügung steht.
Verbrauchtes Material (Consumed Material)	CM	Quantität	Produktionslogistik	Das verbrauchte Material ist die summierte Menge der von einem Prozess verbrauchten Materialien.
Ausfallereignis (Failure Event)	FE	Zeit	Instandhaltung	Die Ausfallereigniszählung ist die Zählung über ein bestimmtes Zeitintervall der Beendigungen der Fähigkeit einer Arbeitseinheit, den erforderlichen Betrieb durchzuführen.
Fertigwarenbestand (Finished goods inventory)	FGI	Quantität	Produktionslogistik	Der Fertigwarenbestand ist die Menge der akzeptablen Menge, die geliefert werden kann.
Gutmenge (Good Quantity)	GQ	Quantität	Qualität	Die Gutmenge ist die produzierte Menge, die den Qualitätsanforderungen entspricht.
Sonstige Verluste (Other Losses)	OL	Quantität	Produktionslogistik	Ein weiterer Verlust ist die durch außergewöhnliche Ereignisse, z. B. Naturkatastrophen, verlorene Menge.
Betriebszeit zwischen Ausfällen (Operating Time Between Failures)	OTBF	Zeit	Instandhaltung	Die tatsächliche Produktionszeit einer Einheit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ausfällen einer Maschine.
Geplante Ausfallzeit (Planned Down Time)	PDOT	Zeit	Maschine	Die geplante Zeit, während der eine Maschine nicht produzieren kann, was geplante Pausen, Besprechungen, Wartungsarbeiten usw. einschließen kann.
Geplante Herstellzeit je Einheit (Planned Runtime Per Item)	PRI	Zeit	Auftrag	Die geplante Laufzeit pro Artikel ist die geplante Zeit für die Herstellung einer Mengeneinheit.
Geplante Ausschussmenge (Planned Scrap Quantity)	PSQ	Quantität	Qualität	Die geplante Ausschussmenge ist die Menge an prozessbedingtem Ausschuss, die bei der Herstellung des Produkts (z. B. in der Start- oder Hochlaufphase der Fertigungssysteme) erwartet wird.
Geplante Rüstzeit der Einheit (Planned Unit Setup Time)	PUST	Zeit	Maschine	Die geplante Rüstzeit pro Mengeneinheit ist die geplante Zeit für das Rüsten einer Arbeitseinheit für einen Auftrag.
Bestand an Rohmaterial (Raw materials inventory)	RMI	Quantität	Produktionslogistik	Der Rohstoffbestand ist der Bestand an Materialien, die durch die Produktion in Zwischen- oder Fertigerzeugnisse umgewandelt werden.
Nacharbeitsmenge (Rework Quantity)	RQ	Quantität	Qualität	Die Nacharbeitsmenge ist die Menge, die die Qualitätsanforderungen nicht erfüllt, bei der diese Anforderungen jedoch durch Nacharbeit erfüllt werden können.
Ausschussmenge (Scrap Quantity)	SQ	Quantität	Qualität	Die Ausschussmenge ist die produzierte Menge, die die Qualitätsanforderungen nicht erfüllt und entweder verschrottet oder recycelt werden muss.
Lagerungs- und Transportverluste (Storage and Transportation Loss)	STL	Quantität	Produktionslogistik	Der Lager- und Transportverlust ist die Menge, die während der Lagerung und des Transports verloren geht, z. B. Inventarverlust während einer Inventarberechnung oder Materialverlust während der Bewegung von einem Ort zu einem anderen.
Ausfallzeit (Starving Time)	STT	Zeit	Maschine	Die geplante Zeit, während der eine Maschine nicht produzieren kann, was geplante Pausen, Besprechungen, Wartung usw. einschließen kann.

Lebenslauf

Berufstätigkeit:

- 02/2021 – heute Produktmanagerin bei Carl Zeiss MES Solutions GmbH, Ulm
- 02/2017 – 12/2020 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, TU Kaiserslautern
- 09/2015 – 01/2017 Strategische Einkäuferin bei Carl Zeiss Vision International GmbH, Aalen
- 04/2015 – 08/2015 Werkstudentin bei Bosch Packaging Technology, Crailsheim
- 10/2013 – 07/2015 Wissenschaftliche Hilfskraft in der Mathematiklehre im Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen an der Hochschule Aalen
- 11/2012 – 08/2013 Studentische Hilfskraft im Grundlagenzentrum der Hochschule Aalen
- 03/2012 – 08/2012 Praxissemester bei Carl Zeiss IMT Shanghai Co., Ltd., Shanghai
- 08/2011 – 09/2011 Praktikum bei Rehau AG, Rehau
- 10/2009 – 01/2010 Aushilfe bei Riehle Maschinenbau GmbH, Aalen

Studium:

- 09/2013 – 09/2015 Hochschule Aalen, Fakultät Wirtschaftswissenschaften
Applied System Dynamics
Zeugnis Master of Science vom 18.09.2015
- 07/2014 – 11/2014 Auslandssemester an der University of New South Wales,
Sydney, Australien
- 03/2010 – 08/2013 Hochschule Aalen, Fakultät Wirtschaftswissenschaften
Wirtschaftsingenieurwesen
Zeugnis Bachelor of Engineering vom 18.11.2013

Produktionstechnische Berichte aus dem FBK

bereits veröffentlicht wurden

- 01/09 Aurich, J.C.: Radio Frequency Identification (RFID) in der Fertigung – Handbuch zur Einführung in neue Anwendungsfelder.
2009, ISBN 978-3-941438-08-8 € 30,-
- 02/09 Stürenburg, B.: Optimierung der Spanbildung und Minimierung des Späneeintrages in das Werkstück für das Bohren von Al-Legierungen.
2009, ISBN 978-3-941438-13-2 € 30,-
- 03/09 Eyrisch, T.: Optimierung der Herstellung von Vollhartmetallwerkzeugen – Strategie zur Vermeidung von Oberflächenschädigungen.
2009, ISBN 978-3-941438-12-5 € 30,-
- 04/09 von Killisch-Horn, G.: Erfahrungsbasierte Implementierung von APS-Systemen in der Einzel- und Kleinserienproduktion.
2009, ISBN-978-3-941438-17-0 € 30,-
- 05/09 Naab, C.: Auslaufmanagement – Konzept zur Abwicklung des Serienauslaufs in der Produktion.
2009, ISBN-978-3-941438-26-2 € 35,-
- 06/09 Herzenstiel, P.: Hochleistungsplanschleifen mit einer definiert gesetzten CBN-Schleifscheibe.
2009, ISBN-978-3-941438-28-6 € 35,-
- 07/09 Aurich, J.C.: Lebenszyklusorientierte Konfiguration von Produkt-Service Systemen – Ein Leitfaden für die Praxis.
2009, ISBN-978-3-941438-27-9 € 30,-
- 01/10 Aurich, J.C.: Organisationsveranstaltung und Kompetenzaufbau bei der Gestaltung und Realisierung investiver Produkt-Service Systeme – Ein Leitfaden für die Praxis.
2010, ISBN-978-3-941438-37-8 € 35,-
- 02/10 Aurich, J.C.: Gestaltung investiver Produkt-Service Systeme – Ein Leitfaden für die Praxis.
2010, ISBN-978-3-941438-38-5 € 35,-
- 03/10 Aurich, J.C.: Realisierung investiver Produkt-Service Systeme – Ein Leitfaden für die Praxis.
2010, ISBN-978-3-941438-39-2 € 35,-
- 04/10 Franke, V.: Einfluss der Werkzeugschneidkante auf die Bohrungsqualität bei der spanenden Bearbeitung langfaserverstärkter Kunststoffe.
2010, ISBN-978-3-941438-53-8 € 35,-

- 05/10 Sudermann, H.: Gratbildung beim Schleifen – Experimentelle Analyse und Modellierung der Gratbildung sowie Ansätze zur Gratminimierung.
2010, ISBN-978-3-941438-54-5 € 35,-
- 06/10 Shahzad, M.A.: Analysis of the Machinability of an Aluminum Matrix Composite Material.
2010, ISBN-978-3-941438-56-9 € 35,-
- 07/10 Gómez Kempf, F.A.: Flexibilitätsorientierte Produktionssysteme – Modulare Gestaltung, Einführung und Nutzung.
2010, ISBN-978-3-941438-58-3 € 35,-
- 01/11 Engmann, J.: Galvanisch gebundene Mikroschleifstifte – Entwicklung, Herstellung und Einsatz.
2011, ISBN-978-3-941438-59-0 € 35,-
- 02/11 Leitz, L.: Beitrag zur Beherrschung der Gratbildung bei Bohrungsverschneidungen.
2011, ISBN-978-3-941438-72-9 € 35,-
- 03/11 Siener, M.: Sicherung der Qualitätsfähigkeit von Produktionsprozessen.
2011, ISBN-978-3-941438-79-8 € 35,-
- 04/11 Wolf, N.: Modell zur Unterstützung der Analyse von Ausfallursachen bei komplexen mechatronischen Systemen.
2011, ISBN-978-3-941438-89-7 € 35,-
- 01/12 Faltin, M.: RFID-Einsatz in fertigungstechnischen Prozessketten – Identifikation und Beurteilung von Einsatzpotentialen.
2012, ISBN-978-3-941438-97-2 € 35,-
- 01/13 Lauer, C.: Integriertes Modell zur Materialflusssimulation und zur Visualisierung in der Virtuellen Realität.
2013, ISBN 978-3-943995-19-0 € 35,-
- 02/13 Aurich, J.C.: Qualitätsorientierte Instandhaltungsplanung und -steuerung in produktionstechnischen Prozessketten Handbuch für die Praxis.
2013, ISBN 978-3-943995-21-3 € 35,-
- 03/13 Kirsch, B.: Wirkmechanismen der Kühlschmierstoff-Zufuhr beim Schleifen – Analyse externer und interner Kühlschmierstoff-Zufuhrmethoden.
2013, ISBN 978-3-943995-25-1 € 35,-
- 04/13 Schweitzer, E.J.: Prozessorientiertes Dienstleistungsproduktionssystem.
2013, ISBN 978-3-943995-30-2 € 35,-

- 05/13 Malak, R. C.: Methode zur softwarebasierten Planung technischer Änderungen in der Produktion.
2013, ISBN 978-3-943995-34-3 € 35,-
- 06/13 Yang, X.: Sound Simulation and Visualization in virtual Manufacturing Systems.
2013, ISBN 978-3-943995-39-8 € 35,-
- 07/13 Kranz, J.-N.: Konzept zur Vermeidung von Produkt-Piraterie Risiken – Ein Ansatz für die Ersatzteile der Investitionsgüterindustrie –
2013, ISBN 978-3-943995-46-6 € 35,-
- 01/14 Mannweiler, C.: Konfiguration investiver Produkt-Service Systeme.
2014, ISBN 978-3-943995-61-9 € 35,-
- 02/14 Aurich J.C. (Hrsg.): Produktivität und Qualität von Serviceprodukten – Ein Leitfaden für die Praxis.
2014, ISBN 978-3-943995-65-7 € 35,-
- 03/14 Waltemode S.: Qualitätsbewertung technischer Produkt-Service Systeme.
2014, ISBN 978-3-943995-68-8 € 35,-
- 04/14 Bohr C. L.: Vermeidung struktureigener Produktpiraterie bei Ersatzteilen.
2014, ISBN 978-3-943995-69-5 € 35,-
- 05/14 Olenburg A.: Tribologisches Prozessverhalten beim Bearbeiten von Feinsteinzeug-Fliesen.
2014, ISBN 978-3-943995-76-3 € 35,-
- 01/15 Zimmermann M.: Drehen von Aluminium-Matrix-Verbundwerkstoffen - Analyse thermischer und mechanischer Einflüsse auf die Fertigungsgenauigkeit bei der Trockenbearbeitung.
2015, ISBN 978-3-943995-94-7 € 35,-
- 01/16 Adam M.: Konzept zum Umgang mit scheinbar zufälligen Fehlern an technischen Systemen – eine Systematik.
2016, ISBN 978-3-95974-008-1 € 35,-
- 02/16 Walk M.: Integriertes Desktopmaschinensystem für die Herstellung und Anwendung ultrakleiner Mikroschleifwerkzeuge.
2016, ISBN 978-3-95974-021-0 € 35,-
- 03/16 Carrella M.: Zerspanungsmechanismen beim Mikroschleifen von einkristallinem Silizium.
2016, ISBN 978-3-95974-032-6 € 35,-
- 01/17 Reichenbach I. G.: Beitrag zur Beherrschung der Mikrofräsbearbeitung von Polymethylmethacrylat.
2017, ISBN 978-3-95974-042-5 € 35,-

- 02/17 Fallenstein F.: Kühlkanalaustrittsbedingungen bei VHM-Wendelbohrern
- Analyse der Einflüsse von Kühlkanalaustrittsposition und
KSS-Volumenstrom auf die Temperatur im Schneidkeil.
2017, ISBN 978-3-95974-056-2 € 35,-
- 03/17 Winkes P.: Vorgehensmodell für den systematischen Einsatz
der Virtuellen Realität zur Unterstützung des Montageplanungsprozesses.
2017, ISBN 978-3-95974-057-9 € 35,-
- 04/17 Schneider F.: Analyse der Spanbildung und Oberflächenmorphologie
beim Mikrospanen von Titanwerkstoffen
2017, ISBN 978-3-95974-059-3 € 35,-
- 05/17 Mert G.: Kumulierter Energieaufwand technischer Produkt-Service Systeme
2017, ISBN 978-3-95974-074-6 € 35,-
- 06/17 Weidig C.: Konzept zum prozessgetriebenen Anforderungsmanagement
für die Entwicklung mobiler Fabrikplanungs-Apps
2017, ISBN 978-3-95974-075-3 € 35,-
- 07/17 Cichos D.: Physikalische Modellierung technischer Änderungen
in der Produktion
2017, ISBN 978-3-95974-073-9 € 35,-
- 01/18 Effgen C.: Schneidkantenpräparation mit elastisch gebundenen
Schleifwerkzeugen – Konzeptionierung, Entwicklung und Bewertung
am Beispiel von Vollhartmetallfräswerkzeugen
2018, ISBN 978-3-95974-089-0 € 35,-
- 02/18 Kasakow G.: Entwicklung einer ereignisdiskreten Produktionssteuerung
2018, ISBN 978-3-95974-090-6 € 35,-
- 03/18 Mayer P.: Verformungsinduzierte Martensitbildung beim kryogenen
Drehen von metastabilem austenitischem Stahl
2018, ISBN 978-3-95974-098-2 € 35,-
- 04/18 Herder C.: Konzept zur impliziten Identifikation und Planung
von Technologien für die Produktion
2018, ISBN 978-3-95974-101-9 € 35,-
- 01/19 Müller C.: Kompakte Luftlagerspindeln für die spanende Mikrobearbeitung
auf Desktop-Werkzeugmaschinen
2019, ISBN 978-3-95974-105-7 € 35,-
- 01/20 Meissner H. M.: Integrierte Arbeitsplanung und Produktionssteuerung
cyber-physischer Produktionssysteme
2020, ISBN 978-3-95974-125-5 € 35,-

- 02/20 Sinnwell C.: Methode zur Produktionssystemkonzipierung auf Basis früher Produktinformationen – Ein Beitrag zur Integration von Produktionssystemplanung und Produktentwicklung unter Einsatz des MBSE
2020, ISBN 978-3-95974-127-9 € 35,-
- 03/20 Bohley M.: Prozess-Maschine-Interaktion beim Mikrofräsen von cp-Titan
2020, ISBN 978-3-95974-130-9 € 35,-
- 01/21 Hotz H.: Kryogenes Drehen metastabiler austenitischer Stähle – Analyse der Wirkzusammenhänge zwischen Einstellgrößen, Prozessgrößen und Oberflächenmorphologie
2021, ISBN 978-3-95974-146-0
- 02/21 Arrabiyeh P. A.: Electroless Plated Micro Pencil Grinding Tools: Conception, Manufacturing, and Application
2021, ISBN 978-3-95974-158-3
- 03/21 Yi L.: Eco-Design for Additive Manufacturing Using Energy Performance Quantification and Assessment
2021, ISBN 978-3-95974-157-6
- 01/22 Kölsch P.: Agile Planung von Produkt-Service Systemen durch den Einsatz von Design Thinking
2022, ISBN 978-3-95974-170-5
- 02/22 Klauer K.: Mikrofräsen flächenhafter Kalibriernormale auf Basis realer Bauteiloberflächen
2022, ISBN 978-3-95974-177-4
- 03/22 Greco S.: Additiv-Subtraktive Prozesskette in der Mikrobearbeitung – Analyse der Einflüsse auf die Prozess- und Prozessergebnisgrößen beim selektiven Laserschmelzen und Mikrofräsen von Edelstahl 1.4404
2022, ISBN 978-3-95974-182-8
- 04/22 Siedler C.: Entwicklung eines Transformationskonzepts zur Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU
2022, ISBN 978-3-95974-185-9



Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation

ISBN 978-3-95974-185-9

ISSN 0937-9061



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
KAISERSLAUTERN