

Entwicklung eines Industrie 4.0 Reifegradindex für produzierende Unternehmen

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades eingereicht
am Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, Prozesse und Systeme
der Universität Potsdam

von

Jochen Schumacher

Potsdam, Mai 2022

Erstgutachter und Betreuer:

Prof. Dr. Norbert Gronau

Universität Potsdam

Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, Prozesse und Systeme

Zweitgutachterin:

Prof. Dr. Moreen Heine

Universität zu Lübeck

Institut für Multimediale und Interaktive Systeme

Soweit nicht anders gekennzeichnet, ist dieses Werk unter einem Creative-Commons-Lizenzvertrag Namensnennung 4.0 lizenziert.
Dies gilt nicht für Zitate und Werke, die aufgrund einer anderen Erlaubnis genutzt werden.
Um die Bedingungen der Lizenz einzusehen, folgen Sie bitte dem Hyperlink:
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Online veröffentlicht auf dem
Publikationsserver der Universität Potsdam:
<https://doi.org/10.25932/publishup-55464>
<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:517-opus4-554642>

Danksagung

Die vorliegende Dissertation zum Thema „Entwicklung eines Industrie 4.0 Reifegradindex für produzierende Unternehmen“ entstand durch mein großes persönliches Interesse an den Themen der digitalen Transformation produzierender Unternehmen im Zeitraum von 2016 bis 2022.

An erster Stelle danke ich herzlich meinem Betreuer Herrn Professor Dr. Norbert Gronau für die sehr gute Begleitung der Promotion und seine wertvollen Anregungen in Forschungskolloquien, Gesprächen und Notizen.

Weiter danke ich Frau Professor Dr. Moreen Heine von der Universität zu Lübeck für die Erstellung des Zweitgutachtens.

Mein Dank gilt auch allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Wirtschaftsinformatik, Prozesse und Systeme für die gute Organisation sowie den guten fachlichen Austausch rund um die Promotion.

Besonderen Dank richte ich an meine liebe Frau Olga und meine beiden Kinder Lisa und Tim, die mich stets unterstützt haben und viel Verständnis zeigten für meine unzähligen Stunden am Schreibtisch.

Abstract (deutsch/englisch)

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Industrie 4.0 Reifegradindex für produzierende Unternehmen (KMU und Mittelstand) mit diskreter Produktion. Die Motivation zu dieser Arbeit entstand aus dem Zögern vieler Unternehmen – insbesondere KMU und Mittelstand – bei der Transformation in Richtung Industrie 4.0. Im Rahmen einer Marktstudie konnte belegt werden, dass 86 Prozent der befragten produzierenden Unternehmen kein für ihr Unternehmen geeignetes Industrie 4.0 Reifegradmodell gefunden haben, mit dem sie ihren Status Quo bewerten und Maßnahmen für einen höheren Grad der Reife ableiten könnten. Die Bewertung bestehender Reifegradmodelle zeigte Defizite hinsichtlich der Industrie 4.0 Abdeckung, der Betrachtung der sozio-technischen Dimensionen Mensch, Technik und Organisation sowie der Betrachtung von Managements und Unternehmenskultur. Basierend auf den aktuellen Industrie 4.0 Technologien und Handlungsbereichen wurde ein neues, modular aufgebautes Industrie 4.0 Reifegradmodell entwickelt, das auf einer ganzheitlichen Betrachtung aller sozio-technischen Dimensionen Mensch, Technik und Organisation sowie deren Schnittstellen basiert. Das Modell ermittelt neben dem Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI) vier weitere Indizes zur Bewertung der Industrie 4.0 Reife des Unternehmens. Das Modell wurde bei einem Unternehmen validiert und steht nun als Template für darauf aufbauende Forschungsarbeiten zur Verfügung.

The aim of this work is the development of an Industry 4.0 maturity index for manufacturing companies (SMEs and medium-sized companies) with discrete production. The motivation for this work arose from the hesitation of many companies – especially SMEs and medium-sized companies – in the transformation towards Industry 4.0. A market study showed that 86 percent of the manufacturing companies surveyed did not find an Industry 4.0 maturity model suitable for their company, with which they could assess their status quo and derive measures for a higher degree of maturity. The evaluation of existing maturity models showed deficits with regard to Industry 4.0 coverage, the consideration of the socio-technical dimensions of people, technology and organization as well as the consideration of management and corporate culture. Based on the current Industry 4.0 technologies and areas of action, a new, modular Industry 4.0 maturity model was developed, which is based on a holistic consideration of all socio-technical dimensions of people, technology and organization as well as their interfaces. In addition to the Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI), the model determines four other indices to evaluate the company's Industry 4.0 maturity. The model was validated at a company and is now available as a template for research based on it.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	IV
1. Einführung.....	1
1.1. Ausgangssituation.....	2
1.2. Problemstellung und wissenschaftliche Motivation.....	6
1.3. Ziele und Forschungsfragen	13
1.4. Methodisches Vorgehen und Aufbau der Arbeit	14
2. Stand der Wissenschaft.....	17
2.1. Die Ausgangssituation produzierender Unternehmen	17
2.1.1. Allgemeine Unternehmensstruktur	18
2.1.2. Produktionssysteme.....	19
2.1.3. Informationssysteme	25
2.1.4. Herausforderungen in Produktion, IT und Organisation	31
2.1.5. Besonderheiten von KMU und Mittelstand	39
2.2. Industrie 4.0 – Technologie und Anwendung	42
2.2.1. Die vierte industrielle Revolution.....	42
2.2.2. Technologische Grundlagen	44
2.2.3. Smart Factory – Horizontale und vertikale Integration im Unternehmen	60
2.2.4. Smart Supply Chain – Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke	77
2.2.5. Smart Products – Intelligente Produkte und Abbildung des Produktlebenszyklus	86
2.2.6. Neue Geschäftsmodelle – Datenbasierte Produkte und Services.....	88
2.3. Bewertung bestehender Industrie 4.0 Reifegradmodelle und -indizes.....	94
2.3.1. Methodik der Bewertung	95
2.3.2. Bewertung der Modelle	99
2.3.3. Zusammenfassung und Fazit	125
2.4. Marktstudie zur Nutzung von Industrie 4.0 Modellen.....	128
2.4.1. Methodik und Fragebogendesign	128
2.4.2. Wesentliche Ergebnisse der Umfrage	130
2.4.3. Zusammenfassung und Fazit	134
2.5. Zusammenfassung	135
3. Anforderungen an Modelldesign und Reifegradindex	136
3.1. Allgemeine Anforderungen an Reifegradmodelle	136

3.2.	<i>Ziele und Anwendungsbereiche</i>	136
3.3.	<i>Betrachtungsbereiche</i>	137
4.	Design und Entwicklung eines Industrie 4.0 Reifegradindex	140
4.1.	<i>Allgemeines Modelldesign</i>	140
4.2.	<i>Der Smart Factory Maturity Index (SFMI)</i>	147
4.2.1.	Unternehmen	149
4.2.2.	Entwicklung	157
4.2.3.	Produktion.....	162
4.2.4.	Produktionsplanung und -steuerung.....	170
4.2.5.	Intralogistik.....	173
4.2.6.	Instandhaltungsmanagement	178
4.2.7.	Werkzeugmanagement	180
4.2.8.	Qualitätsmanagement.....	182
4.3.	<i>Der Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI)</i>	184
4.3.1.	Unternehmen	185
4.3.2.	Echtzeitstatus und Tracking	187
4.3.3.	Planung, Steuerung und Überwachung.....	189
4.4.	<i>Der Smart Product & Life Cycle Maturity Index (PLCMI)</i>	192
4.4.1.	Unternehmen	193
4.4.2.	Smart Products (Produktlebenszyklus)	195
4.4.3.	Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus.....	197
4.5.	<i>Der New Business Maturity Index (NBMI)</i>	199
4.5.1.	Unternehmen	200
4.5.2.	Smart Products (Geschäftsmodell).....	201
4.5.3.	Smart Services	202
4.5.4.	Digitale Geschäftsmodelle.....	203
4.5.5.	Digitale Plattformen	203
4.6.	<i>Der Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)</i>	205
4.7.	<i>Praktische Anwendung des Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)</i>	206
5.	Anwendung und Validierung des Industrie 4.0 Reifegradindex	208
5.1.	<i>Zielsetzung und Vorgehensweise</i>	208
5.2.	<i>Das betrachtete Unternehmen</i>	210
5.3.	<i>Testanwendung: Ermittlung des Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)</i>	210
5.3.1.	Ermittlung des Smart Factory Maturity Index (SFMI).....	211

5.3.2.	Ermittlung des Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI).....	216
5.3.3.	Ermittlung des Smart Product & Life Cycle Maturity Index (PLCMI)	218
5.3.4.	Ermittlung des New Business Maturity Index (NBMI)	221
5.3.5.	Darstellung des Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)	224
5.4.	<i>Zusammenfassung der Validierungsergebnisse</i>	<i>226</i>
6.	Ergebnisse und Schlussbetrachtung	227
6.1.	<i>Zusammenfassung der Ergebnisse</i>	<i>227</i>
6.2.	<i>Kritische Würdigung.....</i>	<i>229</i>
6.3.	<i>Ausblick</i>	<i>230</i>
	Literaturverzeichnis.....	232
	Abbildungsverzeichnis	253
	Tabellenverzeichnis	256
	Abkürzungsverzeichnis.....	261
	Anhang	263

1. Einführung

Der Ursprung von „Industrie 4.0“ geht auf das Jahr 2011 zurück, als die Initiative zum ersten Mal auf der Hannover Messe Industrie (HMI) der Öffentlichkeit präsentiert wurde (Kagermann, et al., 2011, S. 2). Industrie 4.0 gehörte zu den damaligen Handlungsempfehlungen der Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft und Wissenschaft an die Bundesregierung. Seither wird die Entwicklung von Industrie 4.0 durch die Einbettung in die High-tech Strategie der deutschen Bundesregierung (BMBF, 2021) systematisch gefördert. Im Fokus steht dabei die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit von Deutschland als Produktionsstandort im globalen Wettbewerb.

Die für Industrieunternehmen durch Industrie 4.0 Ansätze zu erwartenden Chancen und Wirtschaftlichkeitspotenziale sind groß, wie Studien von BITKOM (Bauer, et al., 2014, S. 6ff.) und agiplan (Bischoff, 2015, S. 71ff.) belegen. Die Herausforderung besteht für die Unternehmen darin, ihren individuellen Transformationsprozess in Richtung Industrie 4.0 zu gestalten (Meißner, et al., 2017, S. 607f.). Hierzu existieren zwar inzwischen viele Handlungsempfehlungen, Vorgehensmodelle, Reifegradmodelle und Leitfäden. Diese verfolgen jedoch meist einen lediglich generischen, technikzentrierten Ansatz und fokussieren weniger auf Organisations- und Personalthemen (Leineweber, et al., 2018, S. 21), obwohl diese einen wesentlichen Teil der Neugestaltung des gesamten sozio-technischen Systems ausmachen (Hirsch-Kreinsen, 2014a). Nach wie vor besteht daher der Bedarf an einem Werkzeug, das die Unternehmen bei der anstehenden Transformation in Richtung Industrie 4.0 unterstützt (Leineweber, et al., 2018, S. 21f.).

Hier setzt die vorliegende Arbeit an: Das Ziel ist die Entwicklung eines Reifegradindex für Industrie 4.0 mit einem dem Index zugrunde liegendem Reifegradmodell, das auf geeigneten bestehenden Modellen aufbaut, jedoch deren erkennbaren Defizite nach Möglichkeit vermeidet.

Um eine Grundlage für die in dieser Arbeit beschriebene Entwicklung eines Reifegradmodells für Industrie 4.0 zu schaffen, werden zunächst bewusst nur die ursprünglichen Visionen, Definitionen und Handlungsempfehlungen der Initiatoren (s.o.) betrachtet, bevor in Kapitel 2 die Rezeption des Begriffs Industrie 4.0 in der Praxis, die Systematik bestehender Industrie 4.0 Modelle sowie deren Nutzung durch die Unternehmen näher betrachtet werden.

1.1. Ausgangssituation

Industrie 4.0 wird als die vierte der technologiegetriebenen Revolutionen in der Industrie gesehen, nach der Einführung mechanischer Produktionsanlagen im 18. Jahrhundert, der arbeitsteiligen Massenfertigung und Automatisierung mit Hilfe elektrischer Energie (Taylorismus) ab 1870 sowie des Einsatzes von Elektronik und IT zur Automatisierung von Produktionsprozessen. Der Kern dieser vierten industriellen Revolution ist das „Internet der Dinge“, häufig auch als Internet of Things (IoT) bezeichnet. Es basiert auf Cyber-Physischen Systemen (CPS), d.h. realen physischen Objekten, wie z.B. Maschinen, Sensoren und Aktoren, denen im „cyber space“ eine zusätzliche digitale Identität gegeben wird (Bauernhansl, et al., 2016, S. 11); (Roth, 2016, S. 23). Durch den Einsatz und die Vernetzung dieser Cyber-Physischen Systeme (CPS) soll es möglich werden, Wertschöpfungsnetzwerke mit intelligenteren Überwachungsprozessen und autonomen Entscheidungsprozessen in Echtzeit zu steuern und zu optimieren (Kagermann, et al., 2011, S. 2); (Bauernhansl, 2014, S. 16); (Gronau, 2014a, S. 283).

Mit der Plattform Industrie 4.0 (BMW, 2021) wurde in einem Gemeinschaftsprojekt der deutschen Wirtschaftsverbände BITKOM, VDMA und ZVEI eine zentrale Plattform geschaffen, die Unternehmen durch Handlungsempfehlungen, Informationsangebote und Anwendungsbeispiele bei der digitalen Transformation unterstützt und an internationalen Standardisierungsprozessen mitwirkt. Seither haben sich viele weitere Akteure aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik dieser Plattform angeschlossen, um in Arbeitskreisen fachliche Lösungsansätze und konkrete Handlungsempfehlungen zu den wichtigsten Industrie 4.0 Themen zu erarbeiten.

In ihren erstmals im Jahr 2013 erschienenen Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 konkretisieren die Autoren des Arbeitskreises Industrie 4.0 ihre Vision von Industrie 4.0. Als Kernelement sehen sie die „intelligente Fabrik (Smart Factory)“ (Kagermann, et al., 2013, S. 23), in der Menschen, Maschinen und sonstige Ressourcen miteinander vernetzt sind und sich weitestgehend autonom steuern, um dadurch die Komplexität besser zu beherrschen, weniger stör anfällig zu sein und die Effizienz in der Produktion zu steigern (ebd., S. 23f.). Mit diesem sozio-technischen Ansatz, bei dem der Mensch eine zentrale Rolle spielt, unterscheidet sich Industrie 4.0 deutlich von dem Computer Integrated Manufacturing (CIM) Ansatz ab ca. 1985, bei dem man noch glaubte, dass die Technik den Menschen ersetzen könnte (Reinhart & Zühlke, 2017, S. XXXIII). In der 2015 erschienenen aktualisierten Fassung der Umsetzungsempfehlungen bezeichnen die Autoren den Menschen sogar als „Dirigent der Wertschöpfung“ (BITKOM e.V., et al., 2015, S. 48).

Nach außen verfügt die Smart Factory über Schnittstellen zu „Smart Mobility“, „Smart Logistics“, „Smart Buildings“ und „Smart Grids“ und ermöglicht dadurch neue Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodelle (Kagermann, et al., 2013, S. 23).

Innerhalb der Smart Factory werden „intelligente Produkte (Smart Products)“ (ebd., S. 25); (Kinkel, et al., 2016, S. 12); (Gorecky, et al., 2017, S. 558) hergestellt, die durch ihre virtuelle Identität jederzeit eindeutig identifizierbar und lokalisierbar sind. Durch das Wissen über ihren Herstellungsprozess sollen intelligente Produkte in bestimmten Branchen sogar in der Lage sein, ihren Weg durch die Produktion selbst zu steuern (Vogel-Heuser, 2014, S. 42); (Gorecky, et al., 2017, S. 558). Während ihres Lebenszyklus sammeln intelligente Produkte Informationen, die wiederum zur Optimierung genutzt werden können, aber auch für ergänzende Services, wie z.B. zur Wartung (Kinkel, et al., 2016, S. 12).

Für die Umsetzung von Industrie 4.0 beschreiben die Autoren in ihrer Umsetzungsempfehlung folgende vier Handlungsbereiche:

1. „Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke“ (Kagermann, et al., 2013, S. 35)

Das Ziel ist die bessere Vernetzung des Unternehmens mit seinen Geschäftspartnern in der Supply Chain, die sich durch die Integration der verschiedenen IT-Systeme der jeweiligen Prozessschritte sowie durch die Nutzung geeigneter Industrie 4.0 Technologien erreichen lässt (Kagermann, et al., 2013, S. 35); (Schuh, et al., 2017b, S. 18ff.).

2. „Digitale Durchgängigkeit des Engineerings über die gesamte Wertschöpfungskette“ (Kagermann, et al., 2013, S. 35f.)

Das Ziel ist die durchgängige digitale Abbildung des Produktlebenszyklus vom Produktdesign und der Produktentwicklung über die Produktionsplanung, das Produktionsengineering, die Produktion bis hin zu Services beim Kunden (Boos & Zancul, 2012, S. 336); (Kagermann, et al., 2013, S. 35f.); (Westkämper, 2013c, S. 12).

3. „Vertikale Integration und vernetzte Produktionssysteme“ (Kagermann, et al., 2013, S. 35f.)

Das Ziel ist zum einen die vertikale „Integration der verschiedenen IT-Systeme auf den unterschiedlichen Hierarchieebenen [...] zu einer durchgängigen Lösung“ (Kagermann, et al., 2013, S. 24); (Gorecky, et al., 2017, S. 564). Zum anderen geht es um die horizontale „Integration der verschiedenen IT-Systeme für die unterschiedlichen Prozessschritte der Produktion und Unternehmensplanung, zwischen denen ein Material-, Energie- und Informationsfluss verläuft, [...] zu einer durchgängigen Lösung“ (ebd.) sowie

um die horizontale Vernetzung modularer und rekonfigurierbarer Produktionssysteme (Kagermann, et al., 2013, S. 36). Schuh et al. (2017b, S. 18ff.) sehen dabei die vertikale Integration als Basis für die horizontale Vernetzung.

4. „Neue Geschäftsmodelle“ (Kagermann, et al., 2013, S. 26f.)

Das Ziel ist die Entwicklung neuer, datenbasierter Geschäftsmodelle auf Basis neuer Wertschöpfungsprozesse, anderer Rollenverteilungen in den Wertschöpfungsnetzwerken (BITKOM e.V., et al., 2015, S. 19). Dazu gehören Innovationen bisheriger Geschäftsmodelle (Kaufmann, 2015, S. 12) auf Basis intelligenter Produkte (Kinkel, et al., 2016, S. 25) oder auf Basis von Smart Services (Kinkel, et al., 2016, S. 12) sowie vollständig digitale Geschäftsmodelle (Sauer, et al., 2016, S. 22ff.) und digitale Plattformen (Bender, et al., 2020, S. 646).

Das dadurch insgesamt zu erwartende wirtschaftliche Potenzial ist sehr groß. In einer gemeinsamen Studie von BITKOM und Fraunhofer IAO (Bauer, et al., 2014, S. 6ff.) wurden die volkswirtschaftlichen Potenziale von Industrie 4.0 Technologien im verarbeitenden Gewerbe in Deutschland ermittelt. Bis 2025 wird demnach ein zusätzliches Wertschöpfungspotenzial von 78 Milliarden Euro (jährlich 1,7 Prozent Wachstum) erwartet. Die Experten der Unternehmensberatung Roland Berger sehen für Europa die Chance, dass der in den letzten Jahren auf durchschnittlich 15 Prozent gesunkenen Wertschöpfungsanteil der Industrie wieder auf 20 Prozent steigen könnte (Blanchet, et al., 2014, S. 3f.). Speziell Deutschland habe aufgrund seines schon jetzt relativ hohen Produktionsanteils an der Gesamtwirtschaft sowie seiner jetzt schon hohen „industrial excellence“ in Kombination mit seinem guten Wertschöpfungsnetzwerk („value network“) eine sehr gute Ausgangslage (vgl. ebd., S. 16).

Getrieben wird die Entwicklung in Richtung Industrie 4.0 durch aktuelle global-gesellschaftliche Megatrends, wie

- „Globalisierung“, „Volatilität“, „Urbanisierung“ und „Individualisierung“ (Reinhart & Zühlke, 2017, S. 60),
- „Durchdringung mit neuen Technologien“, „Dynamisierung der Produktlebenszyklen“, „Ressourcenverknappung“, „Lernende Gesellschaft/Wissensgesellschaft“, „Mobilität/Logistik“ und „Klimawandel/Energiewende“ (Spath, 2013, S. 18)
- „häufige Prozess- und Produktinnovationen“ und „Entwicklungen der Informations- und Kommunikationstechnologien“ (Bischoff, 2015, S. 46f.)
- „Nachhaltigkeit“ und „Alterung der Gesellschaft“ (Westkämper, 2013a, S. 8).

Bauernhansl (2014, S. 13f.) erwartet dadurch eine deutliche Zunahme der internen und äußeren Komplexität, der sich Unternehmen stellen müssen. So führt eine Individualisierung der Produkte beispielsweise zu einer Steigerung der Variantenvielfalt bei gleichzeitiger Verringerung der Stückzahlen je Variante. Damit steigt die Anzahl der Fertigungsaufträge, die täglich durch das Unternehmen gesteuert und produziert werden müssen. Hinzu kommt die Forderung des Markts nach immer kürzeren Lieferzeiten und einer jederzeitigen Lieferfähigkeit auch bei hohen Nachfrageschwankungen und fehlenden sicheren Prognosen. Bisherige Produktions-, Logistik- und Lagerstrategien müssen daher überdacht und an die neuen Rahmenbedingungen angepasst werden. Aber auch kürzer werdende Produktlebenszyklen, die ständige Anpassung der Prozesse an den technischen Fortschritt und die Einbindung der Beschäftigten in den Change Prozess stellen die Unternehmen vor große Herausforderungen. Um sich an die künftigen Umgebungsbedingungen besser anpassen zu können und um die Komplexität in Produktion und Logistik besser zu beherrschen, sollten Unternehmen ihre Wandlungsfähigkeit durch Prinzipien der Modularisierung und Selbstorganisation verbessern (Gronau, 2014b, S. 24). Der Informationsfluss, der die Warenbewegungen steuert, gewinnt dabei immer mehr an Bedeutung (Schlick, et al., 2014, S. 77). Unternehmen sollten jedoch nicht nur versuchen, die Auswirkungen der Megatrends zu kompensieren, sondern die zu erwartenden Veränderungen auch aktiv für neue Chancen nutzen (Westkämper, 2013a, S. 7).

Seit der Veröffentlichung der Industrie 4.0 Vision sowie der Handlungsempfehlungen auf der Plattform Industrie 4.0 im Jahr 2013 wurden überall vielfältige Industrie 4.0-Aktivitäten gestartet. Mit zahlreichen Forschungs- und Förderprogrammen, wie AiF, AUTONOMIK, IKT 2020, KMU innovativ, ZIM oder Mittelstand digital, werden seither sowohl die Grundlagenforschung als auch der prototypische Einsatz von Industrie 4.0-Lösungen in der Industrie gefördert (Bischoff, 2015, S. 209ff.). Darüber hinaus stehen EU-Förderprogramme zur Verfügung, wie beispielsweise das Programm Horizon 2020 (European Commission, 2021).

Praktisch alle Industrieverbände haben das Thema Industrie 4.0 in den Mittelpunkt ihrer Aktivitäten gestellt, arbeiten in Industrie 4.0-Gremien mit und unterstützen ihre Mitgliedsbetriebe mit branchenspezifischen Publikationen, Veranstaltungen, Beratung und sonstigen Hilfsmitteln bei der Einführung von Industrie 4.0 an. So bietet der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) seinen rund 3.300 mittelständischen Unternehmen beispielsweise einen speziellen Internetbereich zum Thema „Digitalisierung & Industrie 4.0“ (VDMA, 2021) bis hin zu einem „Werkzeugkasten Industrie 4.0“ in Form eines Leitfadens für die stufenweise, methodische Einführung von Industrie 4.0 (VDMA, 2017).

Neben Hochschulen, Forschungsinstituten und Verbänden bieten aber auch Lösungsanbieter (Hard- und Software) und Unternehmensberatungen mit Demonstratoren, Fachartikeln, White Paper, Best-Practice Beispielen und Veranstaltungen vielfältige Unterstützung bei der digitalen Transformation in Richtung Industrie 4.0 an (PwC, 2022); (Roland Berger, 2022).

Darüber hinaus stehen den Unternehmen zahlreiche Industrie 4.0 Modelle der verschiedensten Autoren zur Verfügung, an denen sie sich auf dem Weg zu Industrie 4.0 orientieren können. Die Bandbreite der verfügbaren Modelle ist groß. Sie reicht von Vorgehensmodellen (Terstegen, et al., 2019) über einfache Online-Selbstchecks bis hin zu mehrdimensionalen Reifegradmodellen (Hübner, 2017, S. 88ff.).

Die mediale Verbreitung des Wissens rund um Industrie 4.0 erfolgt neben dem Internet überwiegend in Form von Fachbüchern und Fachzeitschriften (Journals), von denen mehrere erst in den letzten Jahren mit dem Fokus auf Industrie 4.0 neu erschienen sind. Alleine in Google Scholar sind über 20.000 im Zeitraum von 2011 bis 2020 entstandene Beiträge zu „Industrie 4.0“ zu finden (Google Scholar, 2021).

1.2. Problemstellung und wissenschaftliche Motivation

Obwohl das Informationsangebot zu Industrie 4.0 riesig ist und obwohl es zahlreiche Industrie 4.0 Modelle gibt, zögern immer noch viele Unternehmen mit ihren Industrie 4.0 Aktivitäten. Eine in den Jahren 2015, 2017 und 2019 bei produzierenden Unternehmen durchgeführte Studie der Stufen AG (2019, S. 8) ergab den in Tabelle 1.1 dargestellten Status der Industrie 4.0 Aktivitäten.

	2015	2017	2019
Noch nicht mit I4.0 beschäftigt	19 %	8 %	9 %
Beobachtungs- und Analysephase	36 %	24 %	21 %
Anteil passiver Unternehmen	55%	32%	30 %
Planungs- und Testphase	5 %	14 %	11 %
Operative Einzelprojekte	31 %	41 %	48 %
Umfassende operative Umsetzung	4 %	7 %	8 %
Anteil aktiver Unternehmen	40 %	62 %	67 %
Keine Antwort	5 %	6 %	3 %

Tabelle 1.1 Status der Industrie 4.0 Aktivitäten (eigene Darstellung mit Zahlen aus Stufen AG, 2019)

Demnach hatten in 2015 erst 40 Prozent der Unternehmen konkrete Planungs- bzw. Umsetzungsaktivitäten. In 2017 stieg der Anteil der aktiven Unternehmen zwar auf 62 Prozent, erhöhte sich aber bis 2019 nur unwesentlich auf 67 Prozent. Aktuell haben 48 Prozent der Unternehmen operative Einzelprojekte durchgeführt, während eine umfassende Umsetzung von Industrie 4.0 Aktivitäten erst durch 8 Prozent der Unternehmen erfolgt. Andere Studien kommen zu vergleichbaren Ergebnissen. Laut der im VDE Trendreport 2015 veröffentlichten Umfrage des VDE haben sich erst 34 Prozent der befragten Unternehmen mit Industrie 4.0 befasst (VDE, 2015). Eine von Bitkom Research im Auftrag von Ernst & Young in 2016 durchgeführte Unternehmensbefragung ergab einen Anteil aktiver Unternehmen von 39 Prozent (2015) bzw. 41 Prozent (2016). Bei Unternehmen mit 100-499 Beschäftigten lag der Anteil aktiver Unternehmen bei 37 Prozent (2015) bzw. 38 Prozent (2016), während bei Unternehmen mit mehr als 500 Beschäftigten 54 Prozent (2015 und 2016) aktiv waren (EY, 2016, S. 12).

Kleinere und mittlere Unternehmen stellt die digitale Transformation offenbar vor größere Herausforderungen als größere Unternehmen. Zu diesem Ergebnis kommt auch die in 2015 durchgeführte AUTONOMIK Industrie 4.0 Studie (BMW, 2015, S. 35f.). Aufgrund ihrer volkswirtschaftlichen Bedeutung wäre es jedoch wichtig, dass insbesondere die kleineren und mittleren Unternehmen (KMU) sowie die mittelständischen Industriebetriebe (der „Mittelstand“) den Einstieg in Industrie 4.0 finden und ihre Wettbewerbsfähigkeit dadurch sichern bzw. sogar ausbauen. Die KMU mit ihren bis zu 500 Beschäftigten (Definition des IfM Bonn) hatten in 2018 einen Anteil von ca. 99,5 Prozent der insgesamt 707.252 deutschen Unternehmen im verarbeitenden Gewerbe und sind damit ein wichtiger Beschäftigungsmotor (IfM, 2021). Mittelständische Industriebetriebe können auch größer sein als KMU. Sie zeichnen sich jedoch dadurch aus, dass sie inhabergeführt sind, keinem Konzern angehören und überwiegend in Deutschland produzieren (Bischoff, 2015, S. 13). Laut Bischoff (ebd.) sind unter diesen Betrieben häufig auch bekannte und teilweise auch unbekannte Weltmarktführer (Hidden Champions) zu finden – wichtige Treiber für Deutschlands Wettbewerbsfähigkeit.

Um mögliche Ursachen für den zögerlichen Einstieg in Industrie 4.0 zu identifizieren, wurden im Rahmen dieser Arbeit insgesamt fünfzehn Studien im Zeitraum von 2014 bis 2019 ausgewertet, die Aussagen zu den häufigsten Hindernissen enthalten (vgl. Tabelle 1.2).

Jahr der Veröffentlichung	Studien und Marktumfragen zu Industrie 4.0 Hindernissen
2014	Industrie 4.0 Ready Services Technologietrends 2020, Fraunhofer IAO (Fraunhofer IAO, 2014, S. 28)
	Industrie 4.0 – Standortbestimmung der Automobil- und Fertigungsindustrie, MHP (Kelkar, et al., 2014, S. 25)
	Industrie 4.0 Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution, PwC (Koch, et al., 2014, S. 37)
2015	VDE-Trendreport 2015 Schwerpunkt Industrie 4.0, VDE (VDE, 2015, S. 14)
	Industrie 4.0 Studie im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0, BMWi (BMW, 2015, S. 37)
	Industrie 4.0 Readiness Studie, IMPULS-Stiftung des VDMA (Lichtblau, et al., 2015, S. 57)
2016	Deutscher Industrie 4.0 Index 2016, Staufen AG (Staufen AG, 2016, S. 25)
	Industrie 4.0: Status Quo und Perspektiven in Deutschland, Ernst & Young (EY, 2016, S. 17)
	Industrie 4.0: Entwicklungsfelder für den Mittelstand, Fraunhofer IPA (Fraunhofer IPA, 2016, S. 31)
	Industrie 4.0 – Wo steht die Revolution der Arbeitsgestaltung?, Fraunhofer IAO im Auftrag von ingenics (Schlund & Pokomi, 2016, S. 25)
2017	Wettbewerbsfaktor Analytics im Internet der Dinge, Hindernisse bei IoT-Projekten, Universität Potsdam in Zusammenarbeit mit SAS Institute GmbH (Gronau, et al., 2017, S. 28)
	Hindernisse der Industrie 4.0 – Umdenken notwendig? TU Darmstadt (Meißner, et al., 2017, S. 608)
2018	Industrie 4.0 für die Textil- und Bekleidungsindustrie, Universität Stuttgart (IDS) (von Wascinski, et al., 2018, S. 12)
2019	BME-Logistikumfrage Digitalisierung in Supply Chains, Bundesverband Materialwirtschaft, Einkauf und Logistik e.V. (BME e.V., 2019, S. 43)
	Deutscher Industrie 4.0 Index 2019, Staufen AG (Staufen AG, 2019, S. 22)

Tabelle 1.2 Übersicht über Studien und Marktumfragen zu Industrie 4.0 Hindernissen im Zeitraum von 2014 bis 2019

Bei der Auswertung wurde analysiert, wie häufig ein Hindernisgrund von den Studien genannt wurde („Anzahl Nennungen“) und an welcher Position (1-10) der häufigsten Hindernisgründe er durchschnittlich erschien („Durchschnittliches Ranking“). Daraus ergab sich das in Tabelle 1.3 dargestellte Gesamt-Ranking der häufigsten Hindernisse für den Einstieg in Industrie 4.0.

Demnach sind die drei am stärksten bewerteten Hindernisse für Industrie 4.0 das fehlende Wissen, der unklare Nutzen sowie die fehlenden Normen und Standards. Erst dann folgen Investitionskosten, Fragen der Sicherheit, etc..

Hindernisse für den Einstieg in Industrie 4.0	Anzahl Nennungen (A)	Durchschn. Ranking (B) (10 $\hat{=}$ Platz 1)	Gesamt-Ranking (AxB)
Fehlendes Wissen	14	8,3	116
Unklarer Nutzen	11	8,2	90
Fehlende Normen und Standards	10	8,1	81
Hohe Investitionskosten	10	7,3	73
IT- und Datensicherheit	11	6,5	72
Fehlende Strategie	8	6,9	55
Hohe Komplexität (Prozesse, Organisation)	6	7,0	42
Fehlende Technologien	5	6,6	33
Geringe Veränderungsbereitschaft bzw. fehlende Unternehmenskultur für I4.0	5	6,0	30
Fehlende Zeit bzw. Personalressourcen	3	10,0	30
Unzureichende IT-Infrastruktur	6	4,7	28
Keine bzw. unklare Markterfordernis	4	5,5	22
Rechtliche Unsicherheiten	4	4,8	19
Fehlende technische Voraussetzungen	2	8,0	16
Unklare Verantwortlichkeiten	2	8,0	16
Fehlende Kooperationspartner	2	5,5	11
Altersstruktur der Beschäftigten	1	5,0	5
Fehlende Forschung	1	2,0	2

Tabelle 1.3 Die häufigsten Hindernisse für den Einstieg in Industrie 4.0 (Ergebnis einer eigenen Auswertung von 15 Studien und Marktumfragen im Zeitraum von 2014 bis 2019)

Aufgrund des hohen volkswirtschaftlichen Potenzials einer erfolgreichen Transformation der produzierenden Unternehmen in Richtung Industrie 4.0 sollte daher dringend nach den Ursachen geforscht werden, die diesen Hindernissen zugrunde liegen. Dies gilt insbesondere für das

fehlende Wissen bei Personal und Führungskräften, das die Ursache für viele andere Hinderungsgründe sein kann, wie geringe Veränderungsbereitschaft, fehlende Strategie, unklarer Nutzen, hohe Komplexität, fehlende Zeit und falsche Einschätzung der Investitionskosten.

In diesem Zusammenhang besteht die Annahme, dass die Unternehmen bisher noch kein für ihren Betrieb geeignetes Industrie 4.0 Modell gefunden haben, das sie als Vorlage für eine schrittweise Transformation in Richtung Industrie 4.0 nutzen können. Bei allen bisher veröffentlichten Umfragen zu den Hindernissen von Industrie 4.0 wurde jedoch noch untersucht, inwiefern das Fehlen eines geeigneten Modells die Ursache für den zögerlichen Start von Industrie 4.0 Aktivitäten sein könnte. Die Unternehmen betonen zwar, dass „fehlende Standards“ für sie einer der wichtigsten Hinderungsgründe sei (Meißner, et al., 2017, S. 608), möglicherweise werden darunter aber auch geeignete standardisierte Industrie 4.0 Modelle verstanden und nicht nur technische Standards für Schnittstellen oder Datenformate. Insofern besteht hier eine Forschungslücke, die im Rahmen dieser Arbeit geschlossen werden soll.

Bei den Industrie 4.0 Modellen muss unterschieden werden zwischen Vorgehensmodellen und Reifegradmodellen. Vorgehensmodelle beschreiben einen allgemeinen, standardisierten und meist phasenweisen Projektablauf (Terstegen, et al., 2019, S. 3). Im Rahmen einer Vergleichsstudie von Vorgehensmodellen zur Einführung und Umsetzung von Digitalisierungsmaßnahmen in der produzierenden Industrie (ebd.) konnten die in Tabelle 1.4 dargestellten fünf typische Phasen der Vorgehensmodelle ermittelt werden.

Phase	Beschreibung
Informationsphase	Aufnahme des Ist-Zustands und Schaffung eines einheitlichen Verständnisses für die Digitalisierung und Industrie 4.0
Strategische Phase	Analyse des aktuellen Zustands (z.B. anhand von Reifegradmodellen)
Taktische Phase	Zielbestimmung und Maßnahmenableitung (z.B. anhand von Reifegradmodellen)
Operative Phase	Umsetzung der Maßnahmen
Controlling Phase	Überprüfung der Zielerreichung

Tabelle 1.4 Typische Phasen der Vorgehensmodelle (eigene Darstellung, inhaltlich in Anlehnung an Terstegen et al., 2019)

Damit sind Vorgehensmodelle nicht zur Ermittlung des Status Quo des Unternehmens geeignet. Auch Handlungsempfehlungen für die weitere digitale Transformation in Richtung Industrie 4.0 lassen sich aus ihnen nicht ableiten. Sie bieten lediglich einen methodischen Rahmen zur erfolgreichen Umsetzung von (Digitalisierungs-) Projekten.

Reifegradmodelle hingegen ermöglichen es, den Status Quo des eigenen Unternehmens anhand festgelegter Merkmale zu bestimmen und einen typischen, stufenweisen Entwicklungspfad aufzuzeigen (Knackstedt, et al., 2009, S. 535). Durch eine numerische Bewertung des Reifegrads lassen sich Reifegradindizes berechnen und damit der Reifefortschritt bewerten. Reifegradmodelle sind damit ein Werkzeug für die Unternehmensführung, mit dessen Hilfe nicht nur die notwendigen Veränderungen erkannt werden können, sondern auch der Transformationsprozess in Richtung Industrie 4.0 strukturiert begleitet werden kann (Berghaus & Back, 2016, S. 99f.).

Ursprünglich stammen Reifegradmodelle aus dem Bereich der Informationssysteme. Das Ende der 80er Jahre für Softwareentwicklungsprozesse entwickelte Capability Maturity Model (CMM) gilt als das wohl bekannteste Reifegradmodell und dient seither vielen anderen Modellen als Entwicklungsgrundlage (Knackstedt, et al., 2009, S. 536). Bisher wurden Reifegradmodelle jedoch meist für spezielle Anwendungsfälle entwickelt, sie waren daher eher eindimensional ausgelegt und bildeten entweder den Reifegrad von Prozessen/Strukturen, Objekten/Technologie oder Menschen/Kultur ab (Mettler, 2011, S. 83). Die Transformation von Unternehmen in Richtung Industrie 4.0 erfordert hingegen einen ganzheitlichen Ansatz, bei dem die drei sozio-technischen Dimensionen Mensch, Technik und Organisation (MTO) gleichermaßen berücksichtigt werden (Leineweber, et al., 2018, S. 24). Doch obwohl die meisten der bestehenden Industrie 4.0 Reifegradmodelle einen mehrdimensionalen Ansatz haben, fokussieren sie sich mehr auf die technischen Aspekte der Digitalisierung als auf Organisations- und Personalthemen (ebd. S. 21). Die sich im Hinblick auf die Einführung von Industrie 4.0 ergebenden Wechselbeziehungen zwischen den Dimensionen Mensch, Technik und Organisation scheinen bei den meisten der bestehenden Modelle sogar gänzlich unberücksichtigt zu sein, was jedoch im Rahmen dieser Arbeit näher untersucht werden soll. Bengler et al. (2017b, S. 54ff.) erwarten insbesondere im Bereich der Wechselbeziehungen die größten Veränderungen durch Industrie 4.0. Insofern wird neben der Betrachtung der Dimensionen Mensch (M), Technik (T) und Organisation (O) auch die Betrachtung der Schnittstellen Mensch-Technik (MT), Mensch-Organisation (MO) und Technik-Organisation (TO) als hochgradig relevant für ein Industrie 4.0 Reifegradmodell angesehen.

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass sich eine Vielzahl bestehender Industrie 4.0 Reifegradmodelle nicht an den eingangs genannten vier Handlungsbereichen „Vertikale Integration und vernetzte Produktionssysteme“, „Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke“, „Digitale Durchgängigkeit des Engineerings über die gesamte Wertschöpfungskette“ und „Neue Geschäftsmodelle“ orientiert, sondern stattdessen eigene Systematiken verwendet. Diese

bergen das Risiko, dass die vollumfängliche Abbildung des Industrie 4.0 Reifegrads nicht gegeben ist. Zudem erschweren abweichende Systematiken den Unternehmen möglicherweise das Verständnis der Zusammenhänge.

Aufgrund der oben beschriebenen Defizite bestehender Industrie 4.0 Reifegradmodelle gibt es derzeit auch noch keine aussagefähigen Industrie 4.0 Reifegradindizes, die den Reifegrad in den vier Handlungsbereichen sowie im Gesamten widerspiegeln würden. Ein solches Kennzahlensystem könnte Unternehmen jedoch bei der kontinuierlichen Transformation in Richtung Industrie 4.0 wirkungsvoll unterstützen. Die bekannten Methoden der kontinuierlichen Verbesserung, wie beispielsweise Zielvereinbarungen und Plan-Do-Check-Act (PDCA) Regelkreise (Schumacher, 2005, S. 39) könnten Anwendung finden, so dass die Steigerung des Industrie 4.0 Reifegrads zum gelebten Fabrikalltag würde.

Zusammenfassend konnten folgende Problemfelder identifiziert werden:

- Viele Unternehmen zögern immer noch mit ihren Industrie 4.0 Aktivitäten (kleine und mittlere Unternehmen mehr als große Unternehmen).
- Bestehende Reifegradmodelle fokussieren mehr auf die technischen Aspekte der Digitalisierung und vernachlässigen dadurch die vollumfängliche Abbildung der wichtigen Dimensionen Mensch, Technik, Organisation, Mensch-Technik, Mensch-Organisation und Technik-Organisation.
- Bestehende Industrie 4.0 Reifegradmodellen verwenden eigene Systematiken zur Bewertung der Industrie 4.0-Reife und nicht die oben dargestellten vier Handlungsbereiche „Vertikale Integration und vernetzte Produktionssysteme“, „Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke“, „Digitale Durchgängigkeit des Engineerings über die gesamte Wertschöpfungskette“ und „Neue Geschäftsmodelle“.
- Aufgrund der oben beschriebenen Defizite der Industrie 4.0 Reifegradmodelle kann es auch noch keine aussagefähigen Industrie 4.0 Reifegradindizes für produzierende Unternehmen geben.
- Es wird angenommen, dass das Fehlen eines für die digitale Transformation geeigneten Industrie 4.0 Reifegradmodells die Ursache für fehlendes Wissen und andere Hinderungsgründe sein könnte. Diese Frage wurde aber in vorangegangenen Arbeiten noch nicht untersucht.

1.3. Ziele und Forschungsfragen

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Industrie 4.0 Reifegradindex für produzierende Unternehmen (KMU und Mittelstand) mit einer mehrstufigen diskreten Fertigung. Der Index soll die Reife des Unternehmens mit Einzelindizes je Bewertungskategorie sowie mit einem Gesamtindex widerspiegeln. Dazu gehört die Entwicklung eines dem Index zugrunde liegenden Industrie 4.0 Reifegradmodells, das auf geeigneten bestehenden Modellen aufbaut, jedoch deren eventuell erkennbaren Defizite nach Möglichkeit vermeidet.

Mit der Entwicklung des Industrie 4.0 Reifegradindex sowie des dazugehörigen Reifegradmodells sollen KMU und Mittelstand befähigt werden, den Status Quo ihres Unternehmens auf dem Weg zu Industrie 4.0 zu bewerten und Maßnahmen für einen höheren Grad der Reife abzuleiten. Das mehrdimensionale Modell soll die Unternehmen dabei wie ein morphologischer Kasten bei der Visionsentwicklung („da wollen wir hin“), das heißt bei der Findung einer zu ihrem Unternehmen passenden optimalen „Zielkennlinie“ bezüglich der Reifegrade verschiedener Bewertungskategorien unterstützen. Der Reifegradindex dient dabei der Status Quo Ermittlung, der Zieldefinition, der Messung von Veränderungen sowie der Darstellung des Grads der Zielerreichung.

Darüber hinaus soll das Modell der Schulung von Führungskräften und Personal in den Unternehmen dienen, die dadurch ein einheitliches Verständnis für Industrie 4.0 sowie für den eigenen, unternehmensspezifischen Transformationsweg erhalten – ein wichtiger Erfolgsfaktor im Veränderungsprozess (Kotter, 1995, S. 61).

Die im Rahmen dieser Arbeit entstehende Systematik für ein Industrie 4.0 Reifegradmodell soll aber auch als wissenschaftliches Framework für darauf aufbauende Folgearbeiten dienen. So könnten beispielsweise in weiteren Arbeiten zusätzliche Bewertungsdimensionen ergänzt werden und Vorgehensmodelle zur Umsetzung der einzelnen Reifegradstufen bzw. zur Quantifizierung des Nutzens je Reifegradstufe entwickelt werden.

Aus der zuvor dargestellten Problemstellung sowie aus den Zielen dieser Arbeit wurden folgende Forschungsfragen abgeleitet:

F1: Wie gut eignen sich bestehende Industrie 4.0 Reifegradmodelle als Werkzeug für die digitale Transformation von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) sowie mittelständischen Unternehmen (Mittelstand) und welche eventuellen Defizite gibt es?

- F2: Wie gestaltet sich ein praxisnahes Industrie 4.0 Reifegradmodell für KMU und Mittelstand, das sowohl die vier Handlungsbereiche von Industrie 4.0 (Horizontale und vertikale Integration im Unternehmen / Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke / Intelligente Produkte und Abbildung des Produktlebenszyklus / Neue Geschäftsmodelle) umfasst, als auch die in einem sozio-technischen System wichtigen Dimensionen Mensch, Technik, Organisation (MTO) sowie deren Schnittstellen Mensch-Technik (MT), Mensch-Organisation (MO), Technik-Organisation (TO)?
- F3: Wie lassen sich Industrie 4.0 Reifegradindizes zur Bewertung der Gesamt-Industrie 4.0-Reife eines Unternehmens sowie der Reife je Handlungsbereich (Horizontale und vertikale Integration im Unternehmen / Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke / Intelligente Produkte und Abbildung des Produktlebenszyklus / Neue Geschäftsmodelle) definieren?

1.4. Methodisches Vorgehen und Aufbau der Arbeit

Die Entwicklung des Industrie 4.0 Reifegradindex sowie eines dem Index zugrunde liegenden Industrie 4.0 Reifegradmodells orientiert sich am Forschungsansatz des Design Science Research (DSR). DSR beschäftigt sich mit der Gestaltung neuer Artefakte in Form von Konstrukten, Modellen, Methoden und Implementierungen, die dabei helfen, gewünschte Ziele oder Problemlösungen zu erreichen (Hevner, et al., 2018, S. 8). Reifegradmodelle, die eine Lösung für das Problem der Standortbestimmung und der Weiterentwicklung bieten, werden als solche Artefakte angesehen (Mettler, 2011, S. 88). Insofern seien die Anforderungen an Design Science auch auf die Entwicklung von Reifegradmodellen anzuwenden (Knackstedt, et al., 2009, S. 536). Der Aufbau der Arbeit gliedert sich daher an dem Prozessmodell der Design Science Research Methodology (DSRM) nach Peffers et al. (Abbildung 1.1).

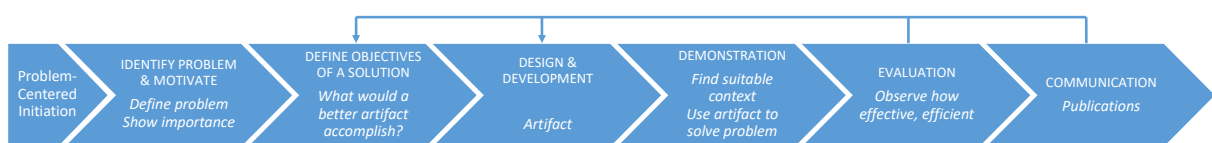


Abbildung 1.1 Prozessmodell der Design Science Research Methodology (DSRM) (eigene Darstellung in Anlehnung Peffers et al., 2007, S. 48)

Der allgemeine DSRM Prozess startet mit einer Beschreibung des spezifischen Forschungsproblems sowie der Motivation für die Findung einer geeigneten Problemlösung („Identify problem & motivate“). Im zweiten Schritt („Define objectives of a solution“) werden die Ziele der neuen Lösung definiert, bevor in Schritt drei („Design & Development“) die eigentliche

Lösung (das Artefakt) entwickelt wird. Die Schritte vier („Demonstration“) und fünf („Evaluation“) dienen der Anwendung und Evaluierung des Artefakts. Abschluss bildet die Veröffentlichung der Ergebnisse („Communication“). Je nach Ergebnis aus der Evaluierung und den Feedbacks aus Veröffentlichungen sind iterative Wiederholungen von Prozessschritten vorgesehen (vgl. Abbildung 1.1). Unter Berücksichtigung des oben beschriebenen DSRM Prozesses ergibt sich der in Abbildung 1.2 dargestellte Aufbau dieser Arbeit.

DSRM PROZESS	AUFBAU DER ARBEIT			
IDENTIFY PROBLEM & MOTIVATE <i>Define problem</i> <i>Show importance</i>	Kapitel 1 Einführung			
	1.1 Ausgangssituation	1.2 Problemstellung und wissenschaftliche Motivation	1.3 Ziele und Forschungsfragen	1.4 Methodisches Vorgehen und Aufbau der Arbeit
	Kapitel 2 Stand der Wissenschaft			
	2.1 Die Ausgangssituation produzierender Unternehmen	2.2 Industrie 4.0 – Technologie und Anwendung	2.3 Bewertung bestehender Industrie 4.0 Reifegradmodelle und -indizes	2.4 Marktstudie zur Nutzung von Industrie 4.0 Modellen
DEFINE OBJECTIVES OF A SOLUTION <i>What would a better artifact accomplish?</i>	2.5 Zusammenfassung			
	Kapitel 3 Anforderungen an Modelldesign und Reifegradindex			
	3.1 Allgemeine Anforderungen an Reifegradmodelle	3.2 Ziele und Anwendungsbereiche	3.3 Betrachtungsbereiche	
DESIGN & DEVELOPMENT <i>Artifact</i>	Kapitel 4 Design und Entwicklung eines Industrie 4.0 Reifegradindex			
	4.1 Allgemeines Modelldesign	4.2 Der Smart Factory Maturity Index (SFMI)	4.3 Der Smart Supply Chain Maturity Index (SFMI)	
	4.4 Der Smart Product & Life Cycle Maturity Index (PLCMI)	4.5 Der New Business Maturity Index (NBMI)	4.6 Der Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)	
	4.7 Praktische Anwendung des Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)			
DEMONSTRATION <i>Find suitable context</i> <i>Use artifact to solve problem</i>	Kapitel 5 Anwendung und Validierung des Industrie 4.0 Reifegradindex			
	5.1 Zielsetzung und Vorgehensweise	5.2 Das betrachtete Unternehmen	5.3 Testanwendung: Ermittlung des Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)	5.4 Zusammenfassung der Validierungsergebnisse
EVALUATION <i>Observe how effective, efficient</i>				
COMMUNICATION <i>Publications</i>	Kapitel 6 Zusammenfassung und Ausblick			
	Publikationen, Schulungen, Weiterentwicklung, etc. (nicht Gegenstand dieser Arbeit)			

Abbildung 1.2 Aufbau der Arbeit in Anlehnung an das DSRM Modell von Peffers et al. (2007, S. 48)

Die Kapitel 1 und 2 dienen der Problembeschreibung sowie der Darstellung der Dringlichkeit dieser Arbeit. In Kapitel 1 wird dazu im Rahmen einer Einführung zunächst die bisherige Entwicklung von Industrie 4.0 beschrieben, bevor die Problemstellung hergeleitet wird, konkrete Ziele und Forschungsfragen definiert werden und das methodische Vorgehen und der Aufbau der Arbeit vorgestellt werden. Kapitel 2 beschreibt den aktuellen Stand der Wissenschaft. Nach der Darstellung der Ausgangssituation produzierender Unternehmen mit den Besonderheiten von KMU und Mittelstand wird der aktuelle Stand von Industrie 4.0 hinsichtlich Technologie und Anwendung beschrieben, sozusagen als Benchmark („da könnten die Unternehmen stehen“). In der anschließenden Analyse und Bewertung bisheriger Industrie 4.0 Reifegradmodelle und -indizes wird deren Eignung als Transformationswerkzeug für KMU und Mittelstand untersucht und eventuelle Defizite aufgezeigt. Mit einer Umfrage zur Nutzung von Industrie 4.0 Modellen soll die Eignung bestehender Modelle aus Anwendersicht untersucht werden. Kapitel 2 schließt mit einer Zusammenfassung der insgesamt festgestellten Erkenntnisse.

In Kapitel 3 werden anhand der Ergebnisse aus den Kapiteln 1 und 2 die konkreten Ziele und Anforderungen an das Design eines neuen Industrie 4.0 Reifegradmodells mit Reifegradindex abgeleitet. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die anschließende Entwicklung des Modellartefakts.

Kapitel 4 beschreibt das Design und die Entwicklung des neuen Industrie 4.0 Reifegradmodells mit Reifegradindex. Ausgehend von allgemeinen Designüberlegungen werden zunächst sämtliche Bewertungsdimensionen definiert bevor der komplette Modellaufbau (Artefakt) sowie die darauf aufbauenden Reifegradindizes vorgestellt werden.

Kapitel 5 dient der Anwendung und Evaluation des neuen Reifegradmodells sowie der Reifegradindizes. Nach der Vorstellung von Zielsetzung und Vorgehensweise der Evaluation wird die Ermittlung der Reifegradindizes bei einem produzierenden Unternehmen anhand eines prototypischen, auf Basis des entwickelten Modells basierenden Fragebogens erprobt.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf die Verwertung der Ergebnisse und denkbare Folgeaktivitäten gegeben.

2. Stand der Wissenschaft

Zur Schaffung einer klaren konzeptionellen Basis für die anschließende Entwicklung eines Industrie 4.0 Reifegradindex werden in diesem Kapitel zunächst alle relevanten Grundlagen strukturiert und die eingangs beschriebene Problemstellung präzisiert.

Zu diesen Grundlagen gehört zunächst die in Abschnitt 2.1 beschriebene Ausgangssituation produzierender Unternehmen in Bezug auf ihre Unternehmensstruktur, ihre Produktions- und Informationssysteme sowie ihre besonderen Herausforderungen im Kontext von Industrie 4.0. Diese Ausgangssituation beschreibt den „Einstiegspunkt“ für den zu entwickelnden Reifegradindex. Abschnitt 2.2 beschreibt die Grundlagen von Industrie 4.0 hinsichtlich wichtiger Industrie 4.0 Technologien sowie deren Anwendung im Rahmen der digitalen Transformation. Es stellt damit die gesamte „Bandbreite der digitalen Transformation“ dar, die mit einem Reifegradindex abzubilden ist. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 2.3 bestehende Industrie 4.0 Reifegradmodelle untersucht und hinsichtlich ihrer inhaltlichen und funktionalen Ausrichtung bewertet. Damit liefert dieses Kapitel die „Defizite bestehender Modelle“ als Basis für das neu zu entwickelnde Artefakt. Abschließend werden in Abschnitt 2.4 die Ergebnisse einer Umfrage zur „Nutzung bestehender Industrie 4.0 Reifegradmodelle“ vorgestellt, um insbesondere auch die Anwendersicht im neu zu entwickelnden Modell berücksichtigen zu können.

2.1. Die Ausgangssituation produzierender Unternehmen

Als typisches produzierendes Unternehmen soll im Folgenden in Anlehnung an Bildstein und Seidelmann (2014, S. 582) ein Betrieb verstanden werden, die bereits seit mehreren Jahren existiert und daher über gewachsene Strukturen in Gebäuden, Produktionsanlagen, Geschäftsprozessen und IT-Systemen verfügt. Die über die Jahre gewachsenen technologischen und organisatorischen Anpassungen resultieren dabei aus dem Bestreben, den äußeren Anforderungen und Einflüssen zu entsprechen (ebd.). Westkämper (2006, S. 33) beschreibt produzierende Unternehmen als „soziale und technische Systeme“, in denen Menschen mit Maschinen und Werkzeugen aus einem Input durch Veredelung einen verkaufsfähigen Output in Form von Produkten oder Leistungen erzeugen. Die durch die Veredelung erzielte und monetär bewertbare Wertschöpfung sei die zentrale Aufgabe des Unternehmens.

2.1.1. Allgemeine Unternehmensstruktur

Zur Beschreibung der typischen Struktur produzierender Unternehmen gibt es in der Literatur zahlreiche Definitionen. Im Rahmen dieser Arbeit wird das „IFU-Referenzmodell für Fabrikbetrieb“ des Instituts für Fabrikbetriebslehre und Unternehmensforschung (IFU) der Technischen Universität Braunschweig (Dombrowski & Mielke, 2015a, S. 3) zugrunde gelegt. Durch den Fokus auf den Produktentstehungsprozess, den Auftragsabwicklungsprozess sowie wichtige Querschnittsfunktionen berücksichtigt es bereits den im Rahmen von Industrie 4.0 wichtigen Aspekt der Vernetzung zwischen diesen Bereichen.

Zudem umfasst das Modell alle an der Produktion beteiligten Teilprozesse aus Produktentstehung und Auftragsabwicklung. Diese sind neben der eigentlichen Fertigung auch Entwicklung/Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Produktionsplanung und Einkauf (vgl. Abbildung 2.1).

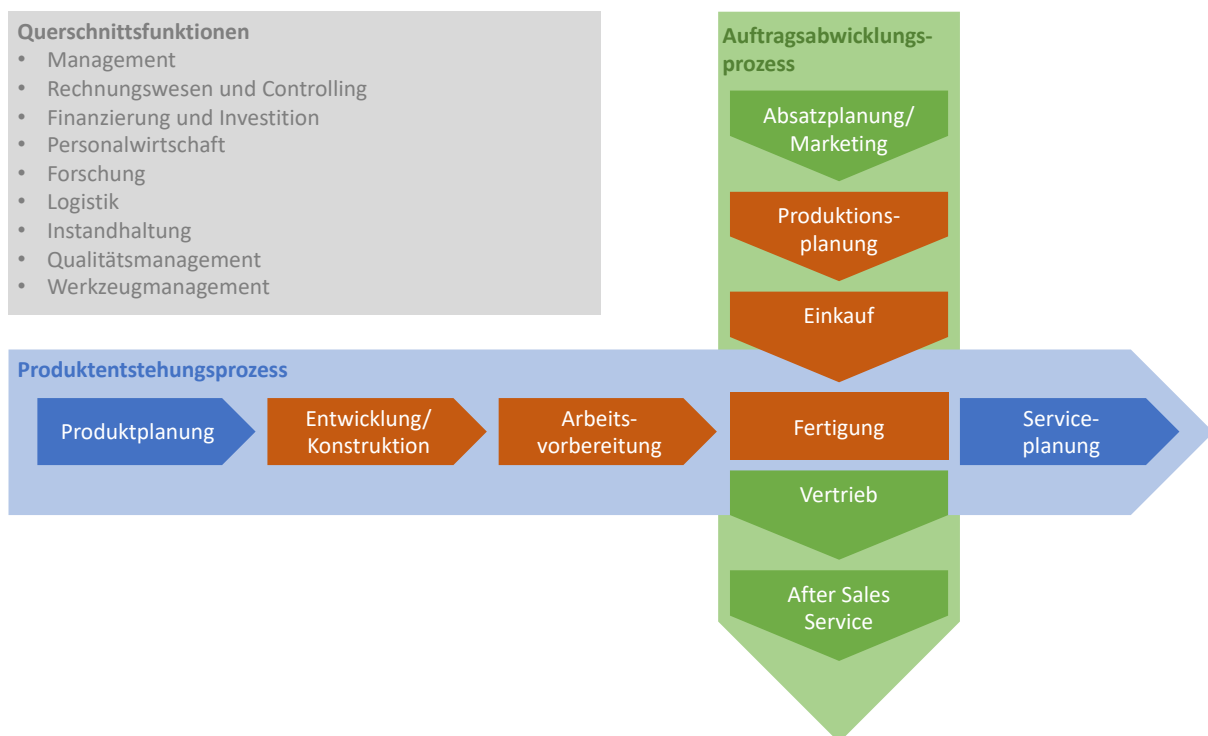


Abbildung 2.1 Fabrikmodell (eigene Darstellung in Anlehnung an das IFU-Referenzmodell für Fabrikbetrieb (Dombrowski & Mielke, 2015a, S. 3))

Als Querschnittsfunktionen des Fabrikbetriebs beschreibt das Modell die Funktionen Management, Rechnungswesen/Controlling, Finanzierung/Investition, Personalwirtschaft, Forschung und Logistik. Gegenüber der originalen Darstellung des IFU-Referenzmodells wurden in Abbildung 2.1 noch die Querschnittsfunktionen Instandhaltung, Qualitätsmanagement und Werkzeugmanagement ergänzt, da sie ebenfalls zu den wesentlichen Aufgaben im Fabrikbetrieb zählen (VDI, 2016).

2.1.2. Produktionssysteme

Zur wettbewerbsfähigen Herstellung ihrer Produkte haben Unternehmen individuelle, an ihre spezifischen Bedingungen angepasste Produktionssysteme entwickelt (Schumacher, et al., 2021, S. 11). Obwohl Produktionssysteme firmenspezifisch angepasst werden, entspricht ihr Aufbau einem gewissen Standard (Dombrowski, et al., 2015c, S. 26). In der VDI-Richtlinie 2870-1 werden ganzheitliche Produktionssysteme (GPS) definiert als ein „unternehmensspezifisches methodisches Regelwerk zur umfassenden und durchgängigen Gestaltung der Unternehmensprozesse“ (VDI, 2012). Hierzu gehören Elemente, wie die Unternehmensstrategie, Unternehmenswerte, Ziele, Kennzahlen, Gestaltungsprinzipien, Prozesse, Methoden und Werkzeuge (ebd.); (Gronau, 2014b, S. 23); (Schumacher, et al., 2021, S. 11). Die Handlungen erfolgen in einem Produktionssystem durch Menschen in Zusammenarbeit mit der Technik und unter den vorgegebenen organisatorischen Rahmenbedingungen (Müller & Riedel, 2014, S. 213). Damit bestehen Produktionssysteme aus technischen, organisatorischen und personellen Komponenten (Gronau, 2014a, S. 280). Gronau (ebd.) definiert diese Komponenten in Anlehnung an Kreimeier et al. (2013, S. 18) wie folgt (vgl. Tabelle 2.1): Zu den technischen Komponenten gehören die Fabrikhülle zusammen mit den Betriebs- und Prüfmitteln, Arbeitseinrichtungen, Transportmitteln und Lagermittel, aber auch die Automatisierungstechnik und Software. Zu den organisatorischen Komponenten zählen die Aufbauorganisation (Hierarchie) und Ablauforganisation (Prozesse) sowie die Methoden, Maßnahmen und Werkzeuge. Personelle Komponenten sind die Stelle selbst sowie das Wissen und die Erfahrung des Stelleninhabers.

Technik	Organisation	Mensch
Fabrikhülle/Raum	Aufbauorganisation	Stelle
Betriebs-/Prüfmittel	Ablauforganisation	Wissen/Erfahrung
Arbeitseinrichtung	Methode	
Transport-/Lagermittel	Maßnahme	
Automatisierungstechnik	Werkzeug	
Software		

Tabelle 2.1 Komponenten von Produktionssystemen (eigene Darstellung in Anlehnung an Gronau 2014a, S. 280)

Je nach Fertigungsprinzip besteht eine Produktion aus mehreren teilautonomen Systemen, die über Materialflüsse und manuelle oder digitale Informationsflüsse miteinander verknüpft sind (Westkämper, 2013b, S. 134). Westkämper (2006, S. 198) unterscheidet zwischen fünf grundsätzlichen Fertigungsprinzipien:

1. Die Baustellenfertigung, in der sich das zu produzierende Produkt während der Produktion nicht bewegt, weshalb alle benötigten Materialien und Ressourcen an den Produktionsort gebracht werden.
2. Das Werkstattprinzip, bei dem das Produkt während des Produktionsfortschritts mehrere Werkstätten (z.B. Stanzerei, Spritzgussabteilung, Montage) durchläuft.
3. Fertigungszellen, in denen die für eine Baugruppe benötigten Maschinen und Arbeitsplätze räumlich in einer Zelle angeordnet werden, um eine bessere Arbeitsteilung (z.B. Mehrmaschinenbedienung) zu erreichen.
4. Flexible Fertigungssysteme (Segmente) in denen die Maschinen und Arbeitsplätze häufiger Fertigungsabfolgen materialflusstechnisch miteinander verknüpft sind.
5. Das Fließprinzip, in dem die Produkte in einer Linie mit oder ohne feste Taktzeiten von einer Arbeitsstation zur nächsten bewegt werden.

Die Entscheidung für ein bestimmtes Fertigungsprinzip hängt von dem zu produzierenden Produktionsprogramm und damit von der Fertigungsart ab (vgl. Abbildung 2.2).

		Fertigungsprinzipien					
		Baustellenfertigung	Werkstättenprinzip	Fertigungszellen	Flexible Systeme	Fließprinzip ohne Takt	Fließprinzip getaktet
Fertigungsarten	Einmalfertigung	●	●				
	Wiederholfertigung	●	●	●			
	Variantenfertigung		●	●	●		
	Serienfertigung				●	●	●
	Massenfertigung					●	●

Abbildung 2.2 Abhängigkeit der Fertigungsprinzipien von Fertigungsarten (Westkämper, 2006, S. 198)

Für die Einmalfertigung eines Produkts sowie für gelegentliche Wiederholungen eignen sich eher die flexiblen Baustellen- oder Werkstattprinzipien unter Inkaufnahme geringerer Produktivität, längerer Durchlaufzeiten und eines höheren Steuerungs- und Planungsaufwands (Kletti & Schumacher, 2014, S. 87). Für die Massenherstellung gleichartiger Produkte bietet das Fließprinzip Vorteile in Form von höherer Effizienz, geringerer Durchlaufzeiten, geringerer Bestandshöhen sowie geringerer Steuerungs- und Planungsaufwände, jedoch unter Inkaufnahme einer geringeren Flexibilität (ebd., S. 88). Fertigungszellen und Flexible Fertigungssysteme

(segmentierte Fertigung) erlauben durch die Kombination von Werkstatt- und Fließprinzipien auch die Herstellung variantenreicher Massenartikel.

Um die Wettbewerbsfähigkeit ihres Produktionssystems zu steigern, verfolgten Unternehmen in den letzten Jahrzehnten vor allem die Strategie der Automatisierung von sich wiederholenden Aufgaben sowie die Einführung von Lean Production Prinzipien im Sinne des Toyota Produktionssystems (Spath, 2013, S. 17). Das Toyota Produktionssystem (TPS) wurde nach dem zweiten Weltkrieg von Taiichi Ohno, dem damaligen Produktionsleiter von Toyota, entwickelt, um innerhalb weniger Jahre Anschluss an die Produktivität der amerikanischen Automobilindustrie zu finden (Dombrowski & Mielke, 2015a, S. 16). Die von Toyota erzielten Produktivitätssteigerungen waren dabei so beeindruckend, dass das TPS heute immer noch vielen Unternehmen weltweit als Vorlage dient (ebd.) und „eine elementare Basis für effizienten, konkurrenzfähigen und modernen“ Materialfluss darstellt (Dickmann, 2015, S. 4). Das TPS basiert auf dem Prinzip Lean Production, bei dem die Produktionsprozesse auf den Kunden ausgerichtet, die Auftragsdurchlaufzeiten reduziert und gleichzeitig Verschwendungen vermieden werden (Reinhart & Zühlke, 2017, S. XXXIII). Als Verschwendungen sieht Taiichi Ohno folgende sieben Verschwendungsarten (Ohno, 1993, S. 46):

1. Überproduktion
2. Wartezeiten
3. Transport
4. Verschwendungen bei der Bearbeitung selbst
5. Lager/Bestände
6. Überflüssige Bewegungen
7. Defekte Produkte

Basierend auf dem Ansatz des TPS sowie den Lean Production Prinzipien entwickeln Unternehmen seither ihre eigenen Produktionssysteme weiter und ergänzen ihre „Werkzeugkästen“ um weitere Ansätze und Methoden (Friedli & Schuh, 2012, S. 50). Dabei orientieren sie sich an Gestaltungsrichtlinien, wie z.B.

- die in der VDI-Richtlinie 2870-1 beschriebenen Gestaltungsprinzipien ganzheitlicher Produktionssysteme (VDI, 2012)
- die Leitlinien zur Gestaltung flexibler Produktionssysteme (von Garrel, et al., 2014, S. 86-90)
- die Methode der Wertstromoptimierung mit ihren Gestaltungsprinzipien (Erlach, 2010, S. 143ff.)

- die Ansätze aus dem Gedankengut der operativen Exzellenz (Friedli & Schuh, 2012, S. 139ff.).

Die Gestaltungsprinzipien ganzheitlicher Produktionssysteme gemäß VDI-Richtlinie 2870-1 sind in Tabelle 2.2 dargestellt. Neben der Vermeidung von Verschwendung liegt der Fokus auf der Stabilisierung und Standardisierung von Prozessen sowie deren kontinuierliche Verbesserung. Der Materialfluss sollte nach dem Pull-Prinzip durch den Kunden gesteuert werden und möglichst nach dem Fließprinzip (vgl. Abbildung 2.2) organisiert sein. Ein weiterer Fokus liegt auf der zielorientierten Mitarbeiterführung sowie dem visuellen Management, bei dem Probleme deutlich visualisiert werden, um schnell deren dauerhafte Beseitigung herbeiführen zu können.

Nr.	Gestaltungsprinzipien Ganzheitlicher Produktionssysteme	Beschreibung
1	Vermeidung von Verschwendung	<ul style="list-style-type: none"> • Fokussierung auf Wertschöpfung
2	Kontinuierliche Verbesserung	<ul style="list-style-type: none"> • Streben nach Perfektion • Ständiges Hinterfragen
3	Standardisierung	<ul style="list-style-type: none"> • Stabile, planbare Prozesse • Standardisiertes Arbeiten
4	Null-Fehler-Prinzip	<ul style="list-style-type: none"> • Qualität wird erzeugt, nicht „erprüft“ • Fehlervermeidung
5	Fließprinzip	<ul style="list-style-type: none"> • Schneller, durchgängiger und turbulenzarmer Fluss von Materialien und Informationen
6	Pull-Prinzip	<ul style="list-style-type: none"> • Nachfrageorientierte Bearbeitung • Der Kunde erteilt die Auftragsfreigabe
7	Zielorientierte Mitarbeiterführung	<ul style="list-style-type: none"> • Kultur der Fehler- und Verschwendungsvermeidung
8	Visuelles Management	<ul style="list-style-type: none"> • Sichtbarmachen von Problemen

Tabelle 2.2 Gestaltungsprinzipien ganzheitlicher Produktionssysteme (eigene Darstellung in Anlehnung an VDI 2870-1 und Dombrowski & Mielke, 2015, S.5)

Zur Gestaltung besonders flexibler Produktionssysteme beschreiben von Garrel et al. (2014, S. 88) die in Tabelle 2.3 dargestellten Leitlinien. Dabei sehen sie das Produktionssystem als ein soziotechnisches System, in dem die Flexibilität durch Menschen, Produkte, Organisation, Prozesse und auch Betriebsmittel gesteigert werden kann.

Mensch	Produkte	Organisation	Prozesse	Betriebsmittel
Flexibler Personaleinsatz	Hohe Teileverfügbarkeit	Schlanke Organisationsstruktur	Geringe Durchlauf- und Rüstzeiten	Optimale Auslastung der Anlagen
Flexible Arbeitszeiten	Keine Verschwendung	Planungsgenauigkeit	Standardisierung	Flexibilität der Anlagen
Individuelle Arbeitszeiten	Variantenbildung möglichst spät	Geringe Wiederbeschaffungszeit	Transparenz	Kostenreduktion
Engagement	Geringe Lagerbestände	Geringe Lieferzeit		
	Geringer Ausschuss	Minimale Kapitalbindung		
	Hohe Qualität	Termintreue		

Tabelle 2.3 Leitlinien zur Gestaltung flexibler Produktionssysteme (von Garrel, et al., 2014, S. 88)

Die Methode der Wertstromoptimierung wurde zunächst ebenfalls von Toyota im Rahmen der Entwicklung des eigenen Produktionssystems entwickelt, sie findet heute jedoch praktisch in allen Branchen mit Stückgutproduktionen Anwendung (Erlach, 2010, S. 2). Der Kernansatz dieser Methode liegt in der Betrachtung und Optimierung des gesamten Zusammenspiels aller Prozessschritte während des Auftragsdurchlaufs (ebd., S. 31). Tabelle 2.4 zeigt zusammenfassend die fünf Gestaltungsprinzipien der Wertstrommethodik nach Erlach (ebd., S. 143ff.). Die Basis dieser Methode ist die Anpassung des Produktionstakts an den Kundentakt, d.h. an die durchschnittlich zu liefernde Stückzahl/Zeit, um unnötige Bestandspuffer zu vermeiden und um damit die Durchlaufzeiten zu verkürzen, die beide als Verschwendung zu betrachten sind (s.o.). Darauf aufbauend sieht die Wertstrommethodik die Realisierung einer Fließfertigung vor, in der die Produkte nach dem FIFO-Prinzip (First-In-First-Out) von Prozessschritt zu Prozessschritt fließen. Nur dort, wo längere Rüstzeiten oder stark abweichende Bearbeitungszeiten den Fluss behindern, ist eine Entkopplung der Teilwertströme über Kanban-Supermärkte vorzusehen. Darüber hinaus sieht die Wertstrommethode vor, dass jeder Wertstrom nur an einem einzigen Schrittmacherprozess im Kundentakt gesteuert wird.

Nr.	Gestaltungsprinzipien Wertstromoptimierung	Beschreibung
1	Ausrichtung am Kundentakt	<ul style="list-style-type: none"> Das Kapazitätsangebot einer Produktion ist durchgängig am Kundentakt auszurichten.
2	Prozessintegration	<ul style="list-style-type: none"> Produktionsprozesse sind soweit möglich in einem integrierten Produktionsprozess oder in einer kontinuierlichen Fließfertigung zusammenzufassen.
3	FIFO-Verkopplung	<ul style="list-style-type: none"> Aufeinanderfolgende Produktionsprozesse, die aus technologischen oder organisatorischen Gründen nicht zur Fließfertigung integriert werden können, sind soweit möglich in einer Reihenfertigung mit Bestandsobergrenze zu verkoppeln.
4	Kanban-Regelung	<ul style="list-style-type: none"> Produktionsprozesse, die aus technologischen Gründen Rüstzeiten aufweisen, sind bei Wiederholteilen über eine Losfertigung mit Supermarkt-Lägern zu verknüpfen.
5	Schrittmacher-Prozess	<ul style="list-style-type: none"> Jeder Wertstrom ist an genau einem, eindeutig festgelegten Schrittmacher-Prozess im Kundentakt zu steuern.

Tabelle 2.4 Gestaltungsprinzipien der Wertstromoptimierung (eigene Darstellung in Anlehnung an Er-lach, 2010, S. 143ff.)

Während bei einer klassischen Werkstattfertigung jeder Prozessschritt einzeln geplant und gesteuert werden muss, reduziert sich der Planungs- und Steuerungsaufwand bei einer wertstromoptimierten Fertigung aufgrund des FIFO-Fließprinzips, der selbststeuernden Kanban-Regelkreise sowie der Einsteuerung von Aufträgen nur am Schrittmacherprozess. Durch den reduzierten Planungs- und Steuerungsaufwand reduzieren sich wiederum auch die entsprechenden Anforderungen an Softwarefunktionalitäten zur Produktionsplanung und -steuerung (Kletti & Schumacher, 2014, S. 90). Im Umkehrschluss reduziert sich der Digitalisierungsaufwand für die Produktionsplanung und -steuerung mit zunehmender Wertstromoptimierung.

Weitere Ansätze und Methoden zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von Produktionssystemen werden heute unter dem Begriff „Operative Exzellenz“ beschrieben (s.o.). Das St. Gallener „Operational Excellence Modell“ (Friedli & Schuh, 2012, S. 142f.) beschreibt Total Productive Maintenance (TPM), Total Quality Management (TQM), Just-In-Time (JIT), effektives

Managementsystem (EMS) sowie Standardisierung und visuelles Management als Prinzipien der operativen Exzellenz (vgl. Abbildung 2.3).

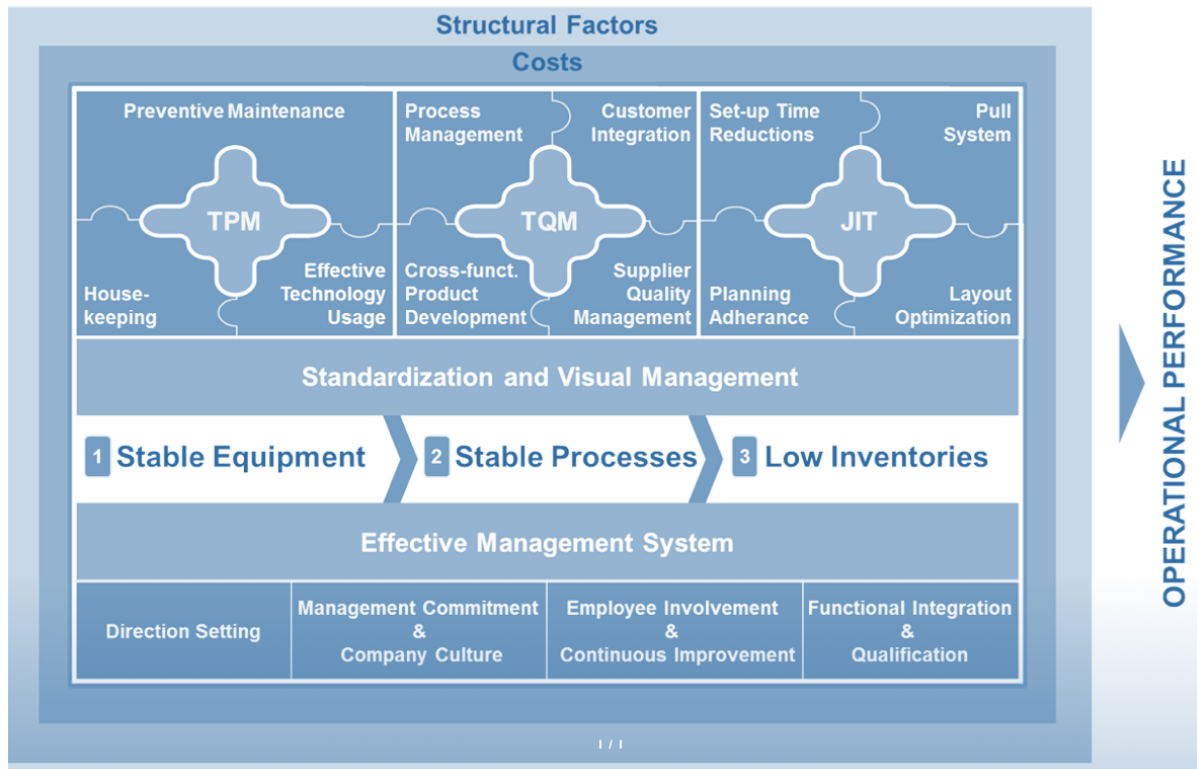


Abbildung 2.3 St. Gallener "Operational Excellence Model" (Universität S. Gallen, 2021)

Das Modell ist phasenorientiert und sieht in Phase 1 zunächst eine Stabilisierung der Anlagenverfügbarkeit mit TPM-Methoden vor, um die Voraussetzungen für stabile Produktionsprozesse zu schaffen. In Phase 2 liegt der Fokus auf der Stabilisierung von Prozessen durch TQM-Methoden während in Phase 3 der Fokus auf der Bestandsreduzierung durch JIT-Methoden liegt (Friedli & Schuh, 2012, S. 143); (Universität S. Gallen, 2021).

2.1.3. Informationssysteme

Praktisch alle produzierenden Unternehmen setzen heute zur Unterstützung ihrer Geschäftsprozesse ein Enterprise Resource Planning System (ERP-System) ein (Niehues, et al., 2017, S. 137). Der Ursprung von ERP-Systemen geht auf das Material Requirements Planning (MRP) zurück, als bei vorgegebenen Produktionsprogrammen die Primär- und Sekundärbedarfe an Materialien durch Auflösung der einzelnen Stücklistenpositionen eines Artikels ermittelt wurden (ebd.). Heute haben ERP-Systeme einen erheblich erweiterten Aufgaben- und Einsatzbereich (vgl. Abbildung 2.4), so dass mit Management, Vertrieb, Einkauf, Produktionsplanung,

Disposition, Produktion, Instandhaltung, Qualitätsmanagement, Rechnungswesen, Finanzbuchhaltung und Personalwesen fast alle Abteilungen eines Unternehmens Funktionalitäten eines ERP-Systems nutzen (Kletti & Schumacher, 2014, S. 13).

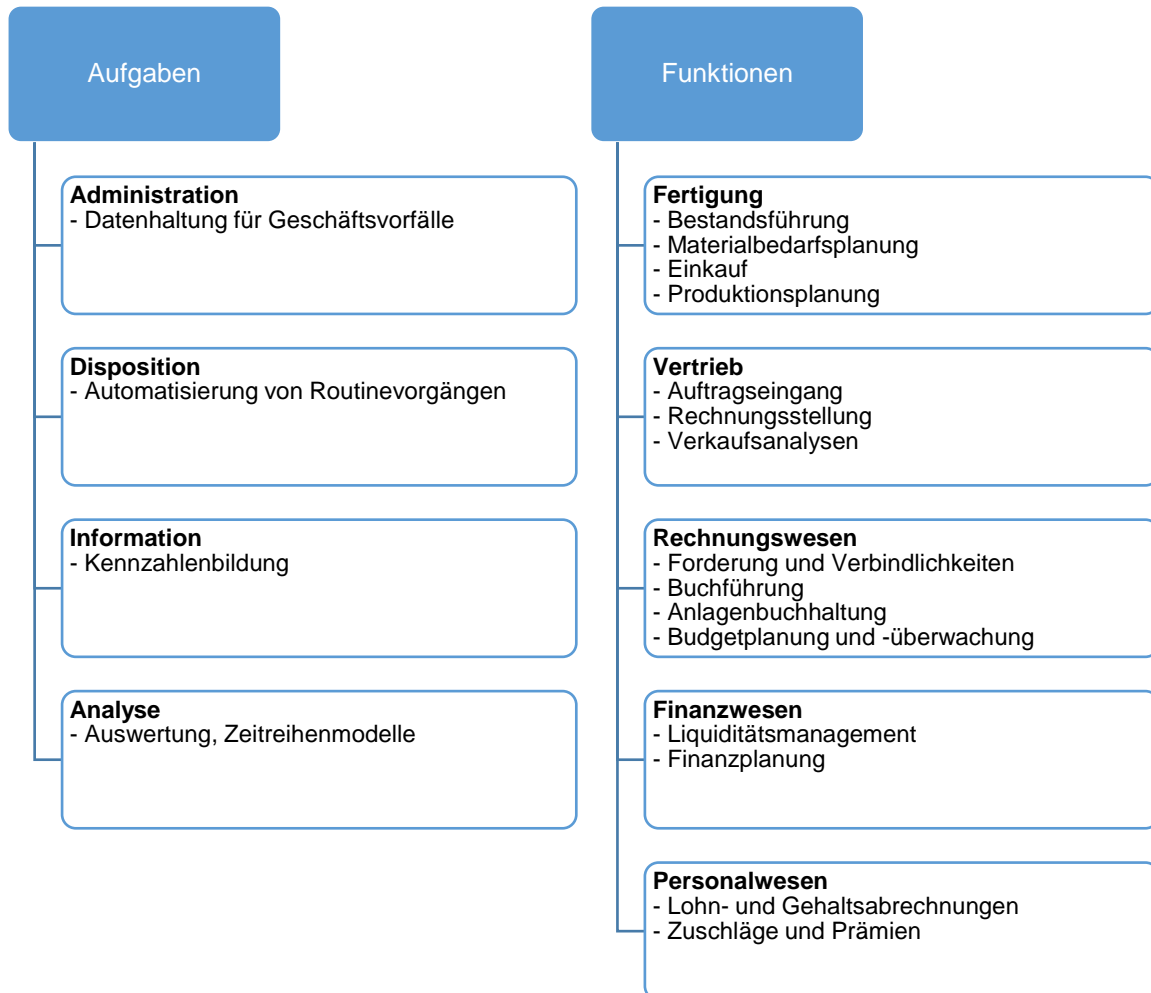


Abbildung 2.4 Aufgaben und Funktionen von ERP-Systemen (Gronau, 2021)

Ein wesentliches Merkmal von ERP-Systemen ist dabei die Integration dieser Aufgaben und Funktionen sowie deren zugrunde liegenden Daten in einem integrierten Informationssystem (Gronau, 2021). Durch die zentrale Datenspeicherung wird eine doppelte, redundante Speicherung der Daten vermieden und die Aktualität der Daten bei Zugriffen aus den verschiedenen Unternehmensbereichen sichergestellt (Niehues, et al., 2017, S. 137).

Mit dem Ziel, die Prozessketten von der Produktionsplanung bis zur automatisierten Fertigung mit denen des Produktentwicklungsprozesses zu verbinden und das Gesamtsystem vollautomatisiert zu steuern, verfolgten Unternehmen in den 80er Jahren zunächst den Computer Integrated Manufacturing (CIM) Ansatz, dessen vollständige Umsetzung jedoch aufgrund der hohen Komplexität des Themas scheiterte (Jacobi, 2013, S. 82-83). Eine ergänzende Darstellung des CIM-Ansatzes erfolgt in Abschnitt 2.2.2.

Unternehmen verfolgten in der Folge stattdessen das Ziel, ihre Prozesse zwischen ERP-System und Fertigung mit Hilfe ergänzender, spezialisierter Systeme, wie z.B. Feinplanung, Maschinendatenerfassung (MDE), Betriebsdatenerfassung (BDE), Computer Aided Quality (CAQ), Personalmanagement und Management von Fertigungshilfsmitteln zu unterstützen (Kletti, 2006, S. 21); (Peschke & Eckardt, 2019, S. 7). Diese Insellösungen erfüllen zwar ihre Aufgabe, lassen sich jedoch nur schwer und kostenintensiv in die gesamte IT-Architektur integrieren (Bildstein & Seidelmann, 2014, S. 584); (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 9). Insbesondere bei mehreren Werken kann dies zu einer sehr heterogenen und kostenintensiven IT-Landschaft führen (ebd.); (Himstedt, 2020, S. 16).

Aus dem Bedarf an durchgängigen Prozessen zwischen der Unternehmensleitebene und der Steuerungsebene auf dem Shopfloor entwickelte sich das Modell der Automatisierungspyramide als Standard für die Vernetzung der produktionsrelevanten IT im Unternehmen (Bildstein & Seidelmann, 2014, S. 584f.). Die Automatisierungspyramide sieht eine Unterteilung der notwendigen Prozesse in den Bereichen Datenerfassung und -verarbeitung auf verschiedenen hierarchisch geordneten Ebenen vor, wodurch sich die Komplexität insgesamt verringern lässt (Siepmann, 2016, S. 49). Abbildung 2.5 zeigt ein vereinfachtes Modell der Automatisierungspyramide in Anlehnung an Siepmann (ebd.).

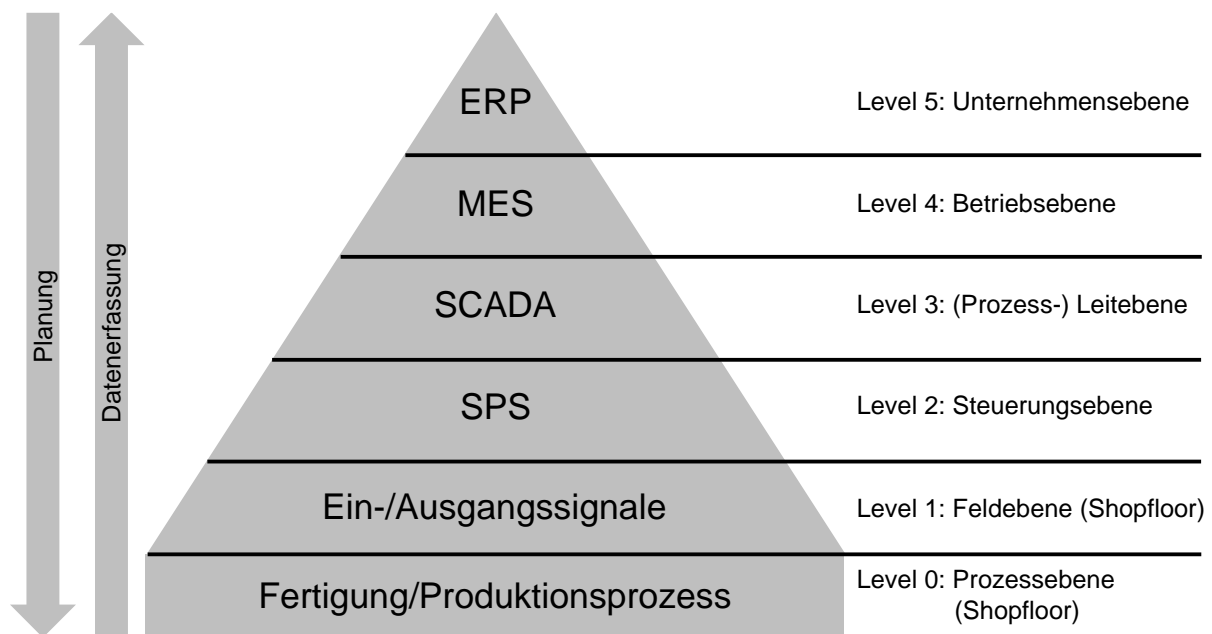


Abbildung 2.5 Automatisierungspyramide (eigene Darstellung in Anlehnung an Siepmann, 2016, S. 49)

Das Zusammenspiel der einzelnen Ebenen lässt sich in Anlehnung an Siepmann (2016, S. 49f.), Kletti & Schumacher (2014, S. 120f.) und Lass (2018, S. 37) wie folgt beschreiben:

Level 5: Unternehmensebene

Auf Basis der im ERP-System erfassten Kundenbedarfe erfolgt üblicherweise täglich rollierend die Grobplanung der Produktion auf Kalenderwochen sowie die tägliche Erzeugung entsprechender Fertigungsaufträge.

Level 4: Betriebsebene

Die im ERP-System freigegebenen Fertigungsaufträge (häufig ein Wochenvorrat) werden über eine Schnittstelle an ein Manufacturing Execution System (MES) übergeben, das als Bindeglied zwischen ERP-System und Maschinensteuerung im Wesentlichen zuständig ist für die kontinuierliche Produktionsfeinplanung, die Datenerfassung und -analyse sowie die Rückmeldungen an das ERP-System.

Level 3: (Prozess-)Leitebene

Die Leitebene mit ihren SCADA-Systemen dient als Mensch-Maschine-Schnittstelle der Bedienung der Maschinen- und Anlagensteuerungen sowie der Visualisierung produktionsrelevanter Vorgänge.

Level 2: Steuerungsebene

Auf der Steuerungsebene erfolgt die Steuerung der Maschinen und Anlagen durch NC-Programme, die in einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) laufen. Die SPS verarbeitet Signale aus der Sensorik und steuert entsprechend der Programmvorgaben die Aktoren der Maschinen und Anlagen.

Level 1: Feldebene (Shopfloor)

Auf der Feldebene, die sich direkt im Produktionsprozess auf dem Shopfloor befindet, werden aus dem Produktionsprozess heraus durch entsprechende Sensoren Daten erzeugt. Aktoren greifen steuernd in den Produktionsprozess ein.

Level 0: Prozessebene (Shopfloor)

Die Prozessebene steht für den eigentlichen Produktionsprozess mit seinen Arbeitsplätzen, Maschinen und Anlagen sowie der entsprechenden Intralogistik.

Weitere Ausführungen zur Automatisierungspyramide sowie insbesondere deren Einordnung in den Kontext Industrie 4.0 folgen in Abschnitt 2.2.2.

Nachdem sich die oben beschriebenen Insellösungen für spezifische Aufgaben, wie Datenerfassung, Feinplanung oder Qualitätssicherung, aufgrund der schlechten Integrierbarkeit in die

gesamte Produktions-IT nicht durchsetzen konnten, entstanden die in der Automatisierungspyramide beschriebenen Manufacturing Execution Systeme (MES). Sie verstehen sich als prozessorientierte, modular aufgebaute, aber datentechnisch integrierte Systeme (Kletti, 2006, S. 123ff.); (Reinhart & Niehues, 2017, S. 137f.). In der VDI Richtlinie 5600-1 (VDI, 2016) werden zehn typische Aufgaben von MES beschrieben (Abbildung 2.6).

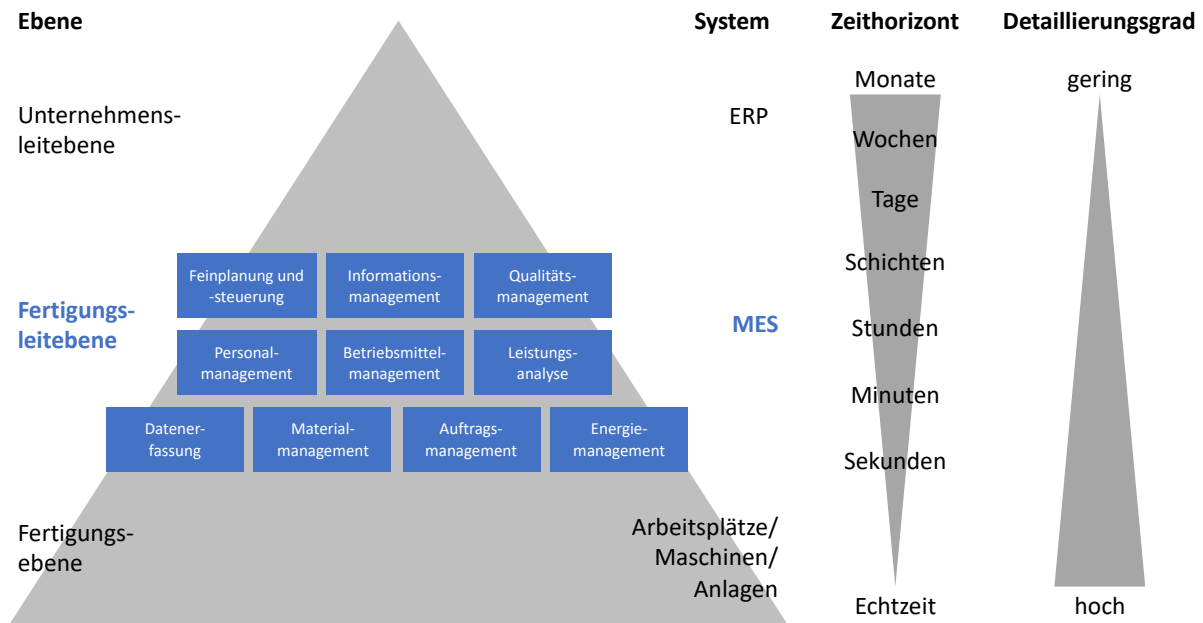


Abbildung 2.6 Einordnung von MES in den Leitebenen eines Unternehmens (eigene Darstellung in Anlehnung an VDI 5600-1 und (Kletti & Schumacher, 2014, S. 13)

Die Beschreibung der einzelnen Aufgaben kann in Anlehnung an VDI 5600-1 (2016, S. 16ff.) und Kletti & Deisenroth (2021, S. 67ff.) wie folgt zusammengefasst werden:

1. Auftragsmanagement

Die Auftragsverwaltung dient der Übernahme und Verwaltung der Fertigungsaufträge aus dem ERP-System, der systeminternen Weiterleitung an andere MES-Aufgaben, wie z.B. Feinplanung, sowie der Rückmeldung auftragsbezogener Daten an das übergeordnete ERP-System.

2. Feinplanung und -steuerung

In der Feinplanung und -steuerung werden die Fertigungsaufträge manuell oder automatisiert auf die entsprechenden Arbeitsplätze bzw. Maschinen eingeplant. Durch die Vernetzung dieser Aufgabe mit der Aufgabe Datenerfassung erfolgt die Feinplanung in Echtzeit und unter Kenntnis aktueller Betriebsmittelstatus und Auftragsfortschritte. Durch die Vernetzung mit der Aufgabe Betriebsmittelmanagement wird der jeweilige Status (z.B. Reparatur) der Betriebsmittel bei der Planung berücksichtigt.

3. Betriebsmittelmanagement

Die MES-Aufgabe Betriebsmittelmanagement dient der Verwaltung und Instandhaltung beliebiger Betriebsmittel, wie Maschinen und Anlagen aber auch Werkzeuge und Vorrichtungen. Hierzu dienen Funktionen der vorbeugenden oder vorausschauenden Instandhaltung (Predictive Maintenance). Die dabei erforderlichen Einsatzzeiten erhält das Betriebsmittelmanagement durch die Vernetzung mit der Aufgabe Datenerfassung. Der jeweilige Status der Betriebsmittel (z.B. Reparatur) wird durch die Vernetzung bei der Aufgabe Feinplanung und -steuerung berücksichtigt.

4. Materialmanagement

Zur Aufgabe des Materialmanagements gehören die Verwaltung der Umlaufbestände, die Materialverfolgung (Tracking & Tracing) sowie die Steuerung des innerbetrieblichen Materialtransports. Durch die Vernetzung mit der Aufgabe Datenerfassung lassen sich bei fertig gemeldeten Aufträgen beispielsweise automatische Transportaufträge für die Logistik generieren.

5. Personalmanagement

Im Bereich Personalmanagement bieten MES Funktionalitäten zur Personalverwaltung, Personalzeiterfassung (PZE), Personaleinsatzplanung bis hin zur Leistungslohnberechnung anhand der erfassten Daten.

6. Datenerfassung

Unter den Begriff Datenerfassung gehören die Betriebsdatenerfassung (BDE), bei der Mengen und Zeiten erfasst werden, die Maschinendatenerfassung (MDE), bei der Maschinentakte und Maschinenstatus erfasst werden sowie die Erfassung von Prozessdaten, wie Druck oder Temperatur. Durch die Vernetzung sind die Daten für alle anderen MES Aufgaben verfügbar.

7. Leistungsanalyse

Im Bereich Leistungsanalyse bieten MES vielfältige Funktionalitäten zur Analyse der Daten aus allen anderen Aufgabenbereichen.

8. Qualitätsmanagement

Das Qualitätsmanagement dient sowohl der Prüfplanung, als auch der Erfassung und Auswertung qualitätsbezogener Daten.

9. Informationsmanagement

Das Informationsmanagement dient der anwendergerechten Bereitstellung relevanter und kontextbezogener Informationen auf beliebigen digitalen Medien, wie Bedienerterminals, Tablets oder Smartphones.

10. Energiemanagement

Das Energiemanagement dient einerseits der Verwaltung und Erfassung aller Energieverbräuche, ermöglicht durch die Vernetzung aber auch die Zuordnung von Energieverbräuchen zu Betriebsmitteln oder produzierten Artikeln und schafft damit die Voraussetzungen für ein Energiemanagementsystem nach ISO 50001.

Während der zeitliche Fokus der ERP-Systeme von einzelnen Tagen über Wochen bis hin zu Monaten reicht, betrachten MES den Bereich von Echtzeit bis hin zu Schichten und Tagen. Gleichzeitig ist der Detaillierungsgrad der erfassten Daten auf der MES-Ebene deutlich höher, als auf der ERP-Ebene, da MES nur verdichtete Rückmeldungen an das ERP-System melden und nicht jeden einzelnen Maschinentakt oder jede Störung (vgl. Abbildung 2.6). Durch den kürzeren Zeithorizont in Kombination mit dem höheren Informationsgehalt haben MES gegenüber ERP-Systemen deutliche Vorteile hinsichtlich Transparenz und Reaktionsfähigkeit in der Fertigung (Kletti & Schumacher, 2014, S. 27).

Mit der Einführung eines Manufacturing Execution Systems (MES) zwischen ERP-System und Fertigungsebene verfolgen Unternehmen daher insbesondere das Ziel, die Transparenz und Reaktionsfähigkeit in der Produktion zu steigern, um dadurch die Zielgrößen Kosten, Qualität und Zeit zu verbessern (ebd., S. 6). Sie verfolgen mit der MES-Einführung aber auch viele nicht direkt (monetär) quantifizierbare Ziele, wie z.B. eine papierarme Fabrik, Flexibilitätssteigerung, höhere Termintreue, höhere Kundenzufriedenheit, höhere Mitarbeiterzufriedenheit, Erfüllung externer Anforderungen z.B. in Bezug auf Rückverfolgbarkeit sowie die Reduzierung der Komplexität in Produktion und IT-Landschaft (Baumann, et al., 2006, S. 17); (VDI, 2013, S. 24); (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 205f.).

2.1.4. Herausforderungen in Produktion, IT und Organisation

Es kommen gewaltige Herausforderungen auf die Unternehmen zu: Sie müssen künftig nicht nur die klassischen Zielgrößen Kosten, Qualität und Zeit verfolgen, sondern zusätzlich auch ihre Flexibilität und Wandlungsfähigkeit verbessern, um schnell und vor allem auch wirtschaftlich auf Veränderungen reagieren zu können (Spath, 2013, S. 42); (Bauernhansl, et al., 2014, S. 13); (Bauernhansl, et al., 2016, S. 8). Flexibilität und Wandlungsfähigkeit scheinen dabei vielfach als Synonyme missverstanden zu werden, tatsächlich gibt es entscheidende Unterschiede. *Flexibilität* lässt sich in Anlehnung an Andresen et al. (2005, S. 65), Jeske et al. (2011, S. 21) sowie Steegmüller & Zürn (2014, S. 104) definieren als die Fähigkeit eines Systems, bei inter-

nen oder externen Veränderungen innerhalb eines gewissen Flexibilitätspotenzials an die Veränderungen angepasst werden zu können. Dieses bereits bei der Planung eines Systems (z.B. Produktionslinie) festzulegende Flexibilitätspotenzial genügt in vielen Branchen, wie z.B. der Automobilindustrie, nicht mehr, um auf die Volatilität der Märkte reagieren zu können, weshalb hier wandlungsfähige Produktionssysteme erforderlich werden (Stegmüller & Zürn, 2014, S. 104).

Wandlungsfähigkeit wird von Andresen et al. (2005, S. 65) hingegen definiert „als die Fähigkeit eines Systems, sich selbst und schnell an veränderte Anforderungen anpassen zu können“. Um dieser Fähigkeit gerecht zu werden, benötigen wandlungsfähige Systeme auch proaktive Fähigkeiten (vgl. Abbildung 2.7).



Abbildung 2.7 Bausteine der Wandlungsfähigkeit (Andresen et al., 2005, S. 65)

Gronau (2014b, S. 24) führt acht Eigenschaften auf, die zur Wandlung befähigen: 1. Skalierbarkeit, 2. Modularität, 3. Mobilität, 4. Interoperabilität, 5. Selbstorganisation, 6. Selbstähnlichkeit, 7. Redundanz und 8. Wissen. Insbesondere die Eigenschaften „Modularität“ und „Selbstorganisation“ seien wichtige Fähigkeiten zur Komplexitätsbeherrschung in Produktion und Logistik, aber auch Interoperabilität in der IT und im Materialfluss sowie das erforderliche Wissen, um Systemanpassungen vornehmen zu können (ebd.). Der erforderliche Grad der Wandlungsfähigkeit sei dabei je nach Systemkomplexität am Produktionssystem einzustellen (Tücks & Eilers, 2011, S. 4).

Erschwerend kommt für die Unternehmen hinzu, dass sie aufgrund der meist über Jahre gewachsenen, bestehenden Produktions- und IT-Systeme die erforderlichen Veränderungen und Anpassungen häufig nach dem sogenannten Brownfield-Ansatz umsetzen müssen, d.h. unter Berücksichtigung bestehender technischer und organisatorischer Rahmenbedingungen (Kolberg, et al., 2017, S. 214f.). Nur in wenigen Fällen wird ein Greenfield-Ansatz (ebd.) mit

kompletter Neugestaltung des Gesamtsystems und ohne Berücksichtigung technischer oder organisatorischer Rahmenbedingungen möglich sein. Der Vorteil des Brownfield-Ansatzes liegt jedoch in der Möglichkeit der Migration in kleinen überschaubaren und damit auch risikoärmeren Schritten, während der Greenfield-Ansatz mit größeren finanziellen und technischen Risiken verbunden ist (ebd.).

2.1.4.1. Besondere Herausforderungen in der Produktion

Viele Unternehmen haben in den letzten Jahren ihre Produktionssysteme mit den in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Lean Production Ansätzen und Gestaltungsprinzipien wettbewerbsfähiger gemacht und dabei auch erfolgreich neue Führungsstile und Unternehmenskulturen eingeführt (Spath, 2013, S. 17). Bei einem Großteil der Unternehmen sei der Erfolg laut Reinhart & Zühlke (2017, S. XXXIII) jedoch ausgeblieben, da es nicht gelungen sei, den „tiefgreifenden Wandel in der Unternehmenskultur hin zu einer Mentalität des kontinuierlichen Verbesserns in allen Hierarchiestufen“ herbeizuführen.

Die Hauptherausforderungen in der Produktion sind einer Studie von Agiplan (Bischoff, 2015, S. 53f.) zufolge daher vielfältig. Die Unternehmen müssen sich demnach nicht nur im Tagesgeschäft dem hohem Kostendruck und den steigenden Qualitätsanforderungen stellen, sondern sie müssen nach wie vor auch an der notwendigen Produktionsoptimierung arbeiten, um in Zukunft die steigende Komplexität und Auslastungsschwankungen zu beherrschen (ebd.).

Die erfolgreiche Umsetzung der Lean Production Prinzipien wird auch als wichtige Voraussetzung für Industrie 4.0 gesehen. Deuse et al. (2015, S. 103) sehen in diesem Zusammenhang strukturierte Wertströme mit standardisierten Prozessen und Strukturen als Grundlage für einen erfolgreichen Technologieeinsatz sowie für die dezentrale Selbstorganisation und Autonomie in der Produktion. Die Studie „Digital-vernetztes Denken in der Produktion“ der IMPULS-Stiftung (Kinkel, et al., 2016, S. 74f.) und Nyhuis et al. (2017, S. 49) beschreiben schlanke Prozesse als Voraussetzung für die Implementierung von Industrie 4.0. Nyhuis (ebd.) betont, dass sowohl der Implementierungsaufwand, als auch die zu erwartenden Investitionskosten stark von der Qualität der bestehenden Prozesse abhängen. Roy et al. (2015, S. 27) sehen das Fließprinzip mit möglichst kleiner Losgröße (One-Piece-Flow) als wichtiges Lean Prinzip auch bei Industrie 4.0, um den abteilungsübergreifenden Produktionsablauf zu glätten und um einen möglichst unterbrechungsfreien Materialfluss zu gewährleisten. Künftig sei es zudem wichtig, den Wertstrom unternehmensübergreifend zu betrachten (ebd., S. 30) (Dombrowski, et al., 2015d, S. 311).

Zusammenfassend lassen sich als Ausgangssituation vor der Einführung von Industrie 4.0 folgende besonderen Herausforderungen in der Produktion beschreiben:

1. Beherrschung des Tagesgeschäfts mit Konzentration auf Kosten, Qualität und Zeit.
2. Erfolgreiche Einführung von Lean Production Prinzipien sowie Etablierung einer Kultur der kontinuierlichen Verbesserung als Basis für Industrie 4.0.
3. Betrachtung und Optimierung des gesamten unternehmensinternen und -übergreifenden Wertstroms.

2.1.4.2. Besondere Herausforderungen in der IT-Landschaft

Obwohl mit der Automatisierungspyramide und den MES bereits Lösungsansätze für eine integrierte Produktions-IT verfügbar sind, setzen gemäß einer im Rahmen dieser Arbeit im Jahr 2017 durchgeführten Marktumfrage (vgl. Abschnitt 2.4) erst 51 Prozent der befragten Unternehmen ein MES ein. 36 Prozent der Unternehmen mit MES haben zwischen Null und 500 Beschäftigte, 64 Prozent haben mehr als 500 Beschäftigte. Laut Bildstein & Seidelmann (2014, S. 584) sind durchgängige Automatisierungspyramiden von der Unternehmensebene bis zur Feldebene bisher vor allem von großen Unternehmen umgesetzt worden. In Produktionsunternehmen gibt es daher immer noch gewachsene IT-Strukturen mit einer Vielzahl an IT-Insellösungen (ebd., S. 583); (Nyhuis, et al., 2014, S. 80). Die dadurch verursachte „Daten- und Systemheterogenität“ wird als „eine wesentliche Herausforderung für produzierende Unternehmen“ gesehen (Boos & Zancul, 2012, S. 337-339).

Im Mittelstand fehlen damit nicht nur vollständige und korrekte Daten sowie integrierte Systeme zur Vermeidung von Insellösungen und Schnittstellenproblematiken (Abel & Wagner, 2017, S. 136), sondern auch ein intelligentes Datenmanagement (Landherr, et al., 2013, S. 107). Der Mangel an Systemunterstützung sowie das Fehlen integrierter Systeme führen zu einer Vielzahl manuell geführter Papierdokumente und Excel-Listen (Ellerbrock, 2015a, S. 607). Ellerbrock nennt als Beispiele solcher Dokumente „Qualitätsabweichungen, Fehlerlisten, Maschinenausfalllisten, Produktivitätskennzahlen, Mitarbeiterlisten, Qualifikationsübersichten, Änderungshinweisen, Informationen zu Lagerhaltung“ und bezeichnet die Datenerfassung auf Papier als „nicht-wertschöpfender Prozess“, der Kosten verursacht, Personal bindet, häufig fehlerhaft ist und meist zu verspäteten oder falschen Entscheidungen führt (ebd., S. 608).

Die unzureichende Datenqualität behindert darüber hinaus auch die Produktionsplanung und -steuerung, die auf vollständigen und konsistenten Daten in Echtzeit aufbaut (Nyhuis, et al., 2014, S. 80f.).

Als Ausgangssituation vor der Einführung von Industrie 4.0 lassen sich zusammenfassend folgende besonderen Herausforderungen in der IT-Landschaft beschreiben:

1. Schaffung einer geeigneten Datenbasis in Echtzeit sowie einer darauf aufbauenden integrierten Systemlandschaft zur Planung und Steuerung der produktionsrelevanten Abläufe in Echtzeit.
2. Vermeidung von Papierdokumenten.
3. Systematische Reduzierung der Komplexität in der IT-Landschaft und Reduzierung der informationstechnischen Verschwendungen.

2.1.4.3. Besondere Herausforderungen in der Organisation

Um schneller auf Kunden- oder Marktanforderungen reagieren zu können, müssen Unternehmen vor allem unabhängige, dezentrale Organisationseinheiten mit hoher Flexibilität, kurzen Entscheidungswegen und geringem Koordinationsaufwand schaffen (Schuh, et al., 2012, S. 301f.). Das Ziel sind teilautonome Gruppen, in denen interdisziplinäre Teams planerische, administrative, ausführende und kontrollierende Tätigkeiten übernehmen, um die Identifikation mit der Arbeit zu steigern, das vorhandene Know-how besser zu nutzen und um dadurch besser und schneller reagieren zu können (Westkämper, 2006, S. 220). Durch die Verlagerung der Planung und Steuerung auf die operative Ebene verändert sich nicht nur die Tätigkeit der Produktionsmitarbeiter (Hirsch-Kreinsen, 2014b, S. 3), sondern es wird auch von ihnen erwartet, dass sie kooperationsfähig und veränderungsbereit sind (Westkämper, 2006, S. 220f.). Westkämper (ebd.) beschreibt zusammenfassend die in Abbildung 2.9 dargestellten sechs Elemente als Fähigkeiten autonomer Organisations- und Leistungseinheiten.



Abbildung 2.9 Elemente autonomer Organisations- und Leistungseinheiten (eigene Darstellung in Anlehnung an Westkämper, 2006, S. 221)

Neben organisationsstrukturellen Herausforderungen ergeben sich dadurch insbesondere auch Anforderungen an die betriebliche Personalentwicklung (Abel & Wagner, 2017, S. 139). Eine strategische Personalpolitik zu Qualifikations- und Kompetenzentwicklung der Beschäftigten sei dabei „nicht verhandelbar“ (ebd., S. 137). Da der einmalige Wissenserwerb im Rahmen einer Ausbildung oder eines Studiums künftig nicht mehr reichen wird, bedarf es einer kontinuierlichen Kompetenzentwicklung (Gerhard, 2019, S. X) mit kompakten Inhalten, die On-the-Job erworben werden können (Spath, 2013, S. 123). Dabei seien auch neue Technologien, wie „Digitale Medien, Blended Learning, Distance Learning, etc.“ einzusetzen (ebd.). Der Mangel an Personal mit den benötigten Kompetenzen sei inzwischen ein „wesentliches Umsetzungs- und damit Wachstumshemmnis“, das beseitigt werden müsse (Gerhard, 2019, S. X).

Teichmann et al. (2020, S. 524) empfehlen, die Weiterbildung sowohl in der Organisation als auch in der Kultur und Strategie zu verankern. Die Qualifizierungsbedarfe seien dabei aus der Unternehmensstrategie abzuleiten (ebd.). Abel & Wagner (2017, S. 137) sehen als zentrale Voraussetzung für eine strategische Personalpolitik zum einen die Aufnahme bestehender Qualifikationen (z.B. in Form von Qualifikationsmatrizen) und zum anderen deren kontinuierliche Fortschreibung, verbunden mit der Ermittlung künftiger Qualifikations- und Kompetenzbedarfe. Während bisher mehr Spezialwissen benötigt wurde, bewirken die zunehmende Dezentralisierung und Teilautonomie der Organisationseinheiten, aber auch die zunehmende Digitalisierung einen hohen Bedarf an interdisziplinären Qualifikationen in den Bereichen Produktion, IT und Softskills (Spath, 2013, S. 123); (Schröder, 2016, S. 14). Darüber hinaus sollten aber

auch mitarbeiterindividuelle Aspekte bei der Qualifizierung berücksichtigt werden (Vernim, et al., 2017, S. 63). Abbildung 2.10 zeigt das gesamte Spannungsfeld eines Produktionsmitarbeiters, das sich aber nach Vernim et al. (ebd.) durch geeignete Qualifizierungsmaßnahmen auflösen lässt.

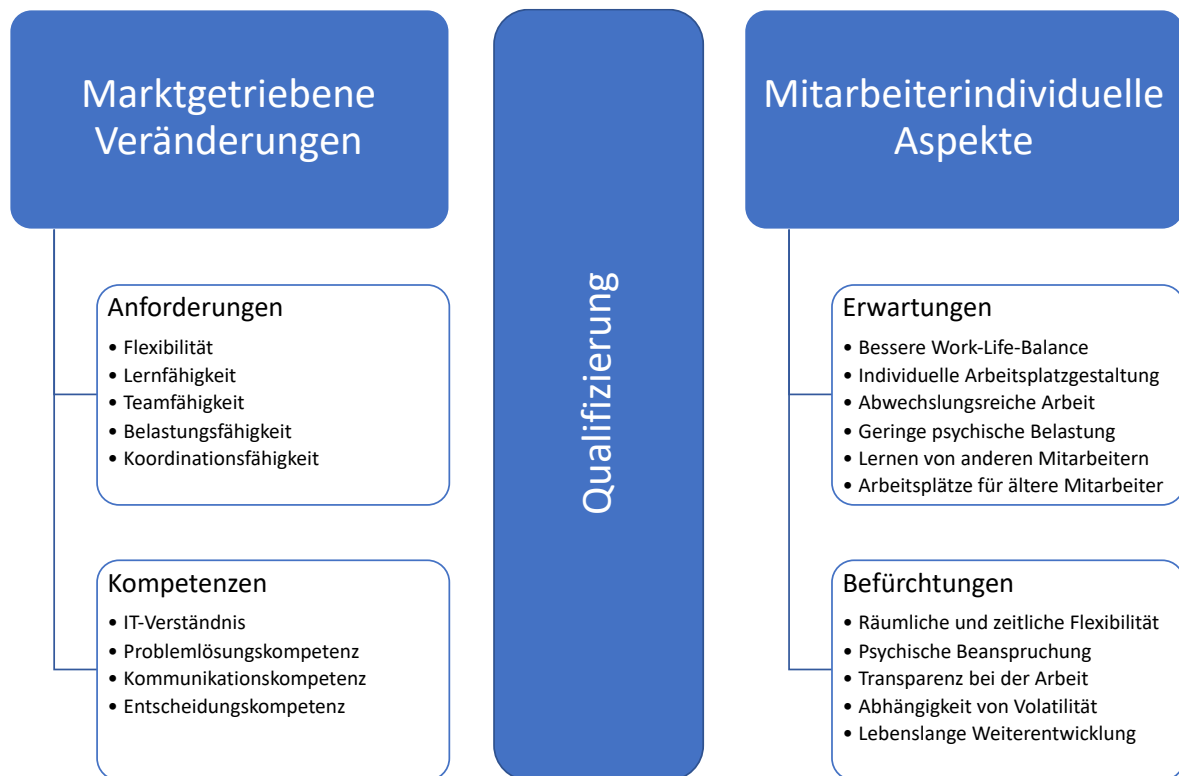


Abbildung 2.10 Spannungsfeld eines Produktionsmitarbeiters (eigene Darstellung in Anlehnung an Vernim et al., 2017, S. 63)

Teichmann et al. (2020, S. 512) stellen fest, dass die bisherigen Weiterbildungspraktiken den aktuellen Anforderungen nicht gewachsen seien. So gäbe es u.a. Kompetenzlücken, unklare Anforderungsprofile und veraltete Lehrmethoden (ebd.).

Als Ausgangssituation vor der Einführung von Industrie 4.0 lassen sich zusammenfassend folgende besonderen Herausforderungen in der Organisation beschreiben:

1. Schaffung dezentraler, teilautonomer Organisationseinheiten zur schnelleren Reaktion auf Kunden- und Marktanforderungen.
2. Etablierung einer strategischen Personalentwicklung zur Aufnahme bestehender Qualifikation (z.B. durch Qualifikationsmatrizen) und Ableitung künftiger Qualifikations- und Kompetenzbedarfe aus der Unternehmensstrategie.
3. Qualifizierung der Beschäftigten On-the-Job durch geeignete Lernmethoden und Technologien.

2.1.5. Besonderheiten von KMU und Mittelstand

Grundsätzlich treffen die oben beschriebenen Ausführungen bzgl. der Ausgangssituation sowie der Herausforderungen in Produktion, IT-Landschaft und Organisation auf produzierende Unternehmen aller Größen zu. Es gibt jedoch einige Besonderheiten von KMU und Mittelstand gegenüber Großunternehmen, die bei der späteren Entwicklung eines Reifegradmodells zu berücksichtigen sind (vgl. Tabelle 2.5).

KMU und Mittelstand	Großunternehmen
Unternehmensführung	
<ul style="list-style-type: none"> • eigentümergeführt • Management, Eigentum und Risiko in der Hand der Unternehmensführung • eher technische Ausbildung, weniger Führungs- und Methodenkenntnisse • hohe Auslastung durch breites Aufgabengebiet und direkte Einbindung in das Betriebsgeschehen 	<ul style="list-style-type: none"> • angestelltes Management • Trennung von Management, Eigentum und Risiko • fundiertes Managementwissen und Fachwissen in den Fachabteilungen • Freiraum für Managementaufgaben und Abstand zum direkten Betriebsgeschehen
Quelle: in Anlehnung an (Pfohl, 2006, S. 18ff.); (Kayser, 2006, S. 35); (Bischoff, 2015, S. 42)	
Organisation	
<ul style="list-style-type: none"> • Zentrale Entscheidungsstrukturen • Geringe Abteilungsbildung • Funktionshäufung • Kurze Informationswege 	<ul style="list-style-type: none"> • Dezentrale Entscheidungsstrukturen • Ausgeprägte Abteilungsbildung • Hohe Aufgabenteilung • Vorgeschriebene Informationswege
Quelle: in Anlehnung an (Pfohl, 2006, S. 18ff.)	
Personalressourcen	
<ul style="list-style-type: none"> • Geringer Anteil an Akademikern • Begrenzte Personalressourcen 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Anteil an Akademikern • Breites Personalangebot (leitende und operative Beschäftigte, Linien- und Stabsfunktionen)
Quelle: in Anlehnung an (Pfohl, 2006, S. 18ff.); (Berlak, 2015, S. 578); (Bischoff, 2015, S. 42); (Peschke & Eckardt, 2019, S. 48ff.)	
Finanzielle Mittel	
<ul style="list-style-type: none"> • Fehlendes Wissen und fehlende personelle Ressourcen erschweren den Zugang zu Förderprogrammen 	<ul style="list-style-type: none"> • Expertise in der Beantragung und Abwicklung von Förderprogrammen (viele Programme aber KMU-orientiert)

<ul style="list-style-type: none"> • In der Regel eher knappe finanzielle Mittel • Investitionen meist aus eigenen Mitteln, wodurch Rücklagen reduziert werden • Fehlentscheidungen stellen ein hohes Risiko dar • Wirtschaftlich langfristiges Denken und Handeln 	<ul style="list-style-type: none"> • Kapital ist in der Regel ausreichend vorhanden • Zugang zu Kapital (Eigen- bzw. Fremdkapital) ist eher unkritisch • Geringeres Risiko bei Fehlentscheidungen • Kurz- und langfristiges Denken und Handeln
<p>Quelle: in Anlehnung an (Berlak, 2015, S. 578); (Bischoff, 2015, S. 43f.); (Peschke & Eckardt, 2019, S. 48ff.)</p>	
<p>Produktion</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Spezialisierungsgrad • Eher geringere Stückzahlen, die durch maschinelle und manuelle Fertigungsschritte nach dem Werkstattprinzip produziert werden • Häufig gewachsener Maschinenpark mit Maschinen unterschiedlicher Hersteller und Baujahre • Fehlendes Wissen im Bereich der Verbesserung von Prozessen • Fehlende Zeit zur Beschäftigung mit der Verbesserung von Prozessen 	<ul style="list-style-type: none"> • Eher geringerer Spezialisierungsgrad • Meist Serien- bzw. Massenfertigung größerer Stückzahlen in flexiblen Produktionssystemen bzw. Produktionslinien • Eher Standardisierung im Bereich der Maschinenhersteller sowie der entsprechenden Maschinensteuerungen • Eigenes Wissen bzw. Nutzung externer Consulting Leistungen • Meist Fachabteilungen (z.B. Operational Excellence, Industrial Engineering) für die Verbesserung von Prozessen. Die kontinuierliche Verbesserung (KVP) ist fest im Unternehmen etabliert
<p>Quelle: in Anlehnung an (Bischoff, 2015, S. 44); (Peschke & Eckardt, 2019, S. 48); (Peschke & Eckardt, 2019, S. 48ff.)</p>	
<p>IT-Landschaft und Digitalisierung</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • Strategiebildung und Digitalisierung stellen Unternehmen vor große Herausforderungen. Keine klaren Zuständigkeiten, daher oft Aufgabe des Geschäftsführers, die Digitalisierung zu koordinieren • Fehlendes Wissen im Bereich der Ermittlung des Digitalisierungsbedarfs und des Nutzens stellt Unternehmen vor große Herausforderungen • Fehlende Zeit zur Beschäftigung mit Digitalisierungsthemen 	<ul style="list-style-type: none"> • Strategiebildung und Digitalisierung meist in der Verantwortung von CEO (Strategie, Geschäftsmodelle, Ressourcen, Finanzierung), CDO (Digitalisierungsstrategie, Koordination) und CTO (Umsetzung der Digitalisierung) • Eigenes Wissen bzw. Nutzung externer Consulting Leistungen • Meist Abteilungen (z.B. IT-Abteilung, Operations, Industrial Engineering), die sich mit der Digitalisierung beschäftigen

<ul style="list-style-type: none"> • Schwierigkeiten bei der Auswahl und Einführung von Software • Erschwerte Digitalisierung durch hohen Spezialisierungsgrad der Produktion sowie heterogene Maschinen und IT-Systeme • Die einwandfreie Funktionsweise und Datensicherheit stellen ein gewisses Risiko dar • Risiko von Inselösungen durch zentrale Verantwortung geringer 	<ul style="list-style-type: none"> • Expertise zur Softwareeinführung ist vorhanden • Digitalisierung ist durch bereits vorhandene Automatisierungsstrukturen und Standards einfacher • Mit Testsystemen und Pilotanlagen können neue Technologien und Prozesse zur Risikominimierung erprobt werden • Risiko abteilungsbezogener Insel-lösungen durch dezentrale Digitalisierungsaktivitäten
<p>Quelle: in Anlehnung an (Berlak, 2015, S. 578); (Meißner, et al., 2017, S. 609); (Schebek, et al., 2017, S. 15); (Peschke & Eckardt, 2019, S. 48ff.); (Schröder, 2016, S. 4ff.)</p>	
<p>Weiterbildung</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • Fehlende personellen und monetären Ressourcen für Weiterbildung • Fehlendes Bewusstsein für die Notwendigkeit von Weiterbildung 	<ul style="list-style-type: none"> • Die betriebliche Weiterbildung ist fest im Unternehmen verankert • Die kontinuierliche Weiterbildung der Unternehmen ist in der Unternehmensstrategie verankert.
<p>Quelle: in Anlehnung an (Teichmann, et al., 2020, S. 517ff.)</p>	
<p>Innovation</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • Innovationen werden prinzipiell durch flache Hierarchien gefördert • Nachteile durch begrenzte personelle Ressourcen, finanzielle Mittel und schwierigerem Zugang zu Fördermitteln • Zukunftsforschung ist aufgrund der knappen Ressourcen eher weniger etabliert 	<ul style="list-style-type: none"> • Die Innovationsgeschwindigkeit ist gegenüber kleineren, flexibleren Unternehmen eher geringer • Vorteile durch Kapitalstärke und personelle Ressourcen • Vorteile durch Zukunftsforschung (Corporate Foresight Management)
<p>Quelle: in Anlehnung an (Bischoff, 2015, S. 44); (Peschke & Eckardt, 2019, S. 48); (Steinmüller, 2017, S. 30ff.)</p>	
<p>Wandlungsfähigkeit</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • Vorteile durch flache Hierarchien und kurze Entscheidungswege • Bereits heute sehr hohe Flexibilität durch überwiegend kundenspezifische Produkte und Lösungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Die Wandlungsfähigkeit wird durch die Größe und Komplexität erschwert
<p>Quelle: in Anlehnung an (Bischoff, 2015, S. 44)</p>	

Tabelle 2.5 Besonderheiten von KMU und Mittelstand gegenüber Großunternehmen im Kontext der Digitalisierung (eigene Darstellung)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass KMU und mittelständische Unternehmen aufgrund ihrer begrenzten personellen und finanzielle Ressourcen zunächst als benachteiligt erscheinen. Ihre größere Flexibilität gegenüber den Großunternehmen wird jedoch als Vorteil bei der Umsetzung von Industrie 4.0 angesehen (Schebek, et al., 2017, S. 15).

2.2. Industrie 4.0 – Technologie und Anwendung

In diesem Abschnitt werden zunächst die wichtigsten technologischen Grundlagen von Industrie 4.0 dargestellt, bevor auf die Handlungsbereiche der digitalen Transformation und die Anwendung der digitalen Technologien eingegangen wird. Damit beschreibt der Abschnitt 2.2 die wesentlichen Aspekte der Transformation produzierender Unternehmen in Richtung Industrie 4.0.

2.2.1. Die vierte industrielle Revolution

Die durch Industrie 4.0 zu erwartenden Veränderungen sind so groß, dass Industrie 4.0 nicht als Evolution, sondern vielfach als Revolution bezeichnet wird (Kagermann, et al., 2013, S. 17); (Spath, 2013, S. 22); (Roth, 2016, S. 5); (Matt, et al., 2018, S. 93). Vor Industrie 4.0 gab es bereits drei weitere Stufen der industriellen, technologiegetriebenen Revolutionen.

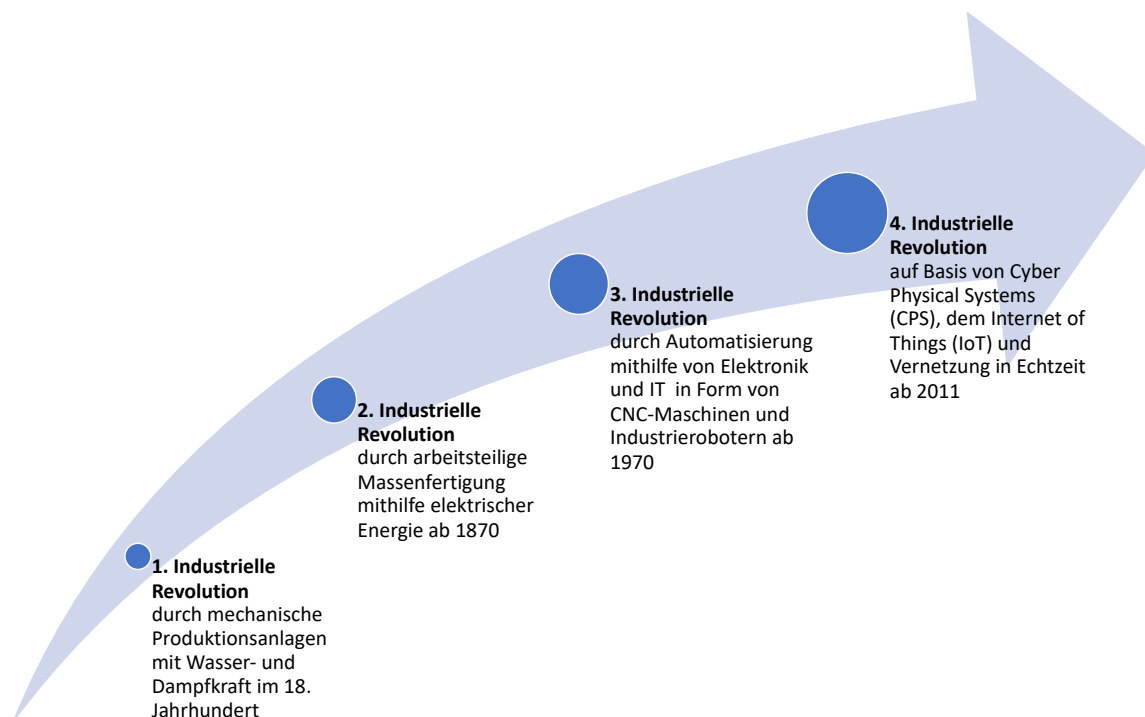


Abbildung 2.11 Die vier Stufen der industriellen Revolution (eigene Darstellung in Anlehnung an Kagermann et al., 2013, S. 17)

Die *erste industrielle Revolution* begann mit dem Aufkommen von Wasser- und Dampfkraft Ende des 18. Jahrhunderts, als die bisher rein manuelle Arbeit durch mechanische Produktionsanlagen unterstützt werden konnte (vgl. Abbildung 2.11).

Die *zweite industrielle Revolution* ergab sich dann Ende des 19. Jahrhunderts durch die Nutzung elektrischer Energie sowie arbeitsteiliger Organisationsformen und Massenfertigung.

Als *dritte industrielle Revolution* wird die bis heute immer noch andauernde Automatisierung der Produktion mit Hilfe von Automatisierungstechnik mit speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS), Computerized Numerical Control (CNC)-Maschinen und Industrierobotern ab 1970 gesehen. Diese Stufe stellt zugleich den Beginn der Digitalisierung der Produktion dar (Bauernhansl, et al., 2016, S. 6). Durch die steigende Rechnerleistung wurden in den Folgejahren immer mehr Funktionen digitalisiert und es entstanden neben der CNC-Technologie die ersten Systeme für Computer Aided Design (CAD), Computer Aided Manufacturing (CAM), Produktionsplanung und -steuerung (PPS) sowie Enterprise Resource Planning (ERP) (ebd.); (Reinhart & Zühlke, 2017, S. XXXII). In den 1980er Jahren wurde mit dem Aufkommen der Personal Computer (PC) Rechenleistung günstig und an jedem Arbeitsplatz verfügbar. So entstand der Computer Integrated Manufacturing (CIM) Ansatz, der eine Integration der bisherigen Prozessketten ERP/PPS und CAD/CAM/CAQ zu einem Gesamtsystem vorsah (ebd.). CIM verfolgte dabei einen zentralen, rein IT-gesteuerten Ansatz zur Planung und Steuerung der Produktion und beabsichtigte den Ersatz des Menschen durch die Technik (Spath, 2013, S. 102). Diese Vision konnte sich jedoch aufgrund der hohen Komplexität der Anforderungen und der Unvorhersehbarkeit aller Einflüsse nicht durchsetzen und ist wegen der mangelnden technischen Realisierbarkeit letztendlich gescheitert (Reinhart & Zühlke, 2017, S. XXXIII); (Peschke & Eckardt, 2019, S. 7); (Jacobi, 2013, S. 82-83). Es zeigte sich auch, dass derartige Konzepte nicht den Anforderungen an die benötigte Wandlungsfähigkeit zur Anpassung an interne und externe Veränderungen gerecht wurden (Westkämper, 2013b, S. 135). Stattdessen entwickelte sich in den 1990er Jahren das bereits in Abschnitt 2.1.3 beschriebene Modell der Automatisierungspyramide als Standard für die Vernetzung der produktionsrelevanten IT im Unternehmen (Bildstein & Seidelmann, 2014, S. 584f.) sowie die darin enthaltenen Manufacturing Execution Systeme (MES).

Seit der Präsentation der Vision „Industrie 4.0“ im Jahr 2011 spricht man nun vom Beginn der *vierten industriellen Revolution*. Der Kern dieser vierten industriellen Revolution ist das „Internet der Dinge“, in dem die reale Welt mit der virtuellen Welt verschmilzt. Es basiert auf Cyber-Physischen Systemen (CPS), d.h. realen physischen Objekten, wie z.B. Maschinen, Sensoren und Aktoren, denen im „cyber space“ eine zusätzliche digitale Identität gegeben wird

(vgl. Abschnitt 1.1) Durch den Einsatz und die Vernetzung dieser Cyber-Physischen Systeme (CPS) soll es möglich werden, Wertschöpfungsnetzwerke mit intelligenteren Überwachungsprozessen und autonomen Entscheidungsprozessen in Echtzeit zu steuern und zu optimieren (Kagermann, et al., 2011, S. 2). Anders als bei CIM steht der Mensch bei Industrie 4.0 im Mittelpunkt und wird von Assistenzsystemen bei seiner Arbeit unterstützt (Spath, 2013, S. 129). Insgesamt führt der Einsatz von Industrie 4.0 Technologien zu einer deutlich verbesserten Anpassungsfähigkeit des Unternehmens an sich verändernde Umgebungsbedingungen (Gronau, 2016, S. 21). Die Verfügbarkeit von Echtzeitdaten und die Möglichkeit der Vernetzung dieser Daten ermöglichen darüber hinaus neue, teilweise auch disruptive, Geschäftsmodelle (Bauernhansl, et al., 2016, S. 3).

2.2.2. Technologische Grundlagen

Im Rahmen von Industrie 4.0 entwickelten sich mehrere neue Sichtweisen, Architekturmodelle, Technologien, Systeme, Standards und Prinzipien, die bei der Transformation in Richtung Industrie 4.0 zu berücksichtigen sind. In den nachfolgenden Abschnitten werden die wichtigsten technologischen Aspekte beschrieben.

2.2.2.1. Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI)

Um ein gemeinsames Verständnis bezüglich Industrie 4.0 zu bekommen, wurde im Rahmen der Plattform Industrie 4.0 von den Verbänden BITKOM, VDMA, ZVEI, VDI und den Normungsorganisationen IEC, ISO, DKE und DIN das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) entwickelt und als DIN SPEC 91345:2016-04 veröffentlicht (BMW, 2016). Abbildung 2.12 zeigt das dreidimensionale Schichtenmodell.

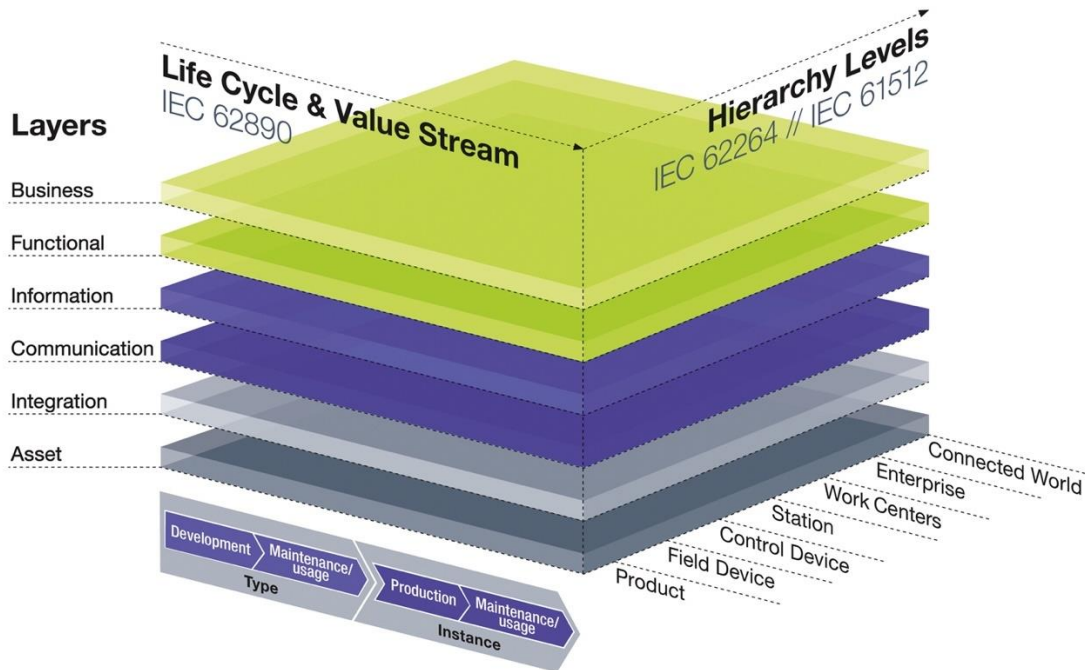


Abbildung 2.12 Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) (BMW, 2016)

Auf der senkrechten Achse sind die verschiedenen Schichten (Layer) je nach Sichtweise (Geschäftsprozess, Funktion, Information, etc.) dargestellt. Die waagrechte Achse beschreibt die Abbildung des kompletten Produktlebenszyklus und der Wertschöpfungskette gemäß IEC 62890 mit den darin enthaltenen Prozessen von der Entwicklung über die Produktion bis zur Nutzung, Wartung und Recycling der Produkte. Die dritte Achse beschreibt die hierarchische Zuordnung von Funktionalitäten innerhalb der Fabrik gemäß IEC 62264 bzw. IEC 61512 (BITKOM e.V., et al., 2015, S. 42). Damit bildet das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) eine Systematik für bestehende und künftige Standards und Normen sowie deren Anwendung im Rahmen von Industrie 4.0.

Aus Sicht des Autors besteht ein Risiko, dass RAMI 4.0 von der Industrie mit Vorgehens- bzw. Reifegradmodellen verwechselt werden könnte. Zur Strukturierung von Standards und Normen ist das Modell aber sehr hilfreich. Durch die Einbeziehung bestehender Standards und Normen ist RAMI 4.0 aus Sicht des Autors jedoch nicht als Revolution, sondern eher als eine Evolution bisheriger Ansätze zu betrachten.

2.2.2.2. Die Automatisierungspyramide

Die klassische Automatisierungspyramide mit ihren sechs Ebenen wurde bereits in Abschnitt 2.1.3 vorgestellt, da sie bis heute den Standard für die Vernetzung der produktionsrelevanten IT im Unternehmen bildet (Bildstein & Seidelmann, 2014, S. 584f.). Das oben beschriebene

Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) verweist bezüglich der hierarchischen Zuordnung von IT-Funktionalitäten auf das Ebenenmodell IEC 62264 (ANSI/ISA95) (s.o.). Dieses beschreibt eine mit der Automatisierungspyramide vergleichbare Struktur (vgl. Abbildung 2.13). Daraus kann gefolgert werden, dass die Automatisierungspyramide auch in Industrie 4.0 Architekturen ihre Daseinsberechtigung behält (VDMA, 2018, S. 11). Bildstein & Seidelmann gehen jedoch davon aus, dass der „starre Aufbau der Automatisierungspyramide“ durch Industrie 4.0 Technologien „aufgeweicht und durchlässiger“ werden könnte (2014, S. 586).

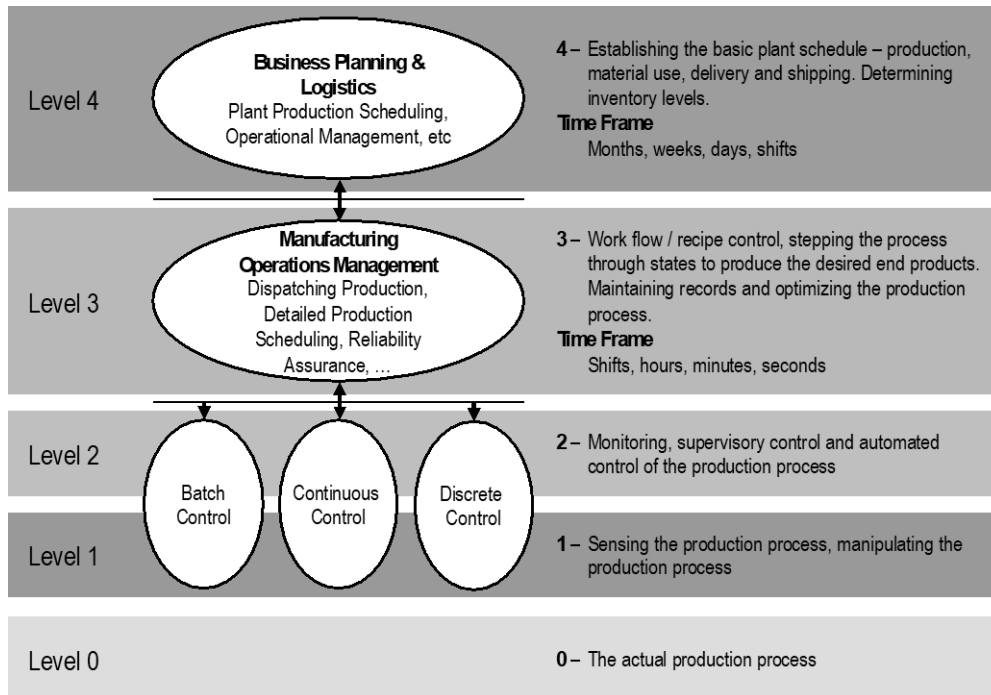


Abbildung 2.13 IEC 62264-3 Ebenenmodell (VDMA, 2018, S. 10)

2.2.2.3. Manufacturing Execution Systeme (MES)

Die Manufacturing Execution Systeme (MES) wurden ebenfalls bereits in Abschnitt 2.1.3 vorgestellt, da sie als integraler Bestandteil der Automatisierungspyramide (Level 4) bis heute zur Standard-IT-Architektur produzierender Unternehmen gehören. MES gehören aber auch zur künftigen IT-Architektur nach RAMI 4.0, da sie mit ihrem Funktionsumfang sowohl das „Manufacturing Operations Management (MOM)“ auf Level 3 des Ebenenmodells nach IEC 62264-3 abbilden, als auch die Wertschöpfungskette nach IEC 62890 (vgl. Abbildung 2.12) (VDMA, 2018, S. 14f.). Die ebenfalls in RAMI 4.0 vorgesehene Abbildung des Produktlebenszyklus gehört jedoch nicht zum Funktionsumfang von MES. Daher wird die Integration der Produkt-Life-Cycle-Management-Systeme (PLM) Systeme, der Enterprise-Resource-Planning (ERP)

Systeme und der Manufacturing Execution Systeme (MES) an Bedeutung gewinnen (ebd.).

Abbildung 2.14 zeigt beispielhaft die Datenflüsse zwischen PLM, ERP und MES.

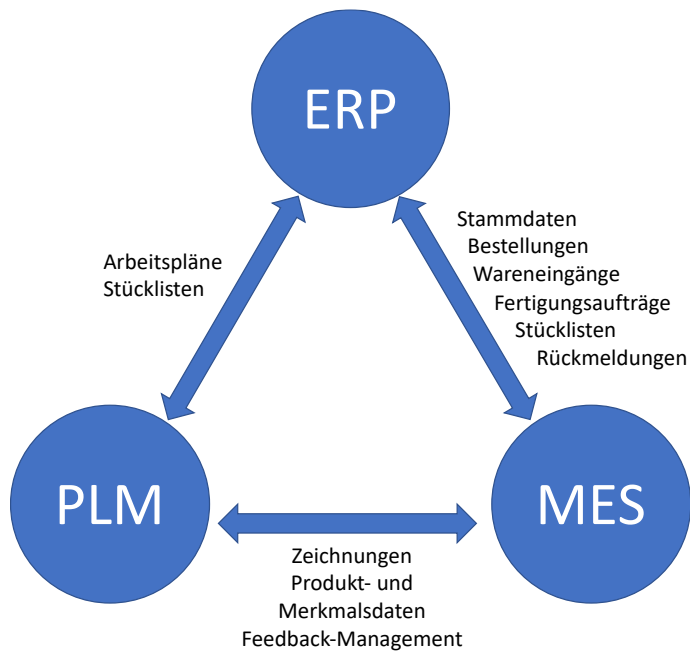


Abbildung 2.14 Integration von PLM, ERP und MES (eigene Darstellung in Anlehnung an VDMA 66412)

Darüber hinaus wird erwartet, dass sich MES künftig weiter in Richtung Integrationsplattformen entwickeln werden, die in der Lage sind, die vielfältigen Daten und Services flexibel zu verwalten und zu orchestrieren und die Datensicherheit zu gewährleisten (VDI, 2021); (VDMA, 2018, S. 16). In seiner Richtlinie VDI 5600 Blatt 7 (VDI, 2021) bezeichnet der VDI die künftigen MES als „Interoperabilitätsmanager“ einzelner, eigenständiger Anwendungen (Apps) und Services (vgl. Abbildung 2.15). Der grundsätzliche Aufgabenbereich der MES gemäß VDI 5600 (vgl. Abschnitt 2.1.3) würde sich dabei nicht ändern, er würde lediglich erweitert werden (ebd.).

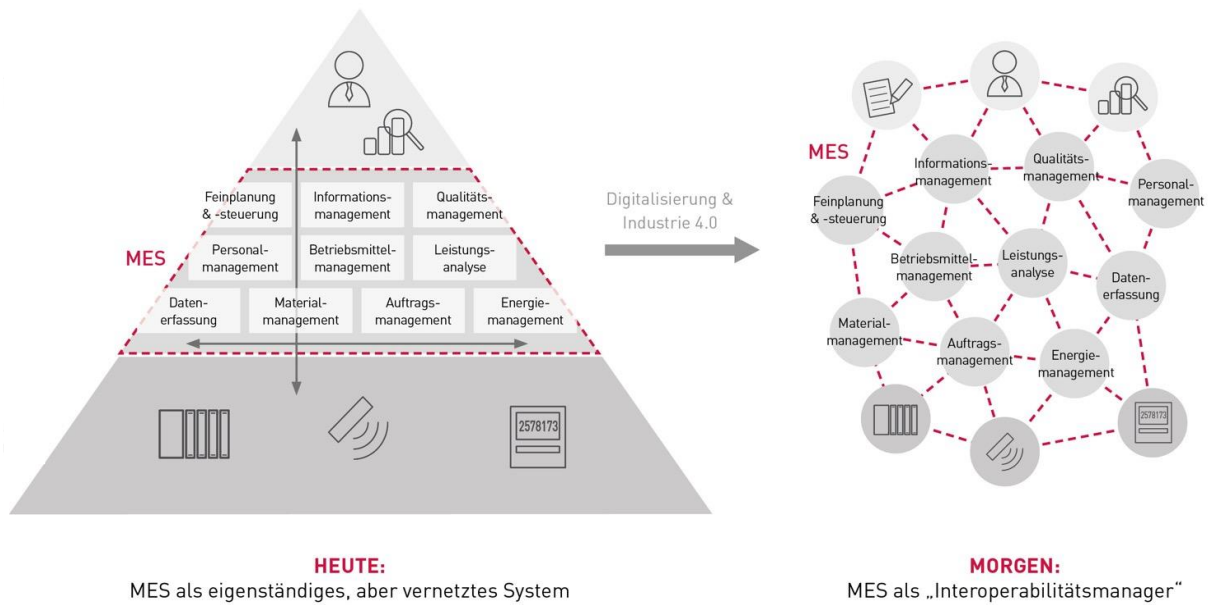


Abbildung 2.15 Die zu erwartende Weiterentwicklung von MES (VDI, 2021)

2.2.2.4. Serviceorientierte Architektur (SOA)

Die Digitalisierung erzeugt einen hohen Bedarf an Services, mit deren Hilfe die Daten von Objekten des Internet of Things (IoT), wie Sensoren, Maschinen, Transportmitteln, etc. erfasst, analysiert, verarbeitet und für die weitere Verarbeitung aufbereitet und gespeichert werden (Peschke & Eckardt, 2019, S. 76). Auf Basis dieser Services können dann Anwendungen (Apps) mit den benötigten Funktionsumfängen entwickelt und bereitgestellt werden (Bauernhansl, 2014, S. 26). Die künftige Produktions-IT verfügt daher über eine serviceorientierte Architektur (vgl. Abbildung 2.16). Edge-Bausteine dienen dabei zur Vorverarbeitung der Daten aus den Maschinensteuerungen, bzw. deren SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) Systemen oder Remote Terminal Units (RTU) sowie der über IoT-Gateways erfassten Daten von Sensoren. Die IoT-Plattformen führen die erfassten Daten zusammen und stellen sie übergeordneten Services und Apps zur Verfügung. Hierzu verfügen IoT-Plattformen über entsprechende Basisdienste zur Administration, Datenspeicherung, Datenanbindung und -bereitstellung (Peschke & Eckardt, 2019, S. 76). Die Business Anwendungen (Apps) können ihre Daten prinzipiell von Webservices, IoT-Plattformen, Edge-Bausteinen oder direkt von Maschinen oder Sensoren erhalten (ebd., S. 17). Während die Maschinensteuerungen, Gateways und Edge-Bausteine aufgrund der Echtzeitanforderungen üblicherweise im lokalen Netzwerk installiert werden, lassen sich die IoT-Plattformen, Webservices und Business Anwendungen (Apps) auch in der Cloud bereitstellen (ebd.). Krüger & Vick (2017, S. 91) sehen den Vorteil Cloud-

basierter Produktionsplattformen immer dann, wenn eine „hohe Vernetzung von Daten und Rechnersystemen“ gefordert ist, wie z.B. in der Produktionssteuerung, Qualitäts- und Prozessüberwachung, Instandhaltung von Maschinen und Anlagen sowie bei kollaborativen Prozessen (ebd.). Bildstein & Seidelmann (2014, S. 587) sehen in Cloud-basierten Apps einen großen Nutzen, da sie den Datenaustausch über verschiedene IT-Systeme, Produktionssysteme und Unternehmensgrenzen hinweg ermöglichen und damit die Daten entlang des gesamten Produktlebenszyklus nutzbar machen können. Dies würde auch die Zusammenarbeit in Produktionsnetzwerken unterstützen (ebd.).

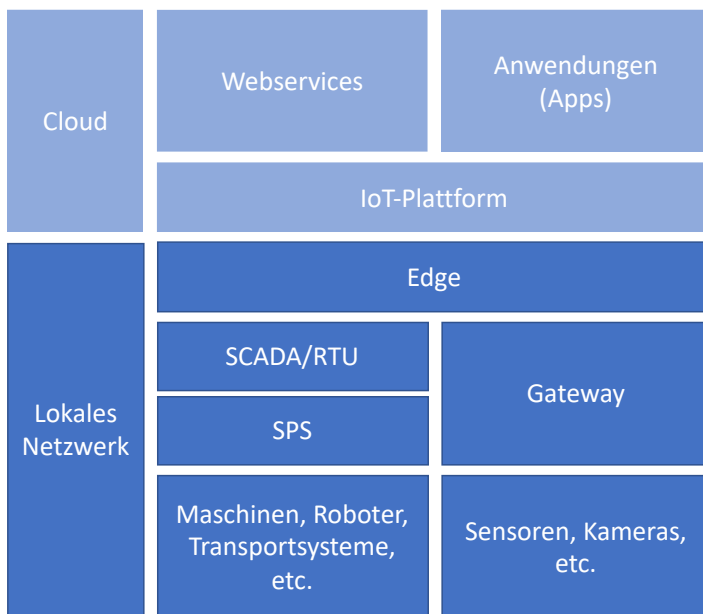


Abbildung 2.16 Serviceorientierte Architektur (eigene Darstellung in Anlehnung an Peschke & Eckardt, 2019, S. 17 und S. 79)

2.2.2.5. Cyber-Physische Systeme (CPS)

Cyber-Physische Systeme können als Weiterentwicklung der bisherigen mechatronischen Systeme betrachtet werden (Bauernhansl, et al., 2016, S. 11). Mechatronische Systeme, häufig auch als „Eingebettete Systeme“ oder „Embedded Systems“ bezeichnet, sind eine Kombination aus einem physischen (mechanischen) System und zusätzlichen elektronischen Elementen zur Steuerung oder Regelung, wie beispielsweise Sensoren, Aktoren, Software und Elektronik. Cyber-Physische Systeme verfügen über zusätzliche Schnittstellen zur drahtlosen oder drahtgebundenen Kommunikation mit der Umgebung über das Internet (vgl. Abbildung 2.17).

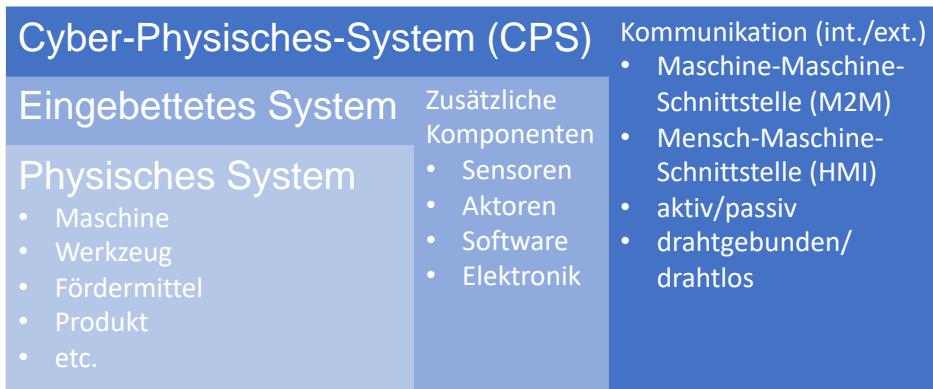


Abbildung 2.17 Elemente eines Cyber-Physischen Systems (CPS) (eigene Darstellung in Anlehnung an Peschke & Eckardt, 2019, S. 2 und Bauernhansl, et al., 2016, S. 18)

Dadurch ergeben sich einige wesentlichen Mehrwerte gegenüber bisherigen, rein mechanischen oder mechatronischen Systemen:

1. Interaktion mit der physischen Welt

Cyber-Physische Systeme sind in der Lage, auf Basis der erfassten oder erhaltenen Daten mit der physikalischen Welt zu interagieren (Gronau, 2014a, S. 280).

2. Ablaufoptimierung

Cyber-Physische Systeme ermöglichen die direkte Kommunikation untereinander, um Abläufe zu optimieren (ebd., S. 283), wie beispielsweise zwischen einem intelligenten Werkzeug (Werkzeug als CPS) und einer Werkzeugmaschine (Werkzeugmaschine als CPS), um den Werkzeugverschleiß bei der Produktion zu berücksichtigen (Bauernhansl, et al., 2016, S. 11).

3. Globale Vernetzung

Die erfassten Daten von Cyber-Physischen Systemen lassen sich auf übergeordneten Plattformen miteinander vernetzen, um dort weitere Services zu ermöglichen und global bereitzustellen (Bauernhansl, et al., 2016, S. 11), wie z.B. ein globales Produktionsmanagement, das lokale Anlagenverfügbarkeiten, Lagerbestände und Energiepreise berücksichtigt (Gronau, 2014a, S. 282).

2.2.2.6. Cyber Physische Produktionssysteme (CPPS)

Durch die Integration Cyber-Physischer Systeme in die Produktion entstehen Cyber-Physische Produktionssysteme (CPPS) mit Produktionsressourcen, die untereinander und auch mit smarten Produkten (Produkte mit CPS) kommunizieren und dadurch in der Lage sind, sich selbst zu konfigurieren und autonome Entscheidungen zu treffen (Bauernhansl, et al., 2016, S. 11). Dies ermöglicht die zur Beherrschung der wachsenden Komplexität wichtige Dezentralisierung und

Autonomie in der Produktion (Bauernhansl, et al., 2014, S. 17f.). Gronau (2018, S. 7f.) beschreibt weitere Effekte von Cyber-Physischen Systemen auf Produktionssysteme:

- die höhere Datenverfügbarkeit
- die bessere Rückkopplungsmöglichkeit
- einen höheren Grad der Individualisierung
- einen höheren Grad der Anpassungsfähigkeit durch „Self-X-Funktionen“, wie Selbstkonfiguration, Selbstorganisation und Selbstwartung
- die Verringerung der hierarchischen Planung und Steuerung der Produktion durch Selbstorganisation und verbesserte Reaktionsfähigkeit in Echtzeit

2.2.2.7. Digitale Schatten und digitale Zwillinge

Durch die oben beschriebene Überführung der realen Welt in die virtuelle Welt entsteht ein digitaler Schatten der realen Welt. Bauernhansl et al. (2016, S. 23) definieren den digitalen Schatten dabei als das „hinreichend genaue Abbild der Prozesse in der Produktion, der Entwicklung und angrenzenden Bereichen mit dem Zweck, eine echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten Daten zu schaffen“. Anhand der Daten des digitalen Schattens lassen sich Daten aus der Vergangenheit analysieren, aktuelle Daten untersuchen, Prognosen erstellen und konkrete Handlungsempfehlungen ableiten (ebd., S. 25).

Bei einem digitalen Zwilling handelt es sich um ein Modell eines Objekts (z.B. Produkt, Betriebsmittel, Prozess), das auf dem digitalen Schatten aufbaut und das dadurch „ein möglichst identisches Abbild der Realität“ liefert (ebd., S. 23). Digitale Zwillinge bilden damit die Grundlage für die Überwachung von Produkten oder Systemen hinsichtlich vorgegebener Kriterien, wie z.B. Instandhaltungszyklen bei Maschinen oder Qualitätsmerkmale bei Produkten (Peschke & Eckardt, 2019, S. 12).

2.2.2.8. Kommunikationsstandards

Für die Vernetzung und den Datenaustausch zwischen den Cyber-Physischen Systemen auf der Feldebene und übergeordneten IT-Systemen sind einheitliche Kommunikationsstandards erforderlich. Nachfolgend werden die wichtigsten Standards aufgeführt:

OPC Unified Architecture (OPC-UA)

OPC-UA wurde durch die Plattform Industrie 4.0 als der Quasi-Standard für die Kommunikation auf dem Shopfloor genannt (BITKOM e.V., et al., 2015, S. 40). OPC-UA bietet als M2M-

Kommunikationsprotokoll (Maschine-zu-Maschine) nicht nur die Möglichkeit, Maschinendaten bidirektional zu übertragen, sondern diese auch semantisch zu beschreiben (Peschke & Eckardt, 2019, S. 28).

MTConnect

MTConnect ist ein weit verbreitetes, auf XML und HTTP basierendes Kommunikationsprotokoll, das den lesenden (unidirektional) Datenaustausch zwischen Geräten auf der Feldebene und übergeordneten IT-Systemen ermöglicht. Damit ist das Steuern von Anlagen mit MTConnect nicht möglich (Gorecky, et al., 2017, S. 568).

MQTT

Das Message Queue Telemetry Transport (MQTT)-Protokoll ist ein Nachrichtenprotokoll, das sich durch seine einfache Struktur insbesondere für IoT-Anwendungen in drahtlosen Netzwerken immer mehr als Standard durchsetzt (Gorecky, et al., 2017, S. 569).

Industrie 4.0 Komponente (Verwaltungsschale)

Um aus einem beliebigen Gegenstand eine Industrie 4.0 Komponente zu machen, die sich mit anderen Industrie 4.0 Komponenten über eine einheitliche Semantik vernetzen lässt, wurde das Konzept der Verwaltungsschale geschaffen (vgl. Abbildung 2.18), die als virtuelle Repräsentation des Gegenstands dessen Daten hält und der Außenwelt in Form einer Industrie 4.0-konformen Kommunikation zur Verfügung stellt (BITKOM e.V., et al., 2015, S. 53). Damit soll jeder Gegenstand („Asset“), der mit einer Verwaltungsschale umgeben ist, während seines Lebenszyklus mit anderen Industrie 4.0-Komponenten kommunizieren können (BMW i, 2020, S. 12). So zum Beispiel eine Maschine, die ihren Status und ihre Ersatzteile für Wartungs- und Reparaturzwecke über ihre Verwaltungsschale an einen entsprechenden Serviceanbieter übergibt.

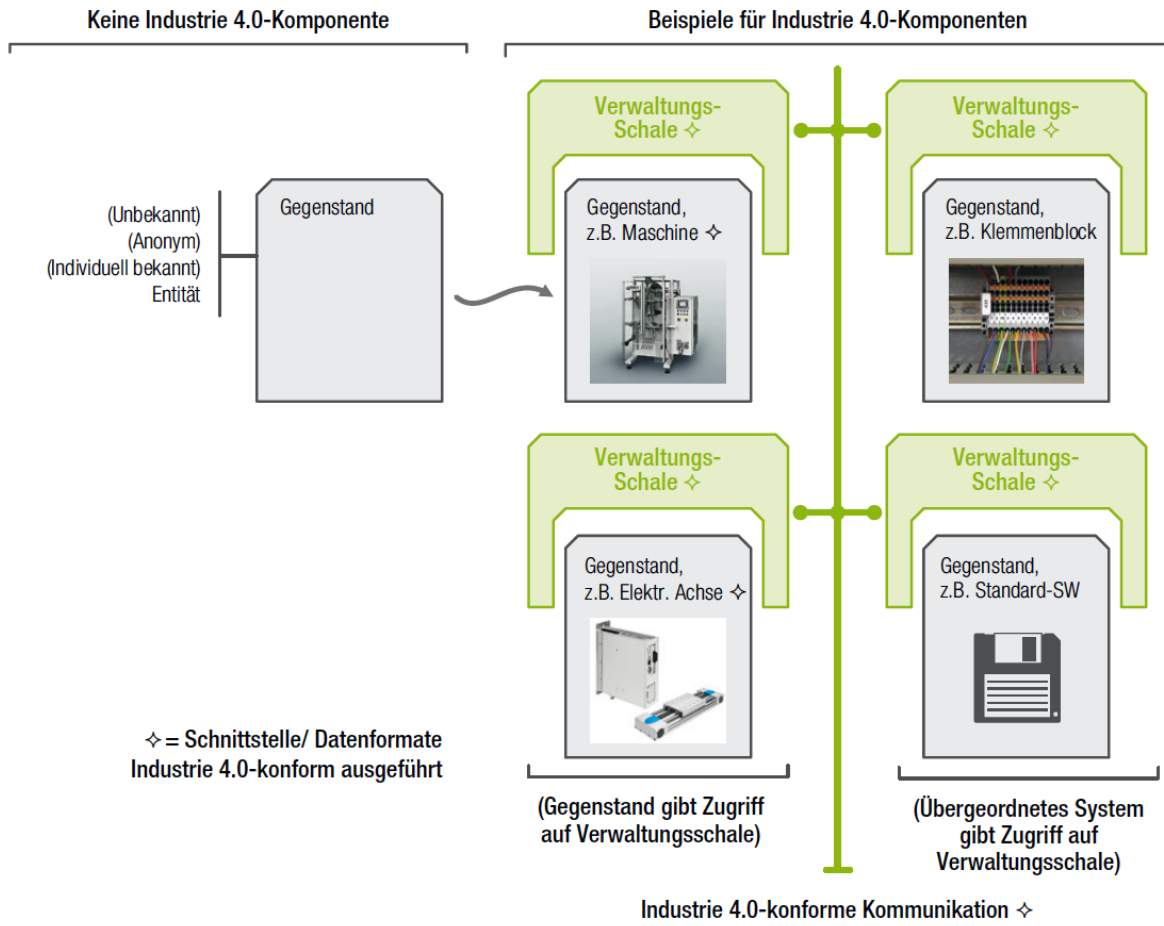


Abbildung 2.18 Industrie 4.0 Komponenten mit Verwaltungsschale (BITKOM e.V., et al., 2015, S. 54)

Je nach Art des Gegenstands, werden dessen Daten in verschiedenen standardisierten Teilmobellen beschrieben (BMW, 2020, S. 12). Bei „intelligenteren“ Gegenständen, wie z.B. Maschinen, kann die Verwaltungsschale durch den Gegenstand selbst bereitgestellt werden („Assetgehaltene Verwaltungsschale“), bei nicht intelligenten Produkten lässt sich deren Verwaltungsschale je nach Anwendung in der Cloud oder auf einer Edge-Komponente bereitstellen („Repositorygehaltene Verwaltungsschale“) (ebd., S. 13).

International Data Spaces (IDS) und Gaia-X

Unter dem Begriff International Data Spaces (IDS) entwickelt die International Data Spaces Association zusammen mit über 130 Unternehmen einen sicheren und branchenübergreifenden Datenraum als Basis für globale Internetplattformen, der sich gleichermaßen an Daten-Provider und an Daten-Consumer richtet (International Data Spaces e. V., 2021). Darauf aufbauend entsteht derzeit in einem Projekt die europäische Dateninfrastruktur Gaia-X, der sich bereits über 500 Organisationen angeschlossen haben. Gaia-X zielt darauf, Standards zu entwickeln und verschiedene dezentrale Cloud Plattformen zu vernetzen, um damit ein offenes, transparentes

und sicheres Ökosystem für die Datenwirtschaft zu schaffen (Gaia-X European Association for Data and Cloud AISBL, 2021). Bernhardt & Steininger (2021, S. 67) beschrieben im Kontext von Industrie 4.0 folgende Einsatzgebiete von Gaia-X:

- Vernetzung von Produktion, Edge und Cloud-Computing
- Verarbeitung von Rohdaten
- Erzeugung von Datenpools.

2.2.2.9. Assistenzsysteme für den Menschen

Aufgrund der immer variantenreicheren Produkte in Verbindung mit kürzeren Lebenszyklen verändert sich die Produktion zu einer „modernen, schnellen, variantenreichen Mixed-Modell-Produktion“ (Ellerbrock, 2015b, S. 604), in der die Menschen durch geeignete Methoden bei der Beherrschung der steigenden Komplexität der Informationen unterstützt werden müssen (ebd.). Moderne Informationstechnologie und der Einsatz vernetzter Cyber-Physischer Systeme können dazu beitragen, diese Komplexität auf das Wesentliche zu reduzieren, indem die Menschen bei ihren Aufgaben unterstützt und ihnen nur die wesentlichen und entscheidenden Informationen dargestellt werden (Dombrowski, et al., 2014). Bengler et al. (2017b, S. 57) unterscheiden zwischen kognitiven und physischen Assistenzsysteme für den Menschen. Während kognitive Systeme bei der Wahrnehmung der Arbeitsaufgabe und bei Entscheidungen assistieren, unterstützen physische Assistenzsysteme bei der eigentlichen Arbeitsaufgabe (vgl. Abbildung 2.19).

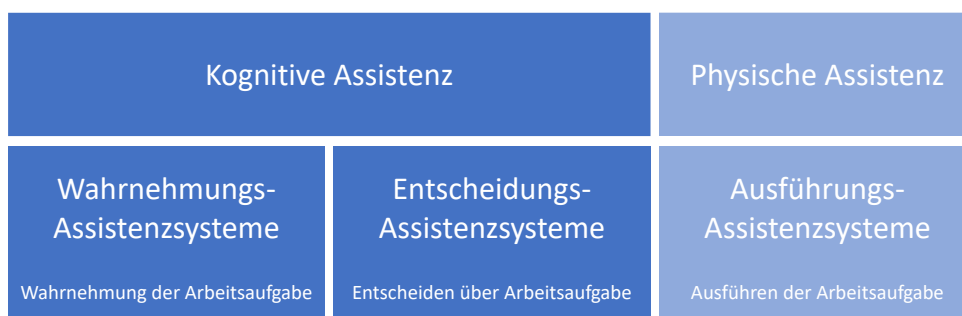


Abbildung 2.19 Arten der Assistenzsysteme für den Menschen (eigene Darstellung in Anlehnung an Bengler et al, 2017, S.57)

Nachfolgend werden die wichtigsten Technologien im Bereich der *kognitiven Assistenzsysteme* kurz dargestellt.

1. Augmented Reality (AR)

Unter Augmented Reality (AR) versteht man die „Ergänzung der menschlichen Sinneswahrnehmung der realen Welt um computergenerierte Elemente“ (Berndt, 2015, S. 85). Dabei werden dem Menschen auf unterschiedlichsten Geräten, wie z.B. kopfmontierten Geräten (Head Mounted Display HMD), Handgeräten (Handheld Devices HHD), Displays (Spatial Devices SD) oder Projektionsgeräten (Projection Devices PD) Informationen visualisiert, die er mit seinen rein physischen Sinnen nicht erhalten würde (Dalle Mura & Dini, 2020, S. 4-6). Typische Anwendungsgebiete der Technologie sind (ebd.):

- die Bereitstellung situationsangepasster Informationen und Arbeitsanweisungen für das Personal, z.B. Pick-By-Vision an einem Kommissionierarbeitsplatz (Richter, 2015a, S. 123)
- die Darstellung von Schulungsinhalten für unerfahrenes Personal
- die Remote-Unterstützung von Instandhaltungspersonal durch eingeblendete Wartungs- und Reparaturanleitungen
- Sonstige Anwendungen, wie beispielsweise die Echtzeit-Diagnose in der Fabrik oder im Bereich der Kollaboration und Kommunikation

2. Virtual Reality (VR)

Unter Virtual Reality (VR) versteht man eine Technologie, die es dem Menschen ermöglicht, mit einer virtuellen Welt zu interagieren (Gohla, 2015, S. 188). Zum „Eintauchen“ in die virtuelle Welt werden spezielle Geräte, wie Head Mounted Displays, Grobbildleinwände oder spezielle Cave Automatic Virtual Environment (CAVE) Umgebungen mit mehreren Projektoren benötigt sowie entsprechende Eingabegeräte, wie beispielsweise Datenhandschuhe, Flysticks oder eine Space Mouse benötigt (ebd.). Typische Anwendungsgebiete liegen im Bereich der Digitalen Fabrik, wo z.B. VR bei der Fabrikplanung die Begehung und Prüfung einer geplanten Anlage erlaubt, bevor sie real gebaut wird (Bracht, et al., 2011, S. 138).

3. Pick-by-Light und Pick-by-Voice

Handlungsanweisungen bzgl. der richtigen Materialauswahl bei Kommissionier- und Montageprozessen erfolgen häufig durch Signalleuchten (Pick-by-Light) bzw. Sprachanweisungen (Pick-by-Voice). Beide Lösungen werden jedoch zunehmend durch moderne Lösungen, wie Pick-by-Vision (s.o.) ersetzt (Richter, 2015a, S. 119).

4. Soziale Netzwerke / Social Media

Zu den kognitiven Assistenzsysteme können sicher auch industrielle Social Media Anwendungen gezählt werden. Durch die Vernetzung können hilfreiche Informationen, wie Maschinenstatus, Instandhaltungshinweise, Auftragsänderungen, Handlungsempfehlungen, etc. an die Menschen „gepostet“ werden und sie so bei der Wahrnehmung und Entscheidung unterstützen (Mayer & Pantförder, 2014, S. 488f.). Soziale Netzwerke fördern damit die interdisziplinäre Kommunikation zwischen verschiedenen Abteilungen und über Hierarchieebenen hinweg (Huber, et al., 2018, S. 51f.). Mit Funktionen, wie beispielsweise dem Schicht-Doodle, stimmen die Beschäftigten ihre Arbeitszeiten selbst ab (ebd.).

Zu den wichtigsten *physischen Assistenzsystemen* gehören:

1. Kollaborative Roboter (Cobots)

Bisherige Industrieroboter mussten aus Sicherheitsgründen durch mechanische oder optische Schutzeinrichtungen vom Menschen getrennt werden, wodurch die direkte Interaktion mit dem Roboter nur sehr eingeschränkt möglich war (Elkmann, 2015, S. 52f.). Kollaborative Roboter (Cobots) sind spezielle Industrieroboter, die in der Lage sind, mit dem Menschen in einem gemeinsamen Arbeitsraum ohne Trennwand zu interagieren (Gualtieri, et al., 2020, S. 106). Die Einsatzgebiete kollaborativer Roboter sind daher gemeinsame Arbeiten mit dem Menschen am selben Bauteil sowie monotone oder körperlich anstrengende Arbeiten (Peschke & Eckardt, 2019, S. 167).

2. Exoskelette

Exoskelette sind eine äußere Stützstruktur mit Antrieb, die den Menschen oder einzelne Körperteile, wie beispielsweise die Hand- oder Fußgelenke, bei der Verrichtung schwerer Arbeiten unterstützt (Richter, 2015a, S. 126). Häufig werden sie zur Entlastung bei Hebearbeiten über dem Kopf sowie zur Kraftunterstützung und Entlastung bei Bewegungsabläufen eingesetzt (Peschke & Eckardt, 2019, S. 169).

2.2.2.10. Identifikation und Ortung

Die eindeutige Identifikation physischer Objekte ist die Grundvoraussetzung, um deren Status digital zu erfassen (Bousonville, 2017, S. 16). Gleichzeitig ist die eindeutige Identifikation auch die Voraussetzung für mehr Transparenz in den Produktions- und Lieferketten. Mit mehr Transparenz kann die Effizienz und Planungssicherheit gesteigert werden, Lagerbestände minimiert werden und auf Bedarfsänderungen flexibel reagiert werden (Richter, et al., 2015b, S. 251). Zur

Auto-Identifikation (Auto-ID) und Ortung werden an den Objekten häufig optische Marker eingesetzt, wie eindimensionale Barcodes (Strichcode) oder zweidimensionale QR- bzw. Data-matrix Codes, die an festen Orten gescannt werden (z.B. Wareneingang).

In vielen Bereichen wird zur Identifikation und Ortung aber auch die Radio Frequency Identification (RFID) Technologie eingesetzt (ebd.). Sie bietet gegenüber den optischen Markern den Vorteil, dass mehrere Objekte gleichzeitig, automatisiert und ohne Sichtverbindung an RFID-Gates identifiziert werden können. Zusätzlich bietet die RFID-Technologie die Möglichkeit, auf den RFID-Transpondern kleine Mengen objektspezifischer Daten dezentral zu speichern, um den Objekten dadurch eine gewisse Intelligenz zu geben (Lieberoth-Leden, et al., 2017, S. 497).

Neben den oben beschriebenen Möglichkeiten der Objektverfolgung besteht auch die Möglichkeit, dass Objekte ihre Position mit Hilfe von Satellitennavigationssystemen, wie GPS, GLONASS oder Galileo (Bousonville, 2017, S. 19), oder 5G-basierter Indoor-Lokalisierung (Arnold, 2021) selbst bestimmen und mitteilen können.

Als Systematik für die eindeutige und globale Identifikation von Objekten haben sich die Standards der GS1-Organisation etabliert (Bousonville, 2017, S. 17). Diese umfassen die Global Location Number (GLN) zur Identifikation von Unternehmen, die Global Trade Item Number (GTIN) zur Identifikation von Produkten sowie den Serial Shipping Container Code (SSCC) zusammen mit der Nummer der Versandeinheit (NVE) zur Identifikation von Versandeinheiten (GS1, 2021).

2.2.2.11. Fahrerlose Transportsysteme (FTS)

Fahrerlose Transportsysteme (FTS) gewinnen in der Industrie immer mehr an Bedeutung (Zsifkovits, et al., 2020, S. 201) und werden heute bereits in fast allen Branchen eingesetzt (Ullrich, 2014, S. 1). Durch den Einsatz von FTS lassen sich „starre Produktionsstrukturen“ in den Fabriken auflösen und durch modulare, selbstorganisierende und mit FTS verkettete Produktionseinheiten ersetzen. Dies führt zu einer verbesserten Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der Produktion (Soder, 2014, S. 97). Die dezentrale Selbststeuerung des Materialfluss durch FTS bewirkt zudem ein robusteres Verhalten bei Störungen (Günthner, et al., 2014, S. 299).

In der Intralogistik werden die sich selbst steuernden Transportfahrzeuge nach Soder (2014, S. 97) insbesondere dann eingesetzt,

- wenn die Produktionseinheiten flexibel miteinander verkettet werden sollen,
- wenn die Transportbedarfe stark schwanken oder

- wenn (z.B. aus Platzgründen) keine dauerhafte Fördertechnik installiert werden soll.

Neben dem bereits etablierten Einsatz von FTS in der Intralogistik gibt es auch schon erste fahrerlose Ansätze im überbetrieblichen Materialtransport, so z.B. durch Drohnen, fahrerlose LKW und autonome Schiffe (Marks, 2021, S. 19-20).

2.2.2.12. Künstliche Intelligenz

Mit der zunehmenden Verfügbarkeit von Cyber-Physischen Systemen (CPS) und daraus gewonnenen Daten gewinnt auch das Thema der künstlichen Intelligenz (KI) immer mehr an Bedeutung. KI wird bereits als „die nächste Stufe der Digitalisierung“ bezeichnet (Winter, 2020, S. 8), die Wertschöpfungsketten, Geschäftsmodelle und Arbeitswelt radikal verändern wird. Eine im Auftrag des BMWI durchgeführte Studie prognostiziert bis 2023 eine zusätzliche Bruttowertschöpfung in Höhe von 31,8 Mrd. Euro (Seifert, et al., 2018, S. 5). Durchschnittlich haben der Studie zufolge ca. 15 Prozent der KMU bzw. 25 Prozent der Großunternehmen bereits KI-Technologien im Einsatz (ebd.).

Durch KI werden Maschinen (Computer) befähigt, ihr Verhalten auf Basis der durch die Interaktion mit der Umwelt gesammelten Erfahrungen zu verbessern (Schumacher, 2020, S. 25) (Winter, 2020, S. 8). In der Industrie wird derzeit hauptsächlich das sogenannte *Machine Learning* (ML) eingesetzt, bei dem der Computer durch ein eindimensionales neuronales Netz (vgl. Abbildung 2.20) mit einer verborgenen Zwischenebene aus Daten lernt (Weber & Seeberg, 2020, S. 11f.). Das *Deep Learning* (DL) unterscheidet sich vom Machine Learning (ML) durch mehrdimensionale Zwischenebenen, ähnlich dem menschlichen Gehirn (ebd.).

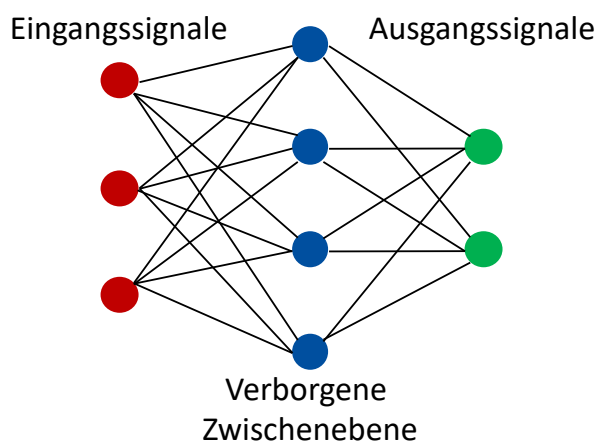


Abbildung 2.20 Eindimensionales neuronales Netz (Weber & Seeberg, 2020, S. 11)

Das maschinelle Lernen kann dabei auf drei verschiedene Arten erfolgen (Schumacher, 2020, S. 25f.); (Huber, 2020, S. 52):

- Beim *überwachten Lernen* lernt das System durch Vorgabe von Eingangs- und Ausgangssignalen.
- Beim *nicht überwachten Lernen* werden lediglich Eingangssignale vorgegeben, die das System durch Mustererkennung klassifiziert.
- Beim *bestärkenden Lernen* werden Eingangssignale vorgegeben und die vom System erzeugten Ausgangssignale bewertet.

Bei allen drei Arten des Lernens muss das System nicht explizit für die jeweilige Aufgabe programmiert werden (Schumacher, 2020, S. 25), was aus Sicht des Autors einen ganz wesentlichen Nutzen des maschinellen Lernens darstellt. Damit eignet sich das maschinelle Lernen insbesondere bei komplexen Wirkungszusammenhängen, „wenn die Zusammenhänge von Ursache und Wirkung analytisch nur schwer oder gar nicht beschreibbar oder auch unbekannt sind“ (Huber, 2020, S. 52). Mit den Fähigkeiten der KI in den Bereichen Anomalieerkennung, Klassifizierung, Prognose und Selbstorganisation und -optimierung ergeben sich nach Schumacher (2020, S. 26) die in Abbildung 2.21 dargestellten Anwendungsfelder in der Produktion.

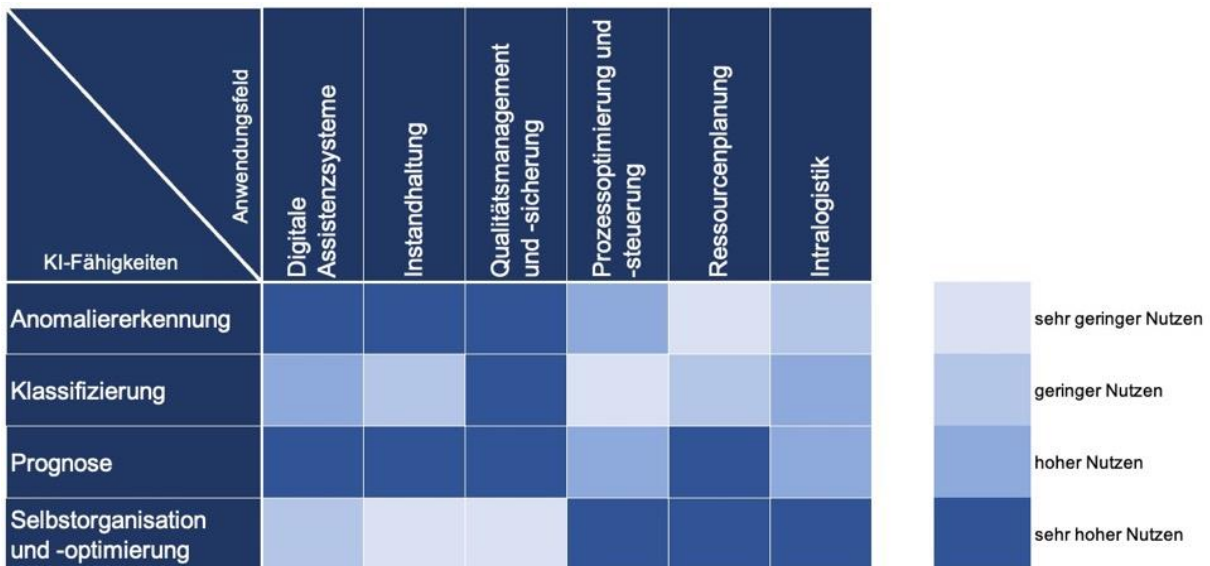


Abbildung 2.21 KI-Anwendungsfelder in der Produktion (Schumacher, 2020, S. 26)

Durch *Anomalieerkennung* lassen sich in Echtzeit Anomalien in Bildern, Tönen und sonstigen Daten erkennen, um schnell darauf reagieren zu können. Typische Anwendungsfelder sind digitale Assistenzsysteme, die Instandhaltung und die Qualitätssicherung. Die Fähigkeit zur *Klassifizierung* wird häufig in der Qualitätssicherung eingesetzt, um Produkte zu klassifizieren, aber

auch in Assistenzsystemen am Arbeitsplatz und in der Intralogistik zur Erkennung von Produkten bzw. Produktgruppen. Typische Anwendungsfelder der *Prognose* sind die prädikative Instandhaltung (Predictive Maintenance), die prädikative Qualitätssicherung (Predictive Quality) sowie die Ressourcenplanung und Fabriksteuerung, bei der sich durch die Prognose von Einflussfaktoren, wie Bedarfe, Rüstzeiten, Personal- und Maschinenverfügbarkeiten, die Reihenfolgen und die Qualität der Planung verbessern lassen (ebd.) (Gronau, 2019, S. 31). Auch im Bereich der *Selbstorganisation und -optimierung* gibt es mehrere Anwendungsfelder, so z.B. die autonome Feinplanung der Produktion, die autonome Steuerung von fahrerlosen Transportsystemen (FTS), die automatische Optimierung von Maschinen- und Prozessparametern, lernfähige Industrieroboter, lernende Assistenzsysteme bis hin zur Verbesserung des Wissensmanagements (Meier & Zoller, 2020, S. 78); (Schumacher, 2020, S. 27); (Winter, 2020, S. 9). Zusammenfassend kann KI als eine ideale Ergänzung zu Cyber-Physischen Systemen (CPS) gesehen werden, die dazu beiträgt, die Autonomie der einzelnen Systeme zu steigern und die Zusammenarbeit mit dem Menschen zu fördern (Gruhn, 2020, S. 17).

2.2.3. Smart Factory – Horizontale und vertikale Integration im Unternehmen

In ihren Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 hatten die Autoren der Plattform Industrie 4.0 vier Handlungsbereiche für produzierende Unternehmen (vgl. Abschnitt 1.1) beschrieben. Im Folgenden werden diese Bereiche sowie die daraus resultierenden Handlungsfelder der digitalen Transformation näher betrachtet:

- Abschnitt 2.2.3 Smart Factory – Horizontale und vertikale Integration im Unternehmen
- Abschnitt 2.2.4 Smart Supply Chain – Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke
- Abschnitt 2.2.5 Smart Products – Intelligente Produkte und Abbildung des Produktlebenszyklus
- Abschnitt 2.2.6 Neue Geschäftsmodelle – Datenbasierte Produkte und Services

Das Kernelement von Industrie 4.0 ist die „intelligente Fabrik (Smart Factory)“ (Kagermann, et al., 2013, S. 23) in der Menschen, Maschinen und sonstige Ressourcen miteinander vernetzt sind und sich weitestgehend autonom steuern, um dadurch die Komplexität besser zu beherrschen, weniger störanfällig zu sein und die Effizienz in der Produktion zu steigern (ebd.); (Peschke & Eckardt, 2019, S. 4).

Der Begriff „Smart Factory“ darf nicht verwechselt werden mit dem ebenfalls in der Literatur verwendeten Begriff „Digitale Fabrik“. In der Literatur gibt es zu beiden Begriffen mehrere auseinandergehende Definitionen. Bracht et al. (2011, S. 9), Himmler und Amberg (2013, S. 166f.) empfehlen für die „Digitale Fabrik“ die Begriffsdefinition gemäß der VDI Richtlinie 4499, die im Folgenden zugrunde gelegt wird. Die VDI Richtlinie 4499 unterscheidet zwischen der eigentlichen „Digitalen Fabrik“ und dem „Digitalen Fabrikbetrieb“ (vgl. Tabelle 2.6).

Digitale Fabrik	Digitaler Fabrikbetrieb
<p>„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und der dreidimensionalen Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.</p> <p>Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“</p>	<p>„Der Digitale Fabrikbetrieb bezeichnet die Nutzung und das Zusammenwirken von Methoden, Modellen und Werkzeugen der Digitalen Fabrik, die bei der Inbetriebnahme einzelner Anlagen, dem Anlauf mehrerer Anlagen und der Durchführung realer Produktionsprozesse eingesetzt werden.</p> <p>Ziele sind die Absicherung und Verkürzung des Anlaufs sowie die betriebsbegleitende und kontinuierliche Verbesserung der Serienproduktion. Dazu wird das dynamische Verhalten einzelner Produktionsanlagen und komplexer Produktionssysteme und -prozesse einschließlich der Informations- und Steuerungstechnik realitätsnah abgebildet. Virtuelle und reale Komponenten können dabei miteinander gekoppelt sein.</p> <p>Auf Basis eines durchgängigen Datenmanagements nutzt der Digitale Fabrikbetrieb die Ergebnisse der Produktionsplanung in der Digitalen Fabrik und stellt seinerseits Daten für operative IT-Systeme bereit. Bei der Nutzung in der Serienproduktion werden die Modelle laufend der Realität angepasst.“</p>

Tabelle 2.6 Definition Digitale Fabrik und Digitaler Fabrikbetrieb (VDI 4499)

Der Fokus der „Digitalen Fabrik“ liegt demnach hauptsächlich in den Bereichen der Produktentwicklung, Konstruktion, Produktionsplanung und Gestaltung der Fabrik (Bracht, et al., 2011, S. 12), während der Fokus des „Digitalen Fabrikbetriebs“ auf der Inbetriebnahme und dem Anlauf von Anlagen sowie auf der realen Produktion liegt (Dombrowski, et al., 2017, S. 171f.).

Unter „Smart Factory“ wird im Folgenden das gesamte produzierende Unternehmen verstanden, das neben der „Digitalen Fabrik“ auch den „Digitalen Fabrikbetrieb“ und die erforderlichen Querschnittsfunktionen, wie Produktionsplanung und -steuerung, Intralogistik, Instandhaltungsmanagement, Werkzeugmanagement und Qualitätsmanagement umfasst. Damit orientiert sich die Definition des Begriffs „Smart Factory“ auch an dem in Abschnitt 2.1.1 in Abbildung 2.1 vorgestellten IFU-Referenzmodell für Fabrikbetrieb, das zwischen Produktentstehungsprozess, Auftragsabwicklungsprozess und Querschnittsfunktionen unterscheidet.

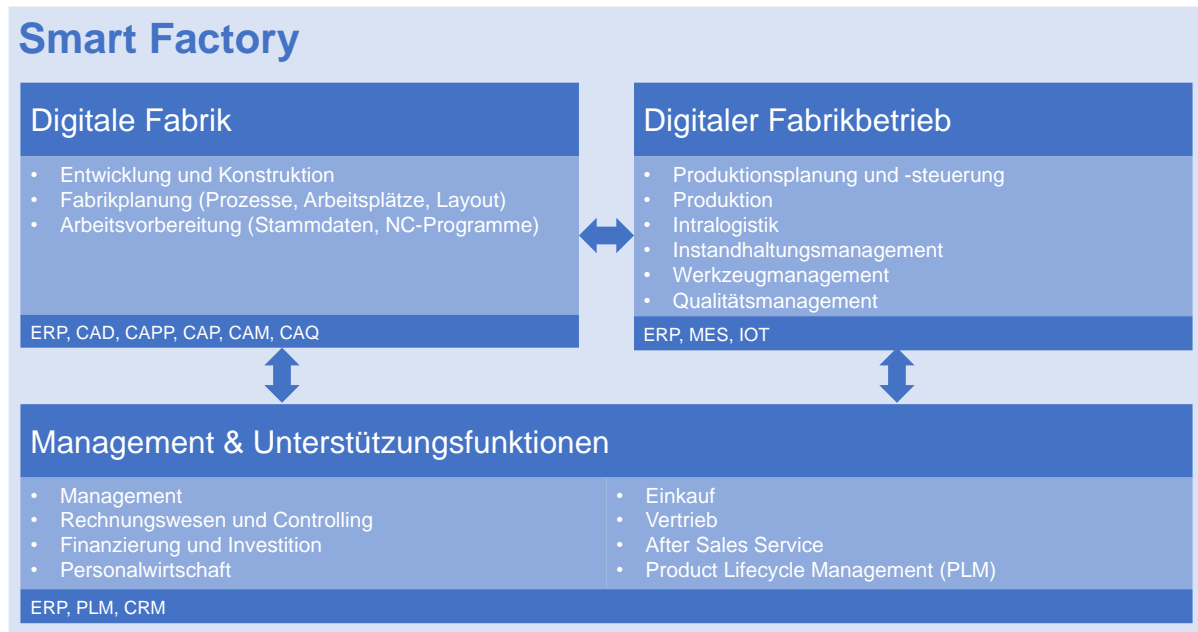


Abbildung 2.22 Smart Factory, eigene Abbildung in Anlehnung an VDI 4499 und IFU-Referenzmodell für Fabrikbetrieb (Dombrowski & Mielke, 2015a, S. 3)

In der *digitalen Fabrik* werden neue Produkte, die dazugehörigen Produktionsprozesse, Arbeitsplätze und Fabriklayouts entwickelt sowie die dazugehörigen Stammdaten und gegebenenfalls auch NC-Programme generiert. Hierzu werden verschiedene digitale Werkzeuge eingesetzt (Landherr, et al., 2013, S. 117f.) (Nittinger & Brecher, 2017, S. 343f.). Neue Artikel werden zunächst mit Hilfe von Computer Aided Design (CAD) entwickelt. Im nächsten Schritt erfolgt die Planung der Fertigungsprozesse mit Hilfe von Computer Aided Process Planning (CAPP) sowie die dazugehörige Arbeitsplanung mit Computer Aided Planning (CAP). Das Computer Aided Manufacturing (CAM) erzeugt aus den CAD-Daten die entsprechenden Numerical Control (NC) Programme zur Steuerung der Maschinen. Die für die Herstellung wichtigen Stammdaten, wie Arbeitspläne und Stücklisten, werden im ERP-System angelegt und verwaltet. Die Prüfplanung erfolgt mit Hilfe eines Computer Aided Quality (CAQ) Systems.

Der *digitale Fabrikbetrieb* wird zunächst durch ein ERP-System bei der Grobplanung der Produktion, bei der Verfügbarkeitsprüfung aller benötigten Ressourcen und Materialien sowie bei der Erzeugung von Fertigungsaufträgen unterstützt. Diese werden zur Auftragsdurchführung sowie zur Datenerfassung typischerweise an ein Manufacturing Execution System (MES) übergeben, wie in Abschnitt 2.1.3 dargestellt. Unterstützt wird der digitale Fabrikbetrieb durch neue Technologien, insbesondere durch die Möglichkeiten von Cyber-Physischen Systemen (CPS) im Internet of Things (IoT), wie in Abschnitt 2.2.2 dargestellt.

Die *Management- und Unterstützungsfunktionen*, wie Finanzwesen, Personalwirtschaft, Einkauf und Vertrieb werden typischerweise durch ein ERP-System unterstützt (vgl. Abbildung 2.4). Product Life Cycle Management (PLM) Systeme unterstützen während des gesamten Produktlebenszyklus bei der lokalen und standortübergreifenden Erfassung und Verwaltung der erzeugten Produktdaten (Boos & Zancul, 2012, S. 336); (Landherr, et al., 2013, S. 117). Das Beziehungsmanagement zu Kunden erfolgt typischerweise in einem Customer Relationship Management (CRM) System.

2.2.3.1. Horizontale und vertikale Integration

Die horizontale und vertikale Integration bilden die informationstechnische Grundlage der Smart Factory (Schuh, et al., 2017b, S. 18ff.). Kagermann et al. (2013, S. 24) beschreiben die *vertikale Integration* als „die Integration der verschiedenen IT-Systeme auf den unterschiedlichen Hierarchieebenen [...] zu einer durchgängigen Lösung“. Die Hierarchieebenen umfassen dabei alle Ebenen der Automatisierungspyramide – von der Sensor- und Aktorebene auf dem Shopfloor bis zur Unternehmensplanungsebene (vgl. Abschnitt 2.2.2.2). Durch die vertikale Vernetzung kann der Informationsfluss papierlos und damit deutlich reaktionsschneller gestaltet werden. Die vertikale Vernetzung ermöglicht aber auch die in Abschnitt 2.2.2.6 beschriebenen dezentralen, sich selbst organisierenden und selbst steuernden Cyber-Physischen Produktionssysteme (CPPS) (Schuh, et al., 2017b, S. 19). Schuh et al. (ebd.) sehen die vertikale Vernetzung daher auch als Basis für die horizontale Vernetzung.

Unter *horizontaler Integration* verstehen Kagermann et al. (2013, S. 24) „die Integration der verschiedenen IT-Systeme für die unterschiedlichen Prozessschritte der Produktion und Unternehmensplanung, zwischen denen ein Material-, Energie- und Informationsfluss verläuft, sowohl innerhalb eines Unternehmens (beispielsweise Eingangslogistik, Fertigung, Ausgangslogistik, Vermarktung) aber auch über mehrere Unternehmen (Wertschöpfungsnetzwerke) hinweg zu einer durchgängigen Lösung“. In Bezug auf die Smart Factory liegt der Fokus auf der innerbetrieblichen Vernetzung und damit auf der Synchronisierung der Prozessschritte im Unternehmen (Schuh, et al., 2017b, S. 18f.). Dazu gehören

1. die Prozesse der digitalen Fabrik („CAD-CAM-NC-Kette“) von der Erstellung eines 3D-Modells mit einem CAD-Programm in der Produktentwicklung bis zur Erstellung der entsprechenden NC-Programme mit einem CAM-System in der Arbeitsvorbereitung (Nittinger & Brecher, 2017, S. 343).

2. die Prozesse des digitalen Fabrikbetriebs im Rahmen der Auftragsabwicklung. Neben den (modularen) Produktions- und Planungsprozessen sind dies insbesondere die Prozesse in Intralogistik, Instandhaltung, Werkzeugmanagement und des Qualitätsmanagements (vgl. Abbildung 2.22).
3. die Prozesse im Management sowie Unterstützungsfunktionen, wie Finanzwesen, Personalwirtschaft, Einkauf und Vertrieb, die typischerweise durch ERP-Systeme unterstützt werden und dadurch in der Regel bereits miteinander vernetzt sind.
4. die Vernetzung aller drei zuvor genannten Bereiche durch die Integration von ERP-Systemen, PLM-Systemen und MES zu einer durchgängigen Lösung gemäß Landherr et al. (2013, S. 117) und Abbildung 2.14.

2.2.3.2. Modularisierte Produktion

Kürzer werdende Produktlebenszyklen sowie der Trend zu einer höheren Individualisierung von Produkten bis hin zu Losgröße 1 erfordern eine höhere Wandlungsfähigkeit der Produktion (vgl. Abschnitt 2.1.4). Diese lässt sich durch eine Modularisierung der Produktionseinheiten und Automatisierungseinheiten erreichen (Gorecky, et al., 2017, S. 557); (Peschke & Eckardt, 2019, S. 4). Dabei wird der Gesamtprozess in möglichst kleine, in sich abgeschlossene Funktionseinheiten aufgeteilt (Friedli & Schuh, 2012, S. 172), die nach je nach Bedarf eines Produkts beim Auftragsdurchlauf durchlaufen werden (Peschke & Eckardt, 2019, S. 84). Die einzelnen Module steuern sich dabei selbst unter Berücksichtigung der Ziele des Gesamtprozesses (Friedli & Schuh, 2012, S. 69). Die gegenüber anderen Fertigungsprinzipien (vgl. Abbildung 2.2) gesteigerte Wandlungsfähigkeit ergibt sich aus der „Fähigkeit zur Umkonfiguration“ der einzelnen Module sowie des darauf basierenden gesamten modularen Produktionssystems (Gorecky, et al., 2017, S. 557); (VDMA, 2018, S. 9).

2.2.3.3. Produktionsplanung und -steuerung

Die bisherige, *zentrale Produktionsplanung und -steuerung* im ERP-System zielt auf die zeitliche und inhaltliche Abstimmung der einzelnen Prozesse verschiedener Organisationseinheiten ab. Der Fokus liegt dabei auf der Erreichung der Gesamtziele einer Wertschöpfungskette und auf der Vermeidung von Suboptima in den einzelnen Bereichen (Schuh, et al., 2012, S. 302). Die Produktionsbereiche selbst sind dabei nicht in der Lage, auf Ereignisse, wie Auftragsänderungen oder Störungen zu reagieren. Aufgrund der geringen Reaktionsfähigkeit und des hohen Koordinationsaufwands gilt das Prinzip der zentralen Steuerung heute als veraltet (Reinhart & Niehues, 2017, S. 144).

Dezentrale Steuerungsprinzipien zielen hingegen darauf ab, in den einzelnen Organisationseinheiten durch kürzere Entscheidungswege und weniger Koordinationsaufwand flexibler und schneller auf Veränderungen zu reagieren (Schuh, et al., 2012, S. 301f.). Mit der Dezentralisierung der Entscheidungen wird die Autonomie der einzelnen Organisationseinheiten gesteigert (Reinhart & Niehues, 2017, S. 144). Gronau definiert den Begriff Autonomie dabei als „die Fähigkeit einer Einheit, ihre eigenen Handlungen zu strukturieren und ihre Umgebung unabhängig und ohne ungewünschten Einfluss von außen zu beeinflussen“. Ein Beispiel für eine solche dezentrale und autonome Steuerung ist das bereits vielfach etablierte, selbststeuernde Kanban-Prinzip (Reinhart & Niehues, 2017, S. 144). Durch die Fähigkeit Cyber-Physischer Systeme, miteinander zu kommunizieren und auf Basis der erhaltenen Informationen selbständig Entscheidungen vorzubereiten und auszuführen, haben dezentrale und autonome Steuerungsprinzipien gegenüber zentralen Steuerungsprinzipien an Bedeutung gewonnen (Reinhart & Niehues, 2017, S. 143); (Gronau, 2018, S. 8). Die im Kontext der dezentralen Steuerung auch in der Literatur beschriebenen Multiagentensysteme (MAS) basieren auf Softwareagenten, die Elemente der Produktion repräsentieren und zur Steuerung miteinander interagieren (Reinhart & Niehues, 2017, S. 144). Sie werden jedoch als Vorgänger der Cyber-Physischen Systeme betrachtet, da sie lediglich eine „abstrakte Repräsentation“ der realen Elemente darstellen und auch nicht über Aktoren verfügen (Gronau, 2018, S. 9f.). Es wird erwartet, dass Cyber-Physische Systeme zunehmend Routineaufgaben und Entscheidungen übernehmen werden und der Mensch lediglich im Fall von Störungen eingreifen wird (Gronau, 2018, S. 8). Gronau (ebd.) vermutet auch, dass der Bedarf an zentralen Planungsansätzen durch die zunehmende Autonomie zurückgehen wird.

Hybride Steuerungsprinzipien kombinieren die Vorteile der zentralen und dezentralen Steuerungsprinzipien. So kann beispielsweise die Grobplanung einer Produktion über alle Organisationseinheiten hinweg zentral erfolgen, während die eigentliche Produktionsausführung dezentral in Echtzeit feingesteuert wird (Reinhart & Niehues, 2017, S. 144).

2.2.3.4. Intralogistik

Auch in einer Smart Factory geht es bei der Intralogistik grundsätzlich um die Bereitstellung des richtigen Materials in der richtigen Menge zur richtigen Zeit beim richtigen Empfänger zu den richtigen Kosten, der Fokus liegt jedoch auf dem Einsatz neuer Technologien zur Verbesserung logistischer Kennzahlen (Lieberoth-Leden, et al., 2017, S. 451). Zudem muss die Logistik als Bindeglied in Produktionsnetzwerken mindestens die gleiche Flexibilität und Wandelbarkeit aufweisen, wie die entsprechenden Produktionssysteme (Günthner, et al., 2014, S. 321).

Gefragt sind daher auch in der Intralogistik intelligente Transportsysteme für den Transport von Aufträgen zwischen einzelnen Prozessschritten innerhalb der Fabrik (Peschke & Eckardt, 2019, S. 86). Lieberoth-Leden et al. (2017, S. 452) und Günthner et al. (2014, S. 298) sprechen auch von einer „kognitiven Logistik“, die mit ihrer Intelligenz in der Lage ist, Rückschlüsse aus Daten zu ziehen, zu lernen und Entscheidungen zu treffen.

Typische Anwendungsgebiete neuer Technologien in der Intralogistik sind

1. Intelligente Ladungsträger

Neben modernen Technologien zur Identifikation und Ortung (vgl. Abschnitt 2.2.2.10) von Ladungsträgern bieten „intelligente“, mit Sensoren (z.B. Temperatur) ausgestattete Behälter neue Möglichkeiten der Prozesssteuerung (Lieberoth-Leden, et al., 2017, S. 454).

2. Assistenzsysteme für Beschäftigte in der Intralogistik

Der Mensch wird auch künftig noch in der Intralogistik erforderlich sein (Lieberoth-Leden, et al., 2017, S. 476) insbesondere im Bereich der manuellen Kommissionierung oder dem manuellen Transport (z.B. mit Gabelstapler). Allerdings kann er dabei in der Smart Factory durch kontextabhängige Informationen unterstützt werden, wie z.B. Augmented Reality (AR), Pick-by-Voice oder Pick-by-Vision (vgl. Abschnitt 2.2.2.9).

3. Wandelbarkeit des Materialflusssystems

Aufgrund der Modularisierung in der Produktion zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit (vgl. Abschnitt 2.2.3.2) ist auch in der Intralogistik mit „wechselnden und dynamischen Materialflussrelationen“ zu rechnen (Lieberoth-Leden, et al., 2017, S. 484). Daraus folgt, dass ein Materialflusssystem (Fördertechnik und Steuerung) ebenfalls modularisiert werden muss, um die Anforderungen seine Wandelbarkeit zu erfüllen (ebd.). In diesem Zusammenhang gewinnt der Einsatz von fahrerlosen Transportsystemen (FTS) zunehmend an Bedeutung (vgl. Abschnitt 2.2.2.11).

2.2.3.5. Instandhaltungsmanagement

Aufbauend auf den bereits etablierten Instandhaltungsfunktionalitäten von Manufacturing Execution Systemen (MES) (vgl. Abschnitt 2.1.3) erweitern sich die Funktionalitäten im Instandhaltungsmanagement der Smart Factory durch den Einsatz neuer Technologien. Gleichzeitig wachsen aber auch durch die technisch komplexer werdenden Maschinen und Anlagen die Anforderungen an die Instandhaltung. Als Ansatzpunkte für Verbesserungen des Instandhaltungsmanagements durch neue Technologien, insbesondere durch den Einsatz von Cyber-Physischen Systemen (CPS), sehen Lucke et al. (2017, S. 77):

1. Die Verfügbarkeit von Instandhaltungsrelevanten Informationen, wie z.B. die Zustandsdaten kritischer Komponenten.
2. Eine verbesserte, kontextbezogene Informationsbereitstellung für den Menschen.
3. Assistenz bei der Instandhaltungsplanung und -ausführung.

Auf Basis eines Condition Monitorings (CM), bei dem echtzeitbasierte Zustandsdaten (z.B. Temperaturen, Schwingungen) aus den zu überwachenden Betriebsmitteln oder aus entsprechender Sensorik erfasst werden, lassen sich zustandsabhängige Instandhaltungsstrategien etablieren, die gegenüber der periodisch vorbeugenden Instandhaltung oder der reaktiven Instandhaltung zu deutlich geringeren Ausfallzeiten führen (Ryll & Freund, 2010, S. 27ff.). Eine weitere Verbesserung ergibt sich durch eine vorausschauende (prädikative) Instandhaltungsstrategie (Predictive Maintenance), bei der durch entsprechende Datenanalysen eventuelle sich anbahnende Störungen erkannt und Prognosen bezüglich zu erwartender Wartungsarbeiten erstellt werden können (ebd.). Bei der präskriptiven Instandhaltung (Prescriptive Maintenance) können auf Basis der Datenanalyse mögliche Lösungswege vorausgesagt werden, die zur Störungsvermeidung beitragen.

2.2.3.6. Werkzeugmanagement

Die Trends zu kundenindividuellen Produkten und kürzeren Produktlebenszyklen erhöhen die Werkzeugvielfalt und damit auch die Häufigkeit von Werkzeugwechseln, wodurch die Anforderungen an ein geeignetes Werkzeugmanagement in der Smart Factory steigen (Schaupp, et al., 2017, S. 334f.).



Abbildung 2.23 Werkzeugmanagement 4.0 (eigene Darstellung in Anlehnung an Schaupp et al., 2017, S. 334)

Während der in Abbildung 2.23 dargestellte typische Werkzeugkreislauf bisher jeweils durch Inselsysteme ohne geeignete Schnittstellen unterstützt wurde, erfordert das moderne Werkzeugmanagement in der Smart Factory in Anlehnung an Schaupp et al. (ebd.):

- einen durchgängigen Informationsfluss mit eindeutiger Identifizierung (z.B. RFID oder Data Matrix Code) des Werkzeugs
- die Erfassung des aktuellen Orts des Werkzeugs
- die Erfassung und Bereitstellung relevanter Daten (je nach Werkzeugart z.B. Verschleiß, Temperatur, Einsatzzeit, Stückzähler)
- Integration in übergreifende Systeme (je nach Werkzeugart z.B. Werkzeugverwaltung im ERP-System, Werkzeugeinsatzplanung im MES)

2.2.3.7. Qualitätsmanagement

Qualitätsdaten fallen nicht nur in der Produktion an, sondern während des gesamten Lebenszyklus eines Produktes (Brüggemann & Bremer, 2015, S. 218f.). In der Entwicklung und Konstruktion werden Prüfpläne für die zu prüfenden Produkte erstellt. Bereits im Wareneingang erfolgt eine Qualitätsprüfung des eintreffenden Materials der Lieferanten. In der Produktion werden weitere Qualitätsdaten gemäß Prüfplan in Form einer statistischen Prozesskontrolle

(Statistical Process Control - SPC) erfasst und überprüft, darüber hinaus gibt es häufig weitere Zwischen- und Endprüfungen, bevor die Ware zum Kunden geht (ebd.).

Die Trends zu kundenindividuellen Produkten, zu kürzeren Produktlebenszyklen und zu individuellen Prozessabläufen in der Produktion (vgl. Abschnitt 2.2.3.2) erzeugen auch eine Individualisierung und damit eine höhere Komplexität im Qualitätsmanagement (Schmitt, et al., 2016, S. 23). So führt in der Serienproduktion die Beseitigung der Hauptfehlerursachen beispielsweise zu einer Verbesserung der Qualität, während das bei einer individualisierten Produktion nicht zwangsläufig so ist. Aus den individuellen Produktionsabläufen resultieren vielmehr qualitätsbeeinflussende Wechselwirkungen (ebd.). Schmitt et al. (2016, S. 26ff.) empfehlen daher zur Überwachung der Prozesse in der Smart Factory eine datenbasierte Qualitätsregelung, bei der Qualitätsdaten, Auftragsdaten, Prozessdaten und Produktdaten produktbezogen erfasst und überwacht werden, wodurch die Produkte selbst „Signale zur Prozesssteuerung“ aussenden könnten. Teilweise ist eine solche produktbezogene Datenvernetzung bereits heute durch die Integration der Daten von ERP, PLM und MES möglich (vgl. Abschnitt 2.2.3.1), weitere Möglichkeiten ergeben sich durch Einbindung intelligenter Sensorik und Aktorik von Cyber-Physischen Systemen (CPS). Die Echtzeitverfügbarkeit qualitätsrelevanter Daten sowie die produktbezogene Vernetzung dieser Daten ermöglichen darüber hinaus mit Hilfe entsprechender Prognoseverfahren eine prädiktive und präskriptive Analyse und Ableitung von Maßnahmen (Curry, et al., 2021, S. 130). Der Mensch in der Produktion oder Qualitätssicherung kann durch die in Abschnitt 2.2.2.9 dargestellten Assistenzsysteme bei der Fehlervermeidung (z.B. kontextbezogene Arbeitsanweisungen), Fehlererkennung (z.B. Fehlervisualisierung durch Augmented Reality) und Fehlerbeseitigung (z.B. durch fehlerbezogene Handlungsanweisungen) unterstützt werden.

2.2.3.8. Der Mensch in der Smart Factory

Während man in den Phasen Industrie 1.0 bis Industrie 3.0 versuchte, den Menschen bei sich wiederholenden Tätigkeiten durch Maschinen, Automatisierungstechnik und CIM-Ansätze (vgl. Abschnitt 2.2.1) zu ersetzen und dadurch die Produktivität zu steigern (Bengler, et al., 2017a, S. 51); (Spath, 2013, S. 129), steht der Mensch bei Industrie 4.0 im Mittelpunkt. Bezeichnungen wie „Führende Entscheidungsinstanz“ (Spath, 2013, S. 129) oder „Dirigent der Wertschöpfung“ (BITKOM e.V., et al., 2015, S. 48) stehen für die veränderte Rolle des Menschen in der Smart Factory.

In dem sozio-technischen System der Smart Factory ist nicht mehr nur der Mensch in der Lage, Entscheidungen zu treffen, sondern auch die Technik. Daraus ergeben sich veränderte Rollen,

Aufgaben, Organisationsformen und Formen der Beschäftigung (Gronau & Ullrich, 2019, S. 472f.). Laut Müller & Riedel (2014, S. 211) sollten der Mensch so in die Smart Factory eingebunden werden, dass er als Wissensträger mit seinen Stärken in den Bereichen Prognoseerstellung, Heuristiken, Soft Skills, Verhandlung, etc. optimal eingesetzt und unterstützt wird. Gorecky et al. (2014, S. 527) sehen die neue Rolle des Menschen in der übergeordneten Festlegung der Produktionsstrategie, in der Überwachung der Umsetzung dieser Strategie sowie bei Bedarf auch im Eingreifen in das Produktionssystem. Durch diese koordinierenden Tätigkeiten sei zu erwarten, dass die Anforderungen hinsichtlich der Koordinationsfähigkeit, der Teamfähigkeit und der Flexibilität an den Menschen steigen, er würde jedoch durch Assistenzsysteme bei seiner koordinierenden und gegebenenfalls auch physischen Arbeit unterstützt werden (Vernim, et al., 2017, S. 63). Wichtig sei laut Vernim et al. (ebd.), dass die Beschäftigte das vernetzte System und die Zusammenhänge der Smart Factory wenigstens in Grundzügen verstehen. Hierzu bedarf es geeigneter Qualifizierungsstrategien für eine lebenslange Weiterbildung (Gronau & Ullrich, 2019, S. 473); (Gorecky, et al., 2014, S. 527), auf die in Abschnitt 2.2.3.9 eingegangen wird.

Veränderungen auf der operativen Ebene

Bezogen auf die operative Ebene sieht Hirsch-Kreinsen (2015, S. 91f.) im Wesentlichen folgende Veränderungen:

1. Die Substitution von Arbeitsplätzen mit einfachen, sich wiederholenden Tätigkeiten mit niedrigen Qualifikationsanforderungen durch die Technik.
2. Die „Dequalifizierung“ der bisher qualifizierten Facharbeiterebene, da ihre bisherigen Tätigkeiten, wie Maschinenbedienung und -einstellung, automatisiert werden können. Übrig blieben nur die schwer zu automatisierenden Tätigkeiten, wie beispielsweise komplexe Rüstvorgänge, schwierige Materialzuführungen oder manuelle Produktionsvorgänge.
3. Eine „Qualifikationsaufwertung und Tätigkeitsanreicherung“ aufgrund der gestiegenen Komplexität in der Smart Factory, die ein breites „Überblickswissen“ und soziale Kompetenzen zur Interaktion mit anderen Bereichen erfordert.

Während die physische Beanspruchung in der Smart Factory durch die Mensch-Maschine-Kooperation und die steigende Automatisierung sinken wird, gehen Dombrowski et al. (2014, S. 145) davon aus, dass die Beanspruchung der Sinnesorgane sowie die emotionale und mentale Beanspruchung durch kurzfristig wechselnde Tätigkeiten, mehr Entscheidungsbefugnis und flexiblen Personaleinsatz steigen werden.

Veränderungen in den indirekten Bereichen

In den indirekten Bereichen werden im Wesentlichen folgende Veränderungen gesehen (Hirsch-Kreinsen, 2015, S. 92f.); (Dombrowski, et al., 2014, S. 140):

1. Ein „Dezentralisierungsschub“ und ein Hierarchieabbau, die daraus resultieren, dass sich in der Smart Factory die Bereiche auf der operativen Ebene zunehmen selbst organisieren und damit bisherige Planungs- und Steuerungsaufgaben „nach unten“ verlagert werden.
2. Die Vereinfachung bzw. Substitution von Aufgaben der indirekten Bereiche durch Automatisierung.
3. Teilweise neue Aufgaben, wie z.B. das „trouble shooting“, das zudem interdisziplinäres Wissen erfordert.

2.2.3.9. Wissens- und Kompetenzmanagement

Die vielfältigen Veränderungen durch die Digitalisierung und die angestrebte hohe Wandlungsfähigkeit erzeugen bei den Beschäftigten in der Smart Factory einen erheblichen Weiterbildungsbedarf (Schenk, et al., 2014, S. 45f.) (Gronau & Ullrich, 2019, S. 482). Die einmalig in der Ausbildung gewonnenen Kompetenzen werden künftig nicht mehr ausreichen, um mit dem schnellen technologischen Fortschritt mithalten zu können (Gronau & Ullrich, 2019, S. 482f.). Aber auch die bisherigen Weiterbildungsangebote und Lehrmethoden, die überwiegend Standardwissen außerhalb des Fertigungsbetriebs vermitteln, erfüllen nicht mehr die Anforderungen an den künftigen Wissens- und Kompetenzbedarf (Deuse, et al., 2015, S. 103); (Gronau & Ullrich, 2019, S. 482f.). Erforderlich seien mitarbeiterspezifische „prozessnahe und prozessintegrierte Weiterbildungsformen“ (Gronau & Ullrich, 2019, S. 482), die in kurzen Zeitintervallen während des Fabrikbetriebs erfolgen (Schenk, et al., 2014, S. 46) und das in der Smart Factory geforderte „interdisziplinäre Verständnis“ (Gorecky, et al., 2014, S. 541) schaffen.

Spath et al. (2016, S. 54) betonen, dass die Weiterbildung eine Kompetenzentwicklung sein sollte, die sich am besten in den betrieblichen Prozessen anhand von neuen Aufgaben entwickeln ließe. Hierzu bedarf es lernförderlicher Arbeitsumgebungen, die durch die Art der Informationsbereitstellung und der Lernmethodik die Lernprozesse begünstigen (Kampker, et al., 2015, S. 80) (Schenk, et al., 2016, S. 131f.) (Mühlbradt, et al., 2018, S. 196f.).

Zu den wichtigsten benötigten Kompetenzen gehören in Anlehnung an (Dombrowski, et al., 2014, S. 145); (Prinz, et al., 2016, S. 114) und (Spath, et al., 2016, S. 52f.):

Kompetenzart	Kompetenzen
Fach- und Methodenkompetenz	Breites, interdisziplinäres Fachwissen (Produktion, Elektrotechnik, IT, Prozesse, Organisation, Methoden, Integration)
	Überwachung und Problemlösung
	Urteilsvermögen
Personale Kompetenzen	Eigenverantwortung
	Ganzheitliches Denken
Sozial-kommunikative Kompetenzen	Kommunikationsfähigkeit (Mensch-Mensch und Mensch-Maschine)
	Kooperation in interdisziplinären Teams
	Anpassungsfähigkeit

Tabelle 2.7 Kompetenzbedarf in der Smart Factory (eigene Darstellung in Anlehnung an Dombrowski et al, 2014, S. 145 Prinz et al., 2016, S. 114 und Spath et al., 2016, S. 52f.)

Deuse et al. (2015, S. 103) sprechen in diesem Zusammenhang auch von einer „Systemkompetenz“, die die Beschäftigten erlangen müssten. In dem sich ständig ändernden Arbeitsumfeld der Smart Factory müsse diese ständig geprüft und gegebenenfalls angepasst werden (ebd.). Die Grundlage hierfür sind mitarbeiterbezogene Kompetenzprofile (Soll und Ist), die auf einer eigenen oder fremden Beurteilung basieren können (Kreggenfeld, et al., 2016, S. 34).

Um das Wissen in der Smart Factory systematisch nutzbar zu machen, bedarf es eines gezielten Wissensmanagements zur Analyse, Digitalisierung, Verknüpfung, Verteilung und Visualisierung des vorhandenen Wissens (Kreggenfeld, et al., 2016, S. 32); (Gronau, 2020b, S. 79-82). Kreggenfeld et al. (ebd.) und Gronau (ebd.) weisen darauf hin, dass dabei neben dem Menschen künftig auch Cyber-Physische Systeme (CPS) mit ihrer Fähigkeit zur Verarbeitung und Vernetzung von Informationen als Wissensträger zu berücksichtigen sind. Wissensmanagementsysteme (WMS) können Unternehmen bei diesen Aufgaben unterstützen und damit das Wissen in der Smart Factory nutzbar machen (Hänsch & Endig, 2010, S. 279-281); (Kreggenfeld, et al., 2016, S. 34); (Gronau, 2020b, S. 79-82).

2.2.3.10. Big Data Analyse

Mit der Digitalisierung steigt auch die Menge der verfügbaren Daten in der Smart Factory. Unter dem Begriff „Big Data“ werden Massendaten verstanden, „die mit den klassischen Analyseverfahren nicht mehr verarbeitet und analysiert werden können“ (Schuh, et al., 2016, S. 49). Daher bedarf es in Ergänzung zu bestehenden Informationssystemen geeigneter Anwendungen

und Technologien, die in der Lage sind, umfangreiche Datenanalysen durchzuführen und die Zusammenhänge der Daten zu erkennen (ebd.). Solche Big Data Analyse Technologien schaffen neue Möglichkeiten für die Business Intelligence (BI) Ansätze im Unternehmen und damit auch weitere Möglichkeiten zur Verbesserung des Geschäftserfolgs (Sun, et al., 2015, S. 200). Zu den wesentlichen Funktionen der Big Data Analysen gehören (Sun, et al., 2015, S. 202); (Appelfeller & Feldmann, 2018, S. 92):

1. Die *deskriptive Analyse* zur Klärung, was gerade passiert bzw. was passiert ist.
2. Die *prädikative Analyse* zur Vorhersage, was voraussichtlich passieren wird und warum es passieren wird, so z.B. die Vorhersage von Trends.
3. Die *präskriptive Analyse* zur Vorhersage von Handlungsempfehlungen, was getan werden sollte, um ein vorgegebenes Ergebnis zu erreichen bzw. um ein Problem zu vermeiden.

Sun et al. (2015, S. 206) schlagen Unternehmen die Einführung einer „Big Data Analytics Services Oriented Architecture (BASOA)“ vor, mit den Rollen „Big data analytics service requester“ (Nachfrager), „Big data analytics service broker“ (Makler) und „Big data analytics service provider“ (Anbieter).

2.2.3.11. Integrierte Betrachtung von Mensch, Technik und Organisation

Im wissenschaftlichen Diskurs besteht Übereinstimmung darin, dass die Transformation von Unternehmen in Richtung Smart Factory einen ganzheitlichen Ansatz erfordert, bei dem die drei sozio-technischen Dimensionen Mensch, Technik und Organisation (MTO) gleichermaßen berücksichtigt werden (Block, et al., 2015, S. 657); (Hirsch-Kreinsen, 2018, S. 21); (Leineweber, et al., 2018, S. 24); (Gronau & Ullrich, 2019, S. 486). Nur so könnte die Komplexität der bestehenden Prozesse richtig verstanden, die drei Dimensionen bei der Transformation optimal aufeinander abgestimmt und damit Suboptima und Fehlschlüsse vermieden werden. Bei der Transformation seien jedoch nicht nur die drei „Teilsysteme“ Mensch, Technik und Organisation zu einem „soziotechnischen Gesamtsystem“ abzustimmen, sondern auch die jeweiligen Schnittstellen zwischen diesen Teilsystemen (Bengler, et al., 2017b, S. 55) (Hirsch-Kreinsen, 2018, S. 23). Abbildung 2.24 zeigt das gesamte sozio-technische System bestehend aus den Dimensionen Mensch (M), Technik (T) und Organisation sowie den Schnittstellen Mensch-Technik (MT), Mensch-Organisation (MO) und Technik-Organisation (TO).

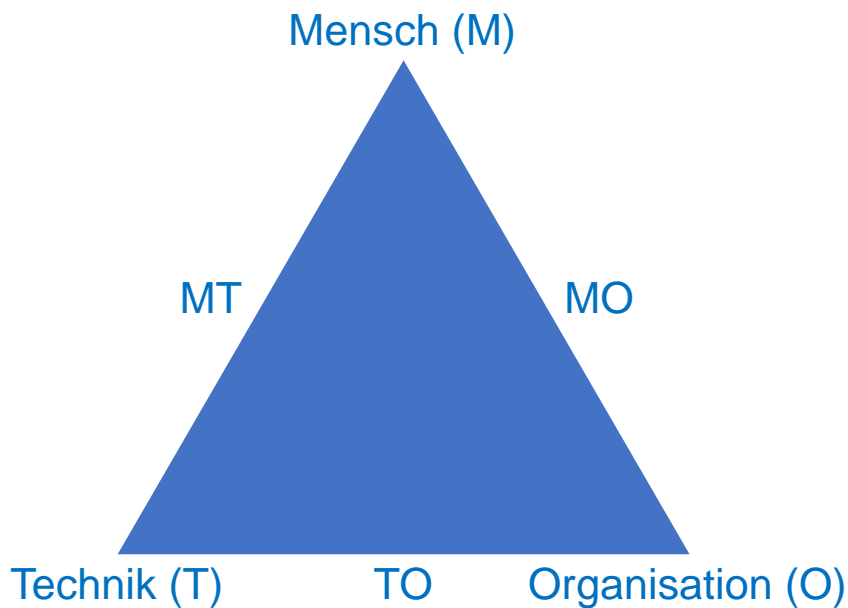


Abbildung 2.24 Smart Factory als sozio-technisches System (eigene Darstellung in Anlehnung an Abel & Wagner, 2017, S. 135)

Die *Dimension Mensch (M)* umfasst alle für die direkte (z.B. Montage) und indirekte Leistungserstellung (z.B. Produktionsplanung) zuständigen Beschäftigten (Block, et al., 2015, S. 658) mit ihren Fähigkeiten, Fertigkeiten und Kenntnissen (Gronau, 2014a, S. 280); (Digmayer, et al., 2021, S. 45).

Die *Dimension Technik (T)* umfasst alle physischen Elemente, „die im Zusammenhang mit der betrieblichen Produktion oder administrativen Aufgabe stehen“ (Block, et al., 2015, S. 658). In der Smart Factory gehören hierzu die Fabrikhülle bzw. der Raum, Betriebs- und Prüfmittel, Transport- und Lagermittel, Automatisierungstechnik, Software (vgl. Tabelle 2.1) sowie Cyber-Physische Systeme (CPS), Roboter und Assistenzsysteme (Hirsch-Kreinsen, et al., 2018, S. 182).

Die *Dimension Organisation (O)* umfasst alle „nicht-physischen Elemente auf allen Unternehmensebenen, die zur Strukturierung und Regelung der Arbeitsprozesse beitragen“ (Block, et al., 2015, S. 658). Hierzu gehören Aufbauorganisation, Ablauforganisation, Methoden, Maßnahmen und Werkzeuge (vgl. Tabelle 2.1) und damit auch Hierarchien, Zuständigkeiten, Informations- und Kommunikationsstrukturen sowie Arbeitstätigkeiten und Arbeitsgestaltung (Digmayer, et al., 2021, S. 45).

Die *Schnittstelle Mensch-Technik (MT)* umfasst die „menschzentrierte Technikgestaltung“ (Bengler, et al., 2017b). Diese kann unterteilt werden in den Bereich der Mensch-Maschine-

Interaktion, d.h. die „flexible situationsspezifische Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine“ (Hirsch-Kreinsen, 2018, S. 24) sowie die „Transparenz und Kontrollierbarkeit des Systems durch die Beschäftigten“ (ebd.). Wesentliche Aspekte der Mensch-Technik Schnittstelle sind in Anlehnung an Müller und Riedel (2014, S. 224f.), Bengler et al. (2017b, S. 55), Hirsch-Kreinsen (2018, S. 24) und Hirsch-Kreinsen et al. (2018, S. 183):

- die Automatisierung bzw. Assistenz bei besonders belastenden Tätigkeiten (z.B. durch Mensch-Roboter-Kollaboration)
- Intelligente Assistenzsysteme mit nutzer- und kontextsensitiver Filterung und Bereitstellung von Informationen (z.B. über mobile Geräte oder Augmented Reality)
- lernförderliche Arbeitsmittel
- die Lernfähigkeit des Systems (z.B. Anpassung an die Erfahrung des Nutzers)

Die *Schnittstelle Mensch-Organisation (MO)* umfasst neue Organisationsformen (Bengler, et al., 2017b, S. 55f.) mit dem Ziel der „Ganzheitlichkeit“ von Tätigkeiten (Hirsch-Kreinsen, 2018, S. 24f.). Die Ganzheitlichkeit, d.h. die gleichzeitige Verantwortung für ausführende, planende und kontrollierende Aufgaben wird als Voraussetzung für die Selbstorganisation des Menschen gesehen (ebd.). Hirsch-Kreinsen (ebd.) und Hirsch-Kreinsen et al. (2018, S. 187f.) beschreiben folgende wesentlichen Aspekte der Schnittstelle Mensch-Organisation:

- ganzheitliche Arbeitsaufgaben (Ausführung, Planung, Kontrolle)
- große Handlungsspielräume und Selbstorganisation der Menschen
- die Aufwertung von Qualifikation und Tätigkeiten
- Förderung von Lernprozessen
- Horizontale und vertikale Vernetzung der Beschäftigten

Die *Schnittstelle Technik-Organisation (TO)* umfasst neue Rahmenbedingungen für die Organisation, die sich durch die Technik ergeben (Bengler, et al., 2017b, S. 55f.). Ein zentraler Gestaltungspunkt ist die Möglichkeit, durch die in der Smart Factory vernetzten dezentralen IT-Systeme auch die Organisationseinheiten im Unternehmen zu dezentralisieren (Hirsch-Kreinsen, 2018, S. 25). Die wesentlichen Aspekte der Schnittstelle Technik-Organisation (TO) sind in Anlehnung an Müller und Riedel (2014, S. 225f.), Hirsch-Kreinsen (ebd.) und Hirsch-Kreinsen et al. (2018, S. 185f.)

- die Dezentralisierung von Organisationseinheiten
- die dezentrale Selbststeuerung und Autonomie der Systeme
- Aufhebung der vertikalen Arbeitsteilung zwischen Shopfloor und indirekten Bereichen

- Interdisziplinäre Kommunikation und Kooperation (z.B. mit Hilfe von Social-Media Funktionen)
- Verfügbarkeit relevanter Wissens- und Informationsquellen und Erzeugung eines kontextspezifischen Informationsangebots

2.2.3.12. Sonstige Erfolgsfaktoren im Transformationsprozess

Zur Sicherstellung des Erfolgs der Transformation des Unternehmens in Richtung Smart Factory sind mehrere Faktoren zu berücksichtigen. Insgesamt gelten hier auch die allgemeinen Erfolgsfaktoren für Veränderungsprozesse, wie beispielsweise die acht Schritte nach Kotter (1995, S. 61):

1. Erzeugen eines Dringlichkeitsgefühls („Create a sense of urgency“)
2. Aufbauen einer Führungskoalition („Build a guiding coalition“)
3. Entwickeln einer Vision und Strategie („Develop a vision and strategy“)
4. Kommunizieren der Veränderungsvision („Communicate the change vision“)
5. Befähigen der Mitarbeitenden auf breiter Basis („Empower broad-based action“)
6. Schaffen schneller Erfolge („Generate short-term wins“)
7. Konsolidieren der erzielten Erfolge und Einleiten weiterer Veränderungen („Consolidate gains and produce more change“)
8. Verankern der neuen Ansätze in der Unternehmenskultur („Anchor new approaches in the corporate culture“)

Gronau und Ulrich (2019, S. 479) betonen, dass es für die Gestaltung des Veränderungsprozesses entscheidend sei, die Transformation in der Unternehmensstrategie zu verankern. Nicht die neuen Prozesse sollten dabei als Ziel definiert werden, sondern die Entwicklung dorthin (ebd., S. 480). Da sich die Aufgaben und Rollen der Menschen in der Smart Factory teilweise erheblich ändern werden sollten neben den technischen und organisatorischen Aspekten des Veränderungsprozesses auch Aspekte des richtigen Umgangs mit den Menschen berücksichtigt werden (Wolf, et al., 2018, S. 131); (Gronau & Ullrich, 2019, S. 479). So seien die Menschen durch eine geeignete Informationsstrategie für die notwendigen Veränderungen zu sensibilisieren und durch Qualifizierungsmaßnahmen darauf vorzubereiten, um Ängste, Unsicherheiten und Bedenken zu vermeiden (Gronau & Ullrich, 2019, S. 479). Bei der eigentlichen Transformation sollte menschenzentriert gedacht werden und nicht technikzentriert und es sollten benutzerfreundliche Lösungen für die Beschäftigten angestrebt werden (Schröder, 2017, S. 14). Dabei sei es nach Gronau und Ullrich (ebd.) wichtig, die Menschen in die Gestaltung einzubinden und ihnen Gestaltungsspielräume bei der Umsetzung zu geben. Die Akzeptanz für die Veränderungen

würde nur dann erreicht werden, wenn sich dadurch die Arbeit der Menschen deutlich erleichtert (ebd.). Um den Wandel dauerhaft erfolgreich zu gestalten, sollte dieser nach dem Win-Win-Prinzip so gestaltet sein, dass die Beschäftigten und das Unternehmen davon profitieren (Jacobs, et al., 2017, S. 8f.). Dazu müssten die Anpassungsgeschwindigkeit des Unternehmens und die Flexibilität der Beschäftigten auf Agilität ausgerichtet werden und die Produktivitäts- und Innovationsfähigkeit durch lebenslanges Lernen gesteigert werden (ebd.).

2.2.4. Smart Supply Chain – Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke

Die horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke – im Folgenden auch Smart Supply Chain (Zsifkovits & Woschank, 2019, S. 43) genannt – ist ein weiterer Handlungsbereich gemäß der Umsetzungsempfehlungen der Plattform Industrie 4.0 (vgl. Abschnitt 1.1). Das Ziel ist die bessere Vernetzung der Material- und Informationsflüsse des Unternehmens mit seinen Zulieferern, Wertschöpfungspartnern und Kunden in der Supply Chain (vgl. Abbildung 2.25) mit Hilfe geeigneter Industrie 4.0 Technologien (Kagermann, et al., 2013, S. 35); (Schuh, et al., 2017b, S. 20).

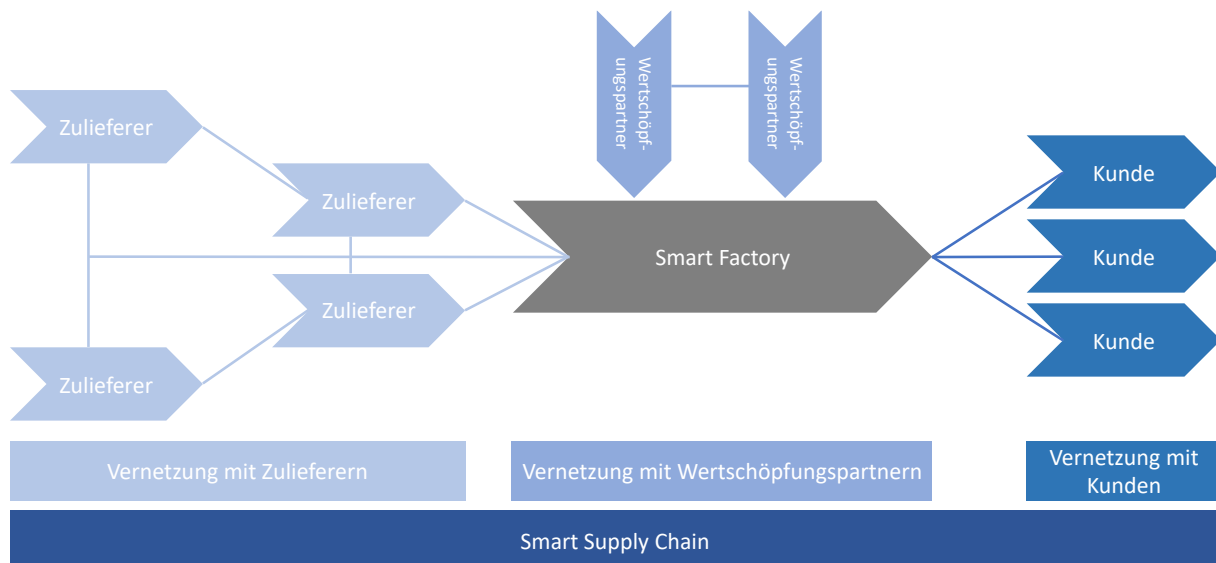


Abbildung 2.25 Smart Supply Chain (eigene Darstellung in Anlehnung an Schuh et al., 2017, S. 19)

Da der Materialfluss und die Intralogistik innerhalb der Smart Factory bereits in Abschnitt 2.2.3 beschrieben wurden, sind sie nicht mehr Gegenstand dieses Abschnitts.

Wie auch in der Smart Factory ergeben sich durch das auf Cyber-Physischen Systemen (CPS) basierende Internet der Dinge (IoT) auch in der Supply Chain neue Möglichkeiten, auf Basis von Echtzeitdaten ein Abbild (Digitaler Zwilling) der Realität zu erhalten, vernetzte, (teil-)autonome Prozesse zu etablieren und damit die Effizienz und Wandlungsfähigkeit insgesamt zu

steigern (Zsifkovits & Woschank, 2019, S. 44f.). Die bessere *Vernetzung mit Zuliefern* ermöglicht beispielsweise genauere Bedarfsprognosen und automatisierte Materialbestellungen (Schuh, et al., 2017b, S. 20). Durch die engere *Vernetzung mit Wertschöpfungspartnern* und anderen Unternehmensstandorten lassen sich Synergien bei der „kompetenz-, kapazitäts- oder zeitbasierten Distribution von Wertschöpfungsumfängen“ (ebd.) erzielen, um damit schneller und flexibler auf Veränderungen zu reagieren. Die engere *Vernetzung mit Kunden* ermöglicht eine flexiblere Anpassung an Kundenwünsche und die Basis für neue Abläufe, Produkte und Services (Zsifkovits & Woschank, 2019, S. 44).

In der Literatur gibt es mehrere auseinandergehende Systematiken bezüglich der Komponenten und Handlungsfelder einer „Smart Supply Chain“ bzw. der häufig auch synonym verwendeten Begriffe „Supply Chain 4.0“, „Logistik 4.0“ oder „Smart Logistics“. Daher erfolgt im Folgenden eine Festlegung einer Systematik für die Folgearbeit.

Lieberoth-Leden et al. (2017, S. 451) wählen einen hierarchischen Ansatz. Sie führen aus, dass die „Logistik 4.0“ alle klassischen Ebenen der Unternehmenslogistik adressiert, von dem Materialfluss auf der operativen Ebene über die Planung, Steuerung und Überwachung der Beschaffungslogistik, Produktionslogistik, Distributionslogistik und Entsorgungslogistik auf der dispositiven Ebene bis hin zum Management von Standorten, Logistikstrategien und Logistikcontrolling auf der strategischen Ebene.

Ein anderer Ansatz ergibt sich durch die Studie „Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management“ der Bundesvereinigung Logistik (BVL); (Kersten, et al., 2017). Die Autoren sehen sechs Handlungsfelder bezüglich der Nutzung neuer Technologien (ebd., S. 26-31): 1. Datenerhebung, 2. Datenanalyse, 3. IT-Services, 4. Assistenzsysteme, 5. Autonome Systeme und 6. Informationsaustausch sowie drei Handlungsfelder in Bezug auf die Veränderung von Wertschöpfungsketten (ebd., S. 34-39): Individualisierung der Warenströme, 2. Datengetriebene Steuerung der Wertschöpfungskette und 3. Neuorganisation von Wertschöpfungsketten.

Siestrup & Zeeb (2017, S. 60-62) beschreiben fünf Komponenten einer Smart Supply Chain 4.0: 1. Smart Logistics Objects, 2. Smart Warehouseing & Transportation, 3. Connected Supply Chain, 4. Data-driven Logistics und 5. Smarte SCM Strategie und Organisation.

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts „SME 4.0 - Industry 4.0 for SMEs“ wurden in Expertenworkshops die Anforderungen von kleinen und mittleren Unternehmen (SMEs) an eine „Smart Logistics“ ermittelt und drei Clustern zugeordnet (Dallasega, et al., 2019, S. 850f.):

1. „Smart and Lean x-to-order Supply Chains“ mit den Unterpunkten „Lean and Agility“, „Realtime Status“, „Digitization, Connectivity and Network“, „Tracking, Production Planning and Control (PPC) and Warehouse Management System (WMS)“ und „Culture, People and Implementation“
2. „Intelligent Logistics through ICT and CPS“ mit den Unterpunkten „Digitalization“, „Realtime Status and Tracking System“, „Connectivity“, „Warehouse Management System (WMS)“, „Lean and Ease of Use“ und „Security and Safety“
3. „Smart and automated Logistics Systems and Vehicles“ mit den Unterpunkten „Automation“, „Transport and WMS“, „Lean“ und „Digitalization and Connectivity“.

Als Systematik für die folgenden Betrachtungen wird eine Kombination aus den o.g. Ansätzen gewählt, die den hierarchischen Ansatz von Lieberoth-Leden et al. (2017, S. 451) aufgreift und zusätzlich den Aspekt der Assistenz für den Menschen in die anderen, sehr technikzentrierten Ansätze, einbringt. Als Systematik für die Handlungsfelder der Smart Supply Chain ergeben sich damit die in Abbildung 2.26 dargestellten Punkte.

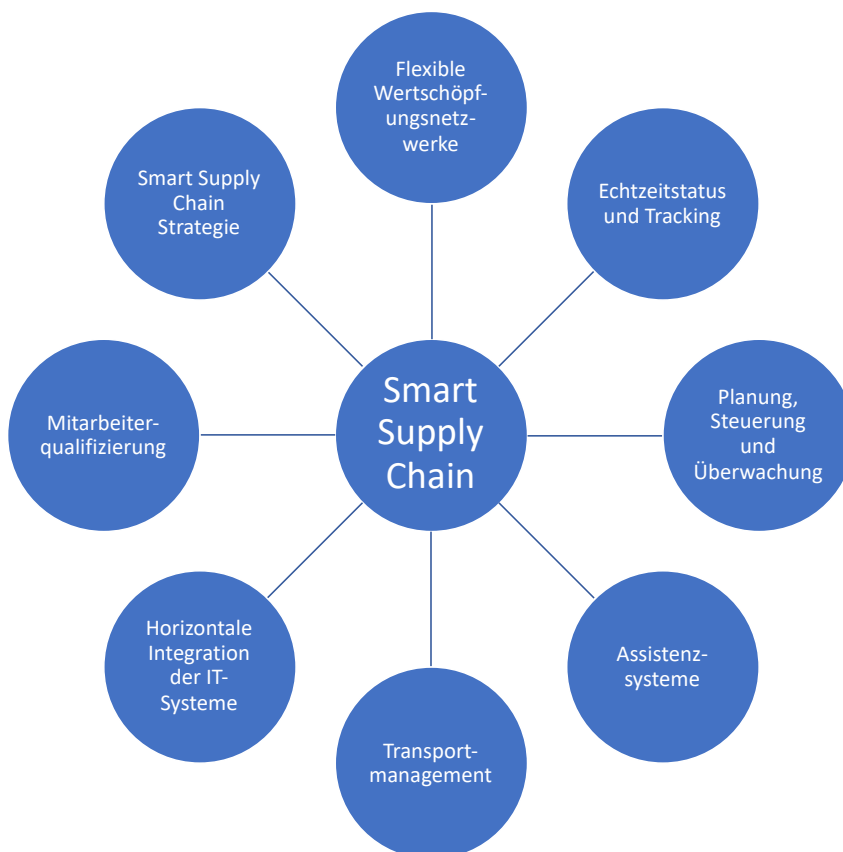


Abbildung 2.26 Handlungsfelder der Smart Supply Chain (eigene Darstellung)

2.2.4.1. Flexible Wertschöpfungsnetzwerke

Die in der Einführung bereits beschriebenen allgemeinen Trends und besondere Einflussfaktoren, wie individuelle Produkte, kürzere Produktlebenszyklen, kleinere Bestellmengen, schnellere Lieferungen, neue Technologien sowie eventuelle neue Marktteilnehmer, wie Lieferanten und Serviceanbieter, bewirken auch einen Anpassungsbedarf der Wertschöpfungsketten hinsichtlich ihrer „Akteure, Rollen, Prozesse und Produkte“ (Kersten, et al., 2017, S. 38). So würden beispielsweise kürzere Lieferzeiten und individuelle Anlieferungen dezentrale Lagerkonzepte und kleinteiligere, kundenindividuelle Services erfordern (ebd., S. 34f.). Kersten et al. (2017, S. 38) empfehlen produzierenden Unternehmen in ihrer Studie „Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management“ daher eine Bewertung und Neuausrichtung der eigenen Rolle in der Wertschöpfungskette sowie den Aufbau eines agilen Supply Chain Netzwerks.

Nachdem in der Vergangenheit mehr die Optimierung einzelner Produktionsketten im Vordergrund stand, geht es jetzt um „echtzeitoptimierte Wertschöpfungsnetzwerke“ (Peschke & Eckardt, 2019, S. 4f.) mit intelligent vernetzten Smart Factories. Diese horizontale Vernetzung soll es produzierenden Unternehmen ermöglichen, ihre „Produktivitäts- und Flexibilitätsvorteile“ aus der Smart Factory auf die gesamte Wertschöpfungskette zu übertragen (Schuh, et al., 2017b, S. 20) und auch dort ihre Flexibilität, Auslastung und Kosten zu optimieren (BMBF, 2015, S. 18-20); (Schuh, et al., 2017b, S. 20).

Schenk et al. (2014, S. 516f.) unterscheiden zwischen vier verschiedenen Arten der Unternehmensnetzwerke: In *strategischen Netzwerken* koordiniert ein Kernunternehmen die Arbeit des Netzwerks, die anderen Unternehmen bieten ihre Leistung in und außerhalb dieses Netzwerks an. In *operativen Netzwerken* können Unternehmen bedarfsorientiert kurzfristig auf Leistungen und Kapazitäten der anderen Netzwerkpartner zugreifen. In *regionalen Netzwerken* arbeiten in der Regel hoch spezialisierte Unternehmen bedarfsorientiert lokal zusammen. Diese Form bietet sich insbesondere für KMU an, die dadurch auf Kompetenzen und Ressourcen in der räumlichen Nähe zugreifen können, um ihre eigene Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. In *virtuellen Netzwerken* vernetzen sich verschiedene Produktions- und Dienstleistungsunternehmen auf informationeller Ebene zur Zusammenarbeit, um gemeinsam Leistungen zu erbringen (Schenk, et al., 2014, S. 650).

Als Beispiel für die erfolgreiche Nutzung solcher Netzwerke beschreiben Cuber et al. (2012, S. 60f.) mittelständische Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus, die häufig in auftragsbezogenen, temporären Netzwerken mit anderen Wertschöpfungspartnern bei der Entwicklung und Produktion komplexer Produkte kooperieren.

Die Voraussetzung für die horizontale Vernetzung in der Supply Chain ist der Einsatz geeigneter Plattformen, auf denen zwischen den Plattformteilnehmern Angebote und Nachfragen bezüglich Produkte und Services ausgetauscht werden (Schuh, et al., 2017b, S. 20); (Kersten, et al., 2017, S. 38). Eine detaillierte Betrachtung von Plattformen erfolgt in Abschnitt 2.2.6.

2.2.4.2. Echtzeitstatus und Tracking

Das Aufkommen immer kleinteiligerer individueller Logistikobjekte sowie die komplexeren Wertschöpfungsnetzwerke mit verteilten Produktions- und Lagerorten erhöht auch die Anforderungen an die Identifizierung und Lokalisierung der logistischen Objekte, wie Produkte, Behälter und Transportmittel (Richter, et al., 2015b, S. 245); (Zsifkovits & Woschank, 2019, S. 44). Durch die Verfügbarkeit von Echtzeitdaten können Logistik- und Produktionsprozesse effektiver und effizienter gesteuert werden (ebd.). Zudem ermöglicht die Verfügbarkeit umfangreicher Daten die verbesserte Entscheidungsfindung durch Data Analytics und den Einsatz künstlicher Intelligenz (Kersten, et al., 2017, S. 26); (Zsifkovits & Woschank, 2019, S. 44).

Die Voraussetzung für die Lokalisierung und Datenerfassung ist die eindeutige Kennzeichnung logistischer Objekte (Bousonville, 2017, S. 16). Hier wurden bereits in Abschnitt 2.2.2.10 geeignete Technologien und Standards zur Identifikation und Ortung vorgestellt.

Der Einsatz von Sensoren an Ladungsträgern ermöglicht weitere Möglichkeiten der Datenerfassung. So sind mit Sensoren ausgestattete „intelligente“ Behälter als „Smart Logistics Objects“ (Siestrup & Zeeb, 2017, S. 60f.) beispielsweise in der Lage, Temperatur, Druck oder Füllstände zu erfassen und die Daten zur Prozesssteuerung über das Internet bereitzustellen (ebd.) (Lieberoth-Leden, et al., 2017, S. 454). Intelligente Behälter bieten zudem die Möglichkeit der horizontalen Integration durch dezentralen Datenhaltung, indem sie selbst Informationen entlang der Supply Chain übertragen (Lieberoth-Leden, et al., 2017, S. 460). Darüber hinaus ermöglicht der Einsatz von Sensoren an Transportmitteln die Erfassung von Betriebszuständen als Basis für die (vorbeugende) Instandhaltung (Kersten, et al., 2017, S. 27).

Zur Kommunikation logistischer Objekte mit anderen Industrie 4.0 Komponenten wurde das in Abschnitt 2.2.2.8 dargestellte Konzept der Verwaltungsschale geschaffen (vgl. Abbildung 2.18).

2.2.4.3. Planung, Steuerung und Überwachung

Die Basis für eine optimale Planung, Steuerung und Überwachung der Supply Chain ist die Nutzung geeigneter Plattformen, da diese die Partner im Wertschöpfungsnetzwerk bereits miteinander vernetzen (siehe auch 2.2.4.1) und auch logistische Dienstleistungen (z.B. Transport, Lagerung, Verpackung) anbieten (Zsifkovits & Woschank, 2019, S. 45). Als Beispiel kann hier das Automotive Netzwerk Catena-X (Catena-X, 2021) genannt werden, das eine entsprechende Plattform entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Automobilindustrie bietet.

Unabhängig von der Teilnahme an Plattformen bietet auch die Analyse der entlang der Wertschöpfungskette erfassten Daten neue Möglichkeiten der Planung, Steuerung und Überwachung von Warenströmen (Kersten, et al., 2017, S. 36). Logistische Prozesse könnten damit hinsichtlich relevanter Zielgrößen, wie Zeit, Qualität, Kosten, Flexibilität und Auslastung optimiert werden (BMBF, 2015, S. 18-20).

Siestrup und Zeeb (2017, S. 62) beschreiben unter dem Begriff „Data-driven Logistics“ die Möglichkeit, mit Hilfe der gewonnenen Daten und „Big Data Technologien“ Verbesserungspotenziale, wie reduzierte Lagerbestände (intern und extern), optimierte Bestellgrößen (Einkauf, Produktion, Transport) und reduzierte Lieferzeiten zu erzielen.

Der Einsatz von künstlicher Intelligenz und geeigneten Machine Learning Technologien ermöglicht zudem prädiktive Analysen zur Prognose von Bedarfen, Lieferengpässen, Lieferzeiten, Ankunftszeiten, etc. (Kersten, et al., 2017, S. 12); (Steimel & Steinhaus, 2020). Ein großes Potenzial wird auch in autonomen Planungs- und Steuerungsprozessen gesehen, die sehr schnell und flexibel auf Einflüsse reagieren können (Siestrup & Zeeb, 2017, S. 61).

2.2.4.4. Assistenzsysteme

In den unternehmensübergreifenden logistischen Prozessen gibt es – genauso wie in der Produktion auch – einige Einsatzgebiete für die bereits in Abschnitt 2.2.2.9 beschriebenen Assistenzsysteme, die den Menschen bei der Wahrnehmung und Ausführung von Aufgaben sowie bei Entscheidungen unterstützen. In der Studie „Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management“ der Bundesvereinigung Logistik (BVL) beschreiben die Autoren Kersten et al. (2017, S. 29f.) folgende Einsatzgebiete von Assistenzsystemen auf der operativen Ebene:

1. Außendienst (Transport und Instandhaltung)

Kontextabhängige Informationen auf mobilen Endgeräten sowie die Möglichkeit, auf Unternehmensdaten zuzugreifen.

2. Warenumschat und Wartungsaufgaben

Einblendung kontextabhängiger Informationen und Augmented Reality (AR) Lösungen auf Datenbrillen (Smart Glasses) mit dem Ziel, die Fehlerrate und Effizienz zu steigern.

3. Lagerlogistik

Einsatz von (kollaborativen) Robotern zur physischen Erleichterung der Arbeitsaufgabe (ebd., S. 31); (Steimel & Steinhaus, 2020, S. 15).

Auf der dispositiven Ebene basieren die Assistenzfunktionen in erster Linie auf den im letzten Abschnitt beschriebenen Datenanalysen und Prognosen, die Problemlösungen und Entscheidungen (z.B. optimale Bestellmenge) erleichtern (vgl. Abschnitt 2.2.4.3).

2.2.4.5. Transportmanagement

Das Transportmanagement in der Supply Chain umfasst prinzipiell alle unternehmensinternen und unternehmensübergreifenden Transportvorgänge. Da die unternehmensinterne Logistik jedoch bereits als Teil der Smart Factory in Abschnitt 2.2.3.4 Intralogistik beschrieben wurde, konzentriert sich dieser Abschnitt lediglich auf die Aspekte der unternehmensübergreifenden Transportketten.

Im Bereich des unternehmensübergreifenden Transportmanagements lassen sich die folgenden Handlungsfelder identifizieren:

1. Standardisierung von Transportbehältern

Mit der Standardisierung von Transportbehältern wird eine Maximierung der Auslastung je Transportfahrt angestrebt, zudem werden dadurch freie Kapazitäten besser nutzbar (Zsifkovits & Woschank, 2019, S. 44).

2. Gemeinsame Nutzung logistischer Einrichtungen

Durch die gemeinsame Nutzung logistischer Einrichtungen, wie Transportmittel, Lägern und Übergabepunkten lassen sich Transportzeiten, Kosten und Emissionen reduzieren (ebd.)

3. Einsatz erweiterter Telematiklösungen im Fernverkehr

Im Fernverkehr werden bereits heute mit Telematiklösungen umfangreiche Daten zur Position und Zustand der Fahrzeuge erfasst und ausgewertet (Bousonville, 2017, S. 28f.). Diese können um weitere Sensordaten (z.B. die Temperatur der Ladung) angereichert werden und damit durch Analysen und Prognosen das Flottenmanagement, Fahrzeugmanagement, Fahrermanagement und Ladungsmanagement unterstützen (ebd.).

4. Nutzung von Transport- und Frachtenbörsen

Über Frachtenbörsen bzw. entsprechende Vermittlungsplattformen lassen sich Transportaufträge an Transportdienstleister vergeben. Umgekehrt lassen sich aber auch Transportaufträge entgegennehmen, um beispielsweise leere Rückfahrten zu vermeiden (Bousonville, 2017, S. 31f.); (Kersten, et al., 2017, S. 38).

5. Autonome Transportsysteme

Während unbemannte Luftfahrzeuge (Drohnen) noch eine geringe Relevanz hätten (Kersten, et al., 2017, S. 30), seien selbstfahrende LKW in Teilen des Straßennetzes bald zu erwarten (Bousonville, 2017, S. 34). Fahrerlose Transportsysteme (FTS), die auch in der Intralogistik der Smart Factory erfolgreich eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 2.2.3.4) können auch außerhalb der Smart Factory bei der Kommissionierung und dem Behältertransport eingesetzt werden (Kersten, et al., 2014, S. 30).

2.2.4.6. Horizontale Integration der IT-Systeme in der Supply Chain

Der unternehmensübergreifende Datenaustausch spielt eine entscheidende Rolle bei der Gestaltung flexibler Wertschöpfungsketten (Kersten, et al., 2017, S. 36). Erst durch ein geeignetes Informationsmanagement können die Daten entlang der Supply Chain (z.B. Bedarfe oder Lagerbestände) für Analysen und Prognosen genutzt werden, um in Echtzeit „situationsgerechte Maßnahmen“ abzuleiten (ebd.). Hierzu seien die einzelnen Prozesse in der Supply Chain auf digitaler Ebene zu integrieren, um dadurch durchgängige Informationsflüsse zu gestalten, bei denen jeder Prozessschritt seine benötigten Daten „rechtzeitig und in der richtigen Form“ erhält (Lieberoth-Leden, et al., 2017, S. 453). Die Basis für die Integration auf digitaler Ebene ist die Digitalisierung der Prozesse und die Vermeidung manueller (papiergestützter) Datenübertragungen (ebd., S. 454).

Die erforderlichen Anpassungen an den bestehenden IT-Systemen stellen die Unternehmen vor große Herausforderungen (vgl. Abschnitt 2.1.4.2). Hinzu kommt, dass sich die IT-Landschaften der Unternehmen unterschiedlich entwickelt haben und damit von keinem Standard ausgegangen werden kann (Kersten, et al., 2014, S. 28); (Zsifkovits & Woschank, 2019, S. 45). Als sehr relevant wurden in der bereits erwähnten Studie der Bundesvereinigung Logistik (BVL) Warehouse Management Systeme (WMS) gesehen sowie die Vernetzung dieser Systeme mit ERP-Systemen (Kersten, et al., 2014, S. 28f.). Um die Daten entlang der Supply Chain trotz der oben beschriebenen unternehmensspezifischen IT-Landschaften integrieren zu können, bedarf es neben der in Abschnitt 2.2.3.1 beschriebenen vertikalen Integration im Unternehmen einer Plattform in der Cloud zur horizontalen Vernetzung im Wertschöpfungsnetzwerk (Schuh, et al., 2017b, S. 20); (Siestrup & Zeeb, 2017, S. 61). Entsprechende Plattform as a Service (PaaS)

Lösungen wurden in der Studie des BVL als sehr relevant bewertet (Kersten, et al., 2017, S. 28).

Künftig könnte einer Umfrage des Bundesverbands Materialwirtschaft, Einkauf und Logistik e.V. (BME) zufolge die Blockchain Technologie für den Austausch standardisierter Dokumente interessant werden, zudem könnten ereignisgesteuerte „Smart Contracts“ realisiert werden (BME, 2019, S. 12). Dabei seien jedoch noch einige rechtliche und technische Hürden zu überwinden (ebd.).

2.2.4.7. Mitarbeiterqualifizierung

Durch die vielfältigen Veränderungen im Bereich des Supply Chain Managements entsteht auch hier ein umfangreicher Aus- und Weiterbildungsbedarf (Siestrup & Zeeb, 2017, S. 62). Benötigt würden insbesondere IT-Experten, die bei der Entwicklung, Implementierung, Nutzung und Wartung von Digitalisierungslösungen und Planungs- und Steuerungssystemen unterstützen (ebd.). In seiner Studie zu den Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management (Kersten, et al., 2017, S. 45) ermittelte der BVL als die wichtigsten künftig benötigten Kompetenzen bei Fach- und Führungskräften:

1. Agilität: anpassungsfähiges Handeln
2. Positiver Umgang mit Fehlern
3. Interdisziplinäres Denkvermögen
4. Intuitiver Umgang mit IT
5. Fähigkeit zur Analyse großer Datenmengen

Die Erfolgsfaktoren des betrieblichen Wissens- und Kompetenzmanagements wurden bereits bei der Smart Factory in Abschnitt 2.2.3.9 beschrieben. Da die Einsatzbedingungen ähnlich sind, kann sicher davon ausgegangen werden, dass diese auch hier Gültigkeit haben.

2.2.4.8. Smart Supply Chain Strategie

Da die Smart Supply Chain auch als ein sozio-technisches System anzusehen ist, das einer erheblichen Veränderung unterliegt, sind auch hier die in Abschnitt 2.2.3.12 dargestellten Erfolgsfaktoren im Transformationsprozess anzusetzen. Damit bedarf auch die Transformation der Supply Chain einer strategischen Verankerung im Unternehmen (Siestrup & Zeeb, 2017, S. 62) sowie einer menschenzentrierten Vorgehensweise, in der benutzerfreundliche Lösungen angestrebt werden (Schröder, 2017, S. 14).

2.2.5. Smart Products – Intelligente Produkte und Abbildung des Produktlebenszyklus

Intelligente Produkte – im Folgenden auch Smart Products genannt – sowie die digitale Abbildung des gesamten Produktlebenszyklus sind ein weiterer Handlungsbereich der Umsetzungsempfehlungen der Plattform Industrie 4.0 (vgl. Abschnitt 1.1). Das Ziel ist die durchgängige digitale Abbildung des gesamten Produktlebenszyklus vom Produktdesign und der Produktentwicklung über die Produktionsplanung, das Produktionsengineering, die Produktion bis hin zu Services beim Kunden (Kagermann, et al., 2013, S. 35f.) sowie die Nutzung der erfassten Daten zur Prozesssteuerung (Gorecky, et al., 2017, S. 557f.) und als Basis für datenbasierte Dienstleistungen (Kinkel, et al., 2016, S. 12).

2.2.5.1. Smart Products (Intelligente Produkte)

Der eingangs beschriebene Trend zu einer höheren Individualisierung von Produkten bis hin zur Massenfertigung in Losgröße 1 stellt bisherige zentrale Ansätze der Prozesssteuerung vor große Herausforderungen (vgl. 2.2.3.3); (Gorecky, et al., 2017, S. 557f.). Die relevanten Produktions- und Logistikprozesse müssen schnell an geänderte Produkthanforderungen adaptiert werden können. Zudem müssen die herzustellenden Produkte jederzeit im Herstellungsprozess eindeutig identifiziert und verfolgt werden können (ebd.).

Smart Products verfügen selbst über eine cyber-physische Komponente (vgl. 2.2.2.5) zur Produktidentifikation sowie zur Speicherung und Bereitstellung von Daten während ihrer Produktions- und Nutzungsphase (Kinkel, et al., 2016, S. 12); (Gorecky, et al., 2017, S. 558). Damit sind sie in der Lage

- die Prozesse in Produktion und Logistik selbst (autonom) zu steuern (Vogel-Heuser, 2014, S. 42); (Gorecky, et al., 2017, S. 558)
- ein dynamisches Produktmodell, d.h. einen digitalen Produktschatten (vgl. Abschnitt 2.2.2.7), mit Informationen zum aktuellen Bearbeitungsstand anzureichern (Denkena, et al., 2017, S. 295).
- das Produkt über den gesamten Produktlebenszyklus zu verfolgen (Kinkel, et al., 2016, S. 12).
- während der Nutzungsphase die Daten für ergänzende datenbasierte Services, z.B. Instandhaltung, zu liefern (Kinkel, et al., 2016, S. 12).

Gerben et al. (2009) unterscheiden bei Smart Products zwischen verschiedene Ausprägungen der Intelligenz, die je nach Produkt und Anforderung auszuwählen sind:

- Der *Intelligenzgrad* (vom reinen Informationsmanagement über die Problemerkennung bis hin zur Entscheidungsfindung)
- Der *Ort der Intelligenz* (Intelligenz am Produkt selbst bzw. Intelligenz im Netzwerk)
- Der *Aggregationslevel der Intelligenz* (das Produkt selbst bzw. ein „Container“ mit mehreren Komponenten)

Zur Kommunikation von Smart Products mit anderen Industrie 4.0 Komponenten wurde das in Abschnitt 2.2.2.8 dargestellte Konzept der Verwaltungsschale geschaffen (vgl. Abbildung 2.18).

2.2.5.2. Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus

Die Beherrschung kürzerer Entwicklungszeiten, steigender Variantenzahlen und sinkender Produktstückzahlen sind ein wichtiger Wettbewerbsfaktor geworden (Boos & Zancul, 2012, S. 336). Parallel dazu verschiebt sich aufgrund der zunehmenden Gesamtverantwortung der Hersteller für ihre Produkte der Fokus von der Betrachtung einzelner Prozessschritte hin zu einer Betrachtung aller Phasen des Produktlebenszyklus von der Produktidee über die Entwicklung/Konstruktion, Produktion, Nutzung beim Kunden bis hin zur Entsorgung (ebd.) (Westkämper, 2013c, S. 12).

Beide Einflüsse führen zu einem starken Anstieg produktbezogener Daten und Dokumente (Boos & Zancul, 2012, S. 339). Die digitale Abbildung des gesamten Produktlebenszyklus ist daher auch Gegenstand des in Abschnitt 2.2.2.1 beschriebenen Referenzarchitekturmodells RAMI 4.0 (BMWi, 2016).

Product-Lifecycle-Management (PLM) Systeme unterstützen Unternehmen bei der Speicherung, Verwaltung und Bereitstellung aller Daten, die entlang des Produktlebenszyklus anfallen (Bracht, et al., 2011, S. 383). Dazu gehören Daten aus den Systemen der Entwicklung (CAD, CAE, CAM), der Produktion (ERP, MES, IOT) bis hin zu Daten aus Vertrieb, Service und Controlling (ebd.); (Boos & Zancul, 2012, S. 339). Obwohl das PLM-Konzept zunächst für Unternehmen der Automobilbranche, des Maschinen- und Anlagenbaus sowie der Luftfahrtindustrie entwickelt wurde, wird auch ausdrücklich für den Mittelstand ein großes Nutzenpotenzial gesehen (ebd., S. 347).

Digitale Produkte sind ein weiterer Ansatz zur Nutzung und Pflege der Produktdaten über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg (Bracht, et al., 2011, S. 14). Dabei wird auf Basis eines digitalen 3D-Modells des Produkts ein digitales Abbild des realen Produkts geschaffen. Beispielhafte Einsatzgebiete dieses auch als Digital Mock-Up (DMU) bezeichneten Modells sind

neben der Entwicklung und Konstruktion auch Anwendungen in der Montage, Qualitätssicherung, Erstellung von Produktunterlagen, Schulung und Instandhaltung (Bracht, et al., 2011, S. 14); (Lentes & Dangelmaier, 2013). Die Voraussetzung für digitale Mock-Ups sei jedoch die Umstellung von 2D-CAD-Systemen auf 3D-CAD-Systemen (Westkämper, 2013d).

Abbildung 2.27 zeigt zusammenfassend die oben beschriebenen Möglichkeiten der Abbildung des Produktlebenszyklus durch Smarte Produkte, PLM-Systeme und Digitale Produkte (Digital Mock-Up) in Anlehnung an das Referenzarchitekturmodell RAMI 4.0 (BMW, 2016).

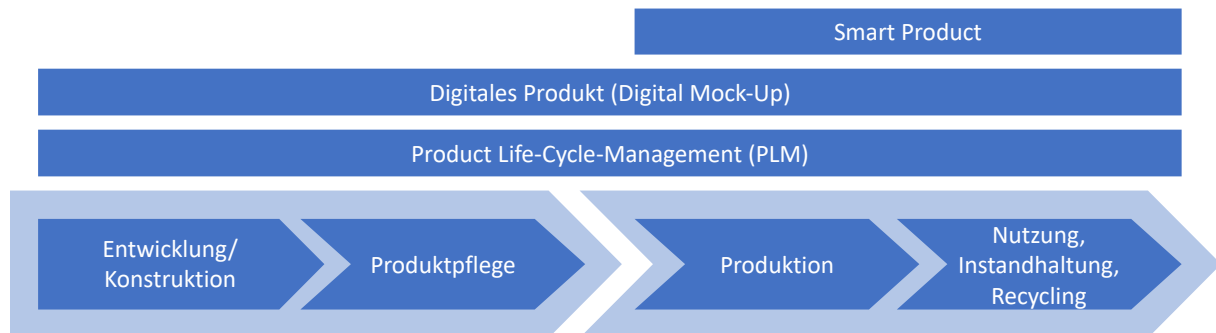


Abbildung 2.27 Möglichkeiten der digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus (eigene Darstellung in Anlehnung an RAMI 4.0)

2.2.6. Neue Geschäftsmodelle – Datenbasierte Produkte und Services

Der letzte der vier in den Umsetzungsempfehlungen der Plattform Industrie 4.0 genannte Handlungsbereiche sind neue Geschäftsmodelle (vgl. Abschnitt 1.1). Das Ziel ist die Entwicklung neuer, datenbasierter Geschäftsmodelle auf Basis neuer Wertschöpfungsprozesse, anderer Rollenverteilungen oder auf Basis intelligenter Produkte (BITKOM e.V., et al., 2015, S. 19).

Geschäftsmodelle können nach Sauer et al. (2016, S. 16) verkürzt definiert werden als „die Strategie, die ein Unternehmen fährt, um Wert zu generieren und dabei Geld zu verdienen“. Gassmann, Frankenberger und Csik (2013, S. 17f.) beschreiben vier Dimensionen eines Geschäftsmodells (vgl. Abbildung 2.28), die im Rahmen der Entwicklung eines Geschäftsmodells geklärt werden müssten:

1. Die Zielkunden
2. Das Angebot an die Kunden („Nutzenversprechen“)
3. Die Art der Leistungserstellung („Wertschöpfungskette“)
4. Die Wertgenerierung („Ertragsmechanik“)

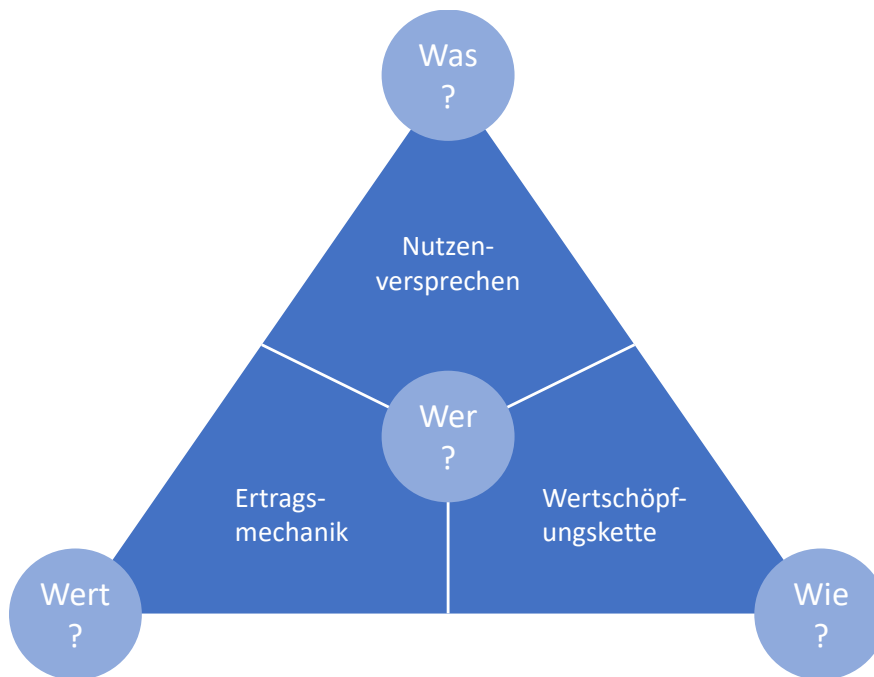


Abbildung 2.28 Vier Dimensionen eines Geschäftsmodells nach Gassmann et al., 2013, S. 18

Industrie 4.0 kann als eine günstige Rahmenbedingung zur Entwicklung neuer Geschäftsmodelle angesehen werden (Schuh, et al., 2017a, S. 5f.). In ihrer Studie „Industrie 4.0 Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution“ (Koch, et al., 2014, S. 26ff.) zeigen die Autoren auf, dass der Wandel im Rahmen von Industrie 4.0 zu einem höheren Digitalisierungsgrad im Produkt- und Serviceangebot führt. Sowohl in neuen als auch in bestehenden Geschäftsmodellen stünden daher die stärkere Nutzung und Vernetzung von Daten im Fokus (ebd.). Neben der „Integration von digitaler Intelligenz“ (Koch, et al., 2014, S. 26) in Produkte durch Sensorik und Software könne der Kundennutzen durch ergänzende internetbasierte Services erheblich gesteigert werden. Die Studie zeigte auch überdurchschnittliches Wachstum von Unternehmen mit „digitalisiertem Produktangebot“ auf (Koch, et al., 2014, S. 30).

2.2.6.1. Geschäftsmodellinnovationen

Geschäftsmodellinnovationen bieten die Chance, die „unbefriedigten, neuen oder verborgenen Kundenbedürfnisse“ besser zu erfüllen, dem Kunden einen Mehrwert zu bieten und sich besser von Wettbewerbern zu differenzieren (Schuh, et al., 2017a, S. 5). Gegenüber Produkt- und Prozessinnovationen seien Geschäftsmodellinnovationen zudem schwerer zu imitieren (ebd.). Kaufmann (2015, S. 12) unterscheidet zwischen drei verschiedenen Arten der Geschäftsmodellinnovationen:

1. „Verbesserung bestehender Geschäftsmodelle“
2. „Neue (definierte) Geschäftsmodelle“

3. „Neu zu definierende Geschäftsmodelle“

Bei der *Verbesserung bestehender Geschäftsmodelle* geht es nach Kaufmann (2015, S. 12) um die Veränderung von mindestens einer der Geschäftsmodelldimension nach Gassmann (vgl. Abbildung 2.28) durch Industrie 4.0 Technologien.

Neue (definierte) Geschäftsmodelle sind nach Kaufmann (2015, S. 12) Geschäftsmodelle, die es schon gibt, die aber an das eigene Unternehmen oder die eigene Branche angepasst werden. Beispiele sind

1. Intelligente Produkte (Smart Products)

z.B. Maschinen mit Kommunikationsmöglichkeit im Internet (Kinkel, et al., 2016, S. 25), siehe auch Abschnitt 2.2.5.

2. Intelligente Services (Smart Services)

„Data-driven“ Services schaffen einen zusätzlichen Kundennutzen (z.B. Predictive Maintenance) auf Basis der Analyse und Nutzung von Daten, die beispielsweise durch Smart Products (z.B. Maschinen) generiert werden (Kinkel, et al., 2016, S. 12).

3. Personalisierte Produkte

z.B. Nike Turnschuh (Kaufmann, 2015, S. 12)

4. Nutzung von Plattformen

Beispiele siehe Abschnitt 2.2.6.3

Neu zu definierende Geschäftsmodelle sind nach Kaufmann (2015, S. 12) Geschäftsmodelle, die erst noch erfunden werden müssen, aber auch Geschäftsmodelle, die aus einer Kombination anderer Geschäftsmodelle entstehen.

2.2.6.2. Digitale Geschäftsmodelle

Vollständig digitale Geschäftsmodelle zeichnen sich nach Sauer et al. (2016, S. 22ff.) durch die Digitalisierung der gesamten „Wertkette“ und des „Wertversprechens“ aus (vgl. Abbildung 2.29).

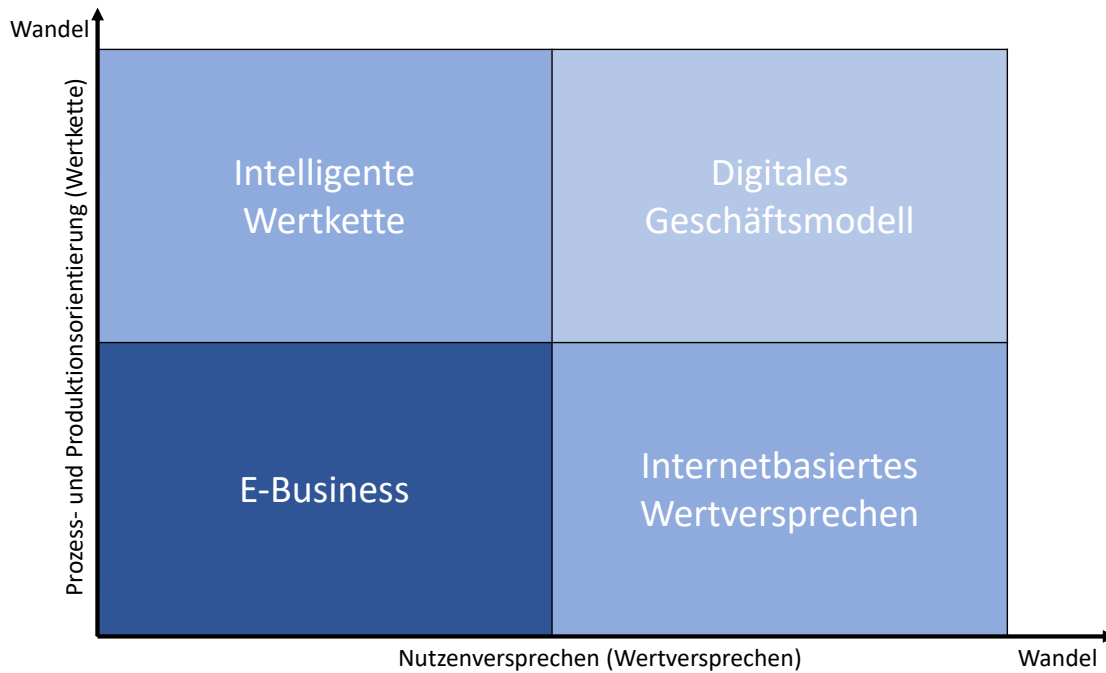


Abbildung 2.29 Digitalisierung von Geschäftsmodellen (eigene Darstellung in Anlehnung an Sauer et al., 2016, S. 23)

Wertkettenaufwärts sei das Potenzial der Digitalisierung die flexible „intelligente Wertkette“ mit dezentraler Steuerung, Echtzeitinformationen zur Entscheidungsunterstützung, etc.. Wertkettenabwärts sei das Potenzial der Digitalisierung das internetbasierte Wertversprechen zum Kunden, wie mehr Kundentransparenz, bessere Dienstleistungsqualität, direktere Kundeninteraktion, individuellere Kundenansprache, etc. (Sauer, et al., 2016, S. 24).

2.2.6.3. Digitale Plattformen

Digitale Plattformen gewinnen in den verschiedensten Branchen sowohl im Business-to Consumer (B2C), als auch im Business-to-Business (B2B) Bereich zunehmend an Bedeutung (Bender, et al., 2020, S. 646). Sie bilden für verschiedene Teilnehmer eines Ökosystems die technologische Grundlage für digitale Services im Internet (Schuh, et al., 2017a, S. 21). Ein wesentliches Merkmal digitaler Plattformen sind die Synergieeffekte, die zwischen den einzelnen Akteuren des Ökosystems erzielt werden können (Bender, et al., 2021, S. 71). Die Nutzung der Plattform schafft einen Nutzen für die jeweiligen Akteure, wodurch wiederum ein Nutzen für die anderen Marktteilnehmer des Ökosystems entsteht (Schuh, et al., 2017a, S. 21). Akteure einer Plattform sind in der Regel der Betreiber (Provider), einer oder auch mehrere Dienstleister sowie die eigentlichen Nutzer bzw. Kunden (ebd.).

Die Nutzung digitaler Plattformen bietet den teilnehmenden Unternehmen große Potenziale. Schuh et al. (2017a, S. 23) nennen „Effizienzsteigerungen“ durch reduzierte Transaktionskosten, „Netzwerkeffekte bzw. Skaleneffekte“ durch mehr Nutzen für den Einzelnen bei vielen Nutzern insgesamt, „Skalierbarkeit“ bei sich nur unwesentlich ändernden Fixkosten sowie die „Sicherung der Marktposition“ z.B. durch die Etablierung einer Standardplattform für spezielle Dienstleistungen.

Abbildung 2.30 zeigt die verschiedenen Leistungstypen datenbasierter Services, die digitalen Plattformen zugrunde liegen können. Der *Data Collector* sammelt Daten (z.B. zum Zustand einer Maschine) und bietet diese an. Der *Value-Generator* nutzt die erfassten Daten und bietet ergänzende, „produktzentrierte“ Services für den Nutzer der Produkte an (z.B. Instandhaltungsservices). Der *Data Broker* sammelt Daten innerhalb des gesamten Ökosystems und bietet diese an (vergleichbar mit Facebook). Der *Value-Integrator* erweitert den Betrachtungshorizont auf mehrere Nutzer und/oder Produkte und schafft einen Mehrwert z.B. in Form von Benchmarking-Services (Schuh, et al., 2017a, S. 24).

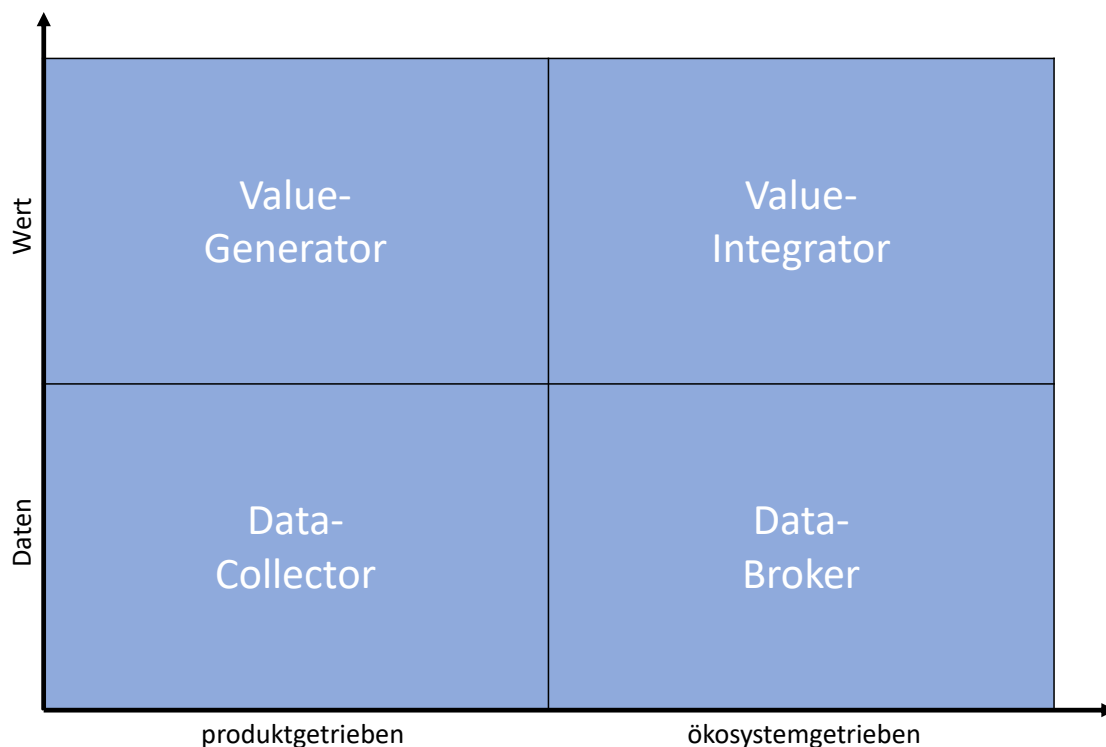


Abbildung 2.30 Leistungstypen datenbasierter Services (eigene Darstellung in Anlehnung an Schuh et al., 2017, S. 24)

Als Beispiele solcher Plattformen in der Industrie können ADAMOS und Catena-X genannt werden:

ADAMOS (Adaptive Manufacturing Open Solutions)

ADAMOS ist eine offene, herstellernerneutrale Industrial Internet of Things (IIoT) Plattform für den Maschinen- und Anlagenbau. Sie bietet den teilnehmenden Unternehmen die digitale Infrastruktur und die Funktionalitäten für die Entwicklung und Bereitstellung digitaler Services. Die auf ADAMIS IIoT entwickelten Lösungen können an den ADAMOS HUB angebunden werden und über den ADAMOS STORE vertrieben werden (ADAMOS, 2022).

Catena-X Automotive Network

Catena-X ist eine Plattform für den durchgängigen Datenaustausch aller Teilnehmer automobilier Wertschöpfungsketten. Dazu gehören Zulieferer, Entwicklungspartner, Produktionspartner, IT-Partner, Finanzpartner, Logistikpartner genauso, wie die Händler und Servicepartner und Kunden. Das Ziel ist die Etablierung eines globalen Netzwerks, in dem Unternehmen „vom KMU bis zum Konzern“ in der automobilen Wertschöpfungskette miteinander kooperieren (Catena-X, 2021).

Die Bereitstellung *eigener Plattformen* ist insbesondere für KMU mit zahlreichen Herausforderungen verbunden, da nicht nur entsprechendes Know-how erforderlich ist, sondern auch entsprechende Entwicklungskapazitäten benötigt werden (Bender, et al., 2020, S. 647). Zudem gilt es, aus einer Vielzahl möglicher Strategien die für das Unternehmen geeignetste Strategie zur Bereitstellung einer digitalen Plattform (vgl. Tabelle 2.8) auszuwählen (ebd., S. 648ff.).

Bereitstellung einer digitalen Plattform	Eigene Plattform	Vollständige Eigenentwicklung
		Nutzung von Technologiebausteinen
		Nutzung einer Whitelabel-Plattform
	Fremde Plattform	Kooperative Bereitstellung (Verbund)
		Anbindung an etablierte Plattform

Tabelle 2.8 Bereitstellungsstrategien für digitale Plattformen in Anlehnung an Bender et al., 2020, S. 649

Bender et al. (2021, S. 69) führen aus, dass es für KMU bei der Umsetzung digitaler Plattformen entscheidend sei, einen „wesentlichen Mehrwert zum bestehenden Geschäftsmodell“ erzielen zu können, da ihnen gegenüber größeren Unternehmen nur begrenzte Ressourcen zur Verfügung stünden (vgl. Abschnitt 2.1.5). Als Handlungsempfehlung geben sie KMU daher,

- die Potenziale digitaler Plattformen bei der Entwicklung ihres Geschäftsmodells zu berücksichtigen
- den zu erzielenden Mehrwert durch die Plattformen zu bewerten
- eine Plattformstrategie für geeignete Produkte und Services abzuleiten

2.3. Bewertung bestehender Industrie 4.0 Reifegradmodelle und -indizes

Nachdem im Abschnitt 2.1 die Ausgangssituation produzierender Unternehmen beschrieben wurde und im Abschnitt 2.2 die wesentlichen Aspekte der Transformation in Richtung Industrie 4.0, werden in diesem Abschnitt die bestehenden Industrie 4.0 Reifegradmodelle und -indizes analysiert und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet. Damit liefert dieser Abschnitt die Antworten auf die in Abschnitt 1.3 formulierte Forschungsfrage 1:

Wie gut eignen sich bestehende Industrie 4.0 Reifegradmodelle als Werkzeug für die digitale Transformation von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) sowie mittelständischen Unternehmen (Mittelstand) und welche eventuellen Defizite gibt es?

Die Ergebnisse aus dieser Analyse fließen anschließend entsprechend der Methodik des DSRM-Modells (vgl. Abschnitt 1.4) in die Anforderungen an das neue Modelldesign in Kapitel 3 ein.

Die Ermittlung von Industrie 4.0 Reifegradmodellen erfolgte im Rahmen einer Literaturrecherche im Zeitraum von Januar 2018 bis März 2018 mit einem Update im April 2022. Hierzu wurde in Google, Google Scholar, Springer Link und EBSCO nach den Begriffen „Reifegradmodell Industrie 4.0“, „Maturity Model Industry 4.0“, Reifegradindex Industrie 4.0“, „Maturity Index Industry 4.0“ gesucht. Dabei konnten 28 Reifegradmodelle identifiziert werden sowie sieben Übersichten über Reifegradmodelle (Schumacher, et al., 2016); (Kese & Terstegen, 2017); (Müller, et al., 2018); (Matt, et al., 2018); (Angreani, et al., 2020); (Mrugalska & Stasiuk-Piekarska, 2020); (Dommermuth, 2021). Nach der Reduzierung um alle Dubletten erfolgte eine weitere Reduzierung der Reifegradmodelle anhand folgender Kriterien:

- alle-Modelle, die nicht mehr verfügbar sind (insbesondere internetbasierte Modelle)
- alle Modelle, zu denen es keine öffentlich zugängliche Dokumentation gibt
- alle Modelle, die einen zu schmalen Handlungsbereich abdecken (z.B. nur Logistik, Supply Chain Management, Smart Factory, IT-Landschaft oder Organisationsthemen)
- alle Modelle, die nur den Status Quo bewerten, aber keinen stufenweisen Entwicklungspfad zu einem höheren Grad der Reife aufzeigen

- alle Modelle von Unternehmensberatungen oder Anbietern von Industrie 4.0 Technologie
- alle Modelle, die nicht durch das anwendende Unternehmen selbst durchgeführt werden können

Als Ergebnis konnten die in Tabelle 2.9 dargestellten zehn Reifegradmodelle für die weitere Bewertung ermittelt werden.

Nr.	Industrie 4.0 Reifegradmodell
M1	Industrie 4.0 Maturity Index (Schuh, et al., 2017)
M2	Werkzeugkasten Industrie 4.0 (VDMA, 2017)
M3	Industrie 4.0-Readiness (Lichtblau, et al., 2015)
M4	Industrie 4.0 Assessment (Matt, et al., 2018)
M5	Quick-Check Industrie 4.0 (Pierenkemper, et al., 2019)
M6	Industrie 4.0-Reifegradmodell (Schuh, et al., 2018)
M7	Reifegradmodell (Appelfeller & Feldmann, 2018)
M8	Industrie 4.0-Reifegradmodell (Hübner, 2018)
M9	Industrie-4.0-Reifegradmodell (Puchan & Zeifang, 2017)
M10	InAsPro-Reifegradmodell (Ehemann, et al., 2021)

Tabelle 2.9 Ausgewählte Industrie 4.0 Reifegradmodelle

2.3.1. Methodik der Bewertung

Auf Basis der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Technologien, Handlungsbereiche und Erfolgsfaktoren der digitalen Transformation wurden entsprechende Kriterien zur Bewertung der Reifegradmodelle entwickelt. Diese lassen sich in fünf Bereiche unterteilen:

1. Industrie 4.0 Abdeckung

Es wird bewertet, inwieweit die Reifegradmodelle die Dimensionen Smart Factory, Smart Supply Chain, Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus und neue Geschäftsmodelle abdecken. Anhand der Ausführungen in den Abschnitten 2.2.3, 2.2.4, 2.2.5 und 2.2.6 wurden die in Tabelle 2.10 dargestellten Kriterien zur Bewertung der Industrie 4.0 Abdeckung von Industrie 4.0 Reifegradmodellen ermittelt. An erster Stelle wurde jeweils ein allge-

meines Kriterium ergänzt (z.B. „Smart Factory allgemein“), das dann greift, wenn das zu bewertende Reifegradmodell allgemeine Aussagen macht, die nicht einem der anderen Bewertungskriterien direkt zuzuordnen sind.

Industrie 4.0 Abdeckung	
Dimension	Bewertungskriterien
1. Smart Factory	1.1 Smart Factory allgemein 1.2 Produktion 1.3 Datenerfassung 1.4 Assistenzsysteme 1.5 Produktionsplanung und -steuerung 1.6 Intralogistik 1.7 Instandhaltungsmanagement 1.8 Werkzeugmanagement 1.9 Qualitätsmanagement 1.10 Horizontale- und vertikale Integration 1.11 Big Data Analyse
2. Smart Supply Chain	2.1 Smart Supply Chain allgemein 2.2 Wertschöpfungsnetzwerke 2.3 Echtzeitstatus & Tracking 2.4 Planung, Steuerung und Überwachung 2.5 Assistenzsysteme 2.6 Transportmanagement 2.7 Horizontale Integration
3. Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	3.1 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus allgemein 3.2 Smart Products (Abbildung des Produktlebenszyklus) 3.3 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus
4. Neue Geschäftsmodelle	4.1 Geschäftsmodelle allgemein 4.2 Smart Products (Geschäftsmodell) 4.3 Smart Services 4.4 Digitale Geschäftsmodelle 4.5 Digitale Plattformen

Tabelle 2.10 Kriterien zur Bewertung der Industrie 4.0 Abdeckung von Reifegradmodellen

Bei der Bewertung wird geprüft, inwieweit das jeweilige Bewertungskriterium im Reifegrad des zu prüfenden Modells erwähnt und beschrieben wird. Hierzu wird das in Tabelle 2.11 dargestellte Bewertungsschema mit vier Stufen angewendet.

Bewertung	Beschreibung
3	Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegradmodell ausführlich berücksichtigt
2	Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt
1	Das Kriterium wird indirekt erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt
0	Das Kriterium wird nicht im Reifegradmodell berücksichtigt

Tabelle 2.11 Bewertungsschema zur Bewertung des Betrachtungsbereichs von Reifegradmodellen

2. Sozio-technischer Fokus

In diesem Bereich wird bewertet, inwieweit die Reifegradmodelle nicht nur die technischen Aspekte von Industrie betrachten, sondern das gesamte sozio-technische System mit den Dimensionen Mensch, Technik und Organisation. Hierzu wurden in Anlehnung an Abschnitt 2.2.3.11 die in Tabelle 2.12 dargestellten Kriterien zur Bewertung des sozio-technischen Fokus von Industrie 4.0 Reifegradmodellen ermittelt. An erster Stelle wurde jeweils ein allgemeines Kriterium ergänzt (z.B. „Dimension Mensch allgemein“), das dann greift, wenn das zu bewertende Reifegradmodell allgemeine Aussagen macht, die nicht einem der anderen Bewertungskriterien direkt zuzuordnen sind.

Sozio-technischer Fokus	
Dimension	Bewertungskriterien
5. Mensch	5.1 Dimension Mensch allgemein 5.2 Rolle des Menschen 5.3 Qualifikation
6. Technik	6.1 Dimension Technik allgemein 6.2 Betriebsmittel (Produktion/Logistik) 6.3 Cyber-physische Systeme (CPS) 6.4 Roboter und Assistenzsysteme 6.5 Automatisierungstechnik 6.6 Software
7. Organisation	7.1 Dimension Organisation allgemein 7.2 Aufbauorganisation

	7.3 Ablauforganisation
	7.4 Arbeitsgestaltung
	7.5 Kommunikation
	7.6 Wissens- und Kompetenzmanagement

Tabelle 2.12 Kriterien zur Bewertung des sozio-technischen Fokus von Reifegradmodellen

Bei der Bewertung wird geprüft, inwieweit das jeweilige Bewertungskriterium im Reifegrad des zu prüfenden Modells erwähnt und beschrieben wird. Hierzu wird das in Tabelle 2.11 dargestellte Bewertungsschema mit vier Stufen angewendet.

3. Management und Unternehmenskultur

Die Reifegradmodelle werden in diesem Bereich bewertet, inwieweit sie die für eine erfolgreiche Transformation wichtigen Aspekte Transformationsstrategie, Erfolgsfaktoren des Change Managements und Unternehmenskultur (vgl. Abschnitt 2.2.3.12) betrachten. Damit ergeben sich die in Tabelle 2.13 dargestellten Bewertungskriterien.

Management und Unternehmenskultur	
Dimension	Bewertungskriterien
8. Management und Unternehmenskultur	8.1 Transformationsstrategie 8.2 Change Management 8.3 Unternehmenskultur

Tabelle 2.13 Kriterien zur Bewertung des Bereichs Management und Unternehmenskultur

Bei der Bewertung wird geprüft, inwieweit das jeweilige Bewertungskriterium im Reifegrad des zu prüfenden Modells erwähnt und beschrieben wird. Hierzu wird das in Tabelle 2.11 dargestellte Bewertungsschema mit vier Stufen angewendet.

4. Anwendbarkeit des Reifegradmodells

Mit Hilfe von Reifegradmodellen muss es möglich sein, den Ist-Zustands des Unternehmens zu bewerten und einen stufenweisen Entwicklungspfad zu einem höheren Grad der Reife aufzeigen (Knackstedt, et al., 2009, S. 535). Bei der Bewertung der Reifegradmodelle wird daher geprüft, ob sich mit ihnen der Ist-Zustand ermitteln lässt, ob sich darauf basierend ein Soll-Zustand definieren lässt und ob sich Maßnahmen für die Transformation vom Ist-Zustand zum Soll-Zustand ableiten lassen. Zusätzlich wird bewertet, ob sich die typische Ausgangssituation von KMU und Mittelstand gemäß Abschnitt 2.1 im Reifegradmodell darstellen lässt. Hierzu wurden die in Tabelle 2.14 dargestellten Kriterien zur Bewertung der Anwendbarkeit des Reifegradmodells ermittelt.

Anwendbarkeit des Reifegradmodells	
Dimension	Bewertungskriterien
9. Anwendbarkeit des Reifegradmodells	9.1 Ausgangsbasis von KMU/Mittelstand darstellbar 9.2 Ermittlung des Ist-Zustands 9.3 Definition des Soll-Zustands 9.4 Ableitung von Maßnahmen

Tabelle 2.14 Kriterien zur Bewertung Anwendbarkeit von Reifegradmodellen

Bei der Bewertung wird geprüft, ob das jeweilige Bewertungskriterium zutrifft. Hierzu wird das in Tabelle 2.15 dargestellte Bewertungsschema mit zwei Stufen angewendet.

Bewertung	Beschreibung
3	Das Kriterium ist erfüllt
0	Das Kriterium ist nicht erfüllt

Tabelle 2.15 Bewertungsschema zur Bewertung der Anwendbarkeit des Reifegradmodells

5. Reifegradindex

Abschließend wird noch bewertet, ob die Reifegradmodelle einen Reifegradindex berechnen, wobei unterschieden wird zwischen einem Gesamtindex und einem Index je Betrachtungsbereich. Damit ergeben sich die in Tabelle 2.16 dargestellten Bewertungskriterien.

Reifegradindex	
Dimension	Bewertungskriterien
10. Reifegradindex	10.1 Reifegradindex gesamt 10.2 Reifegradindex je Betrachtungsbereich

Tabelle 2.16 Kriterien zur Bewertung des Reifegradindex

Bei der Bewertung wird geprüft, ob das jeweilige Bewertungskriterium zutrifft. Hierzu wird das in Tabelle 2.15 dargestellte Bewertungsschema mit zwei Stufen angewendet.

Darüber hinaus wird bei allen fünf Betrachtungsbereichen (z.B. Industrie 4.0 Abdeckung) und bei allen Dimensionen (z.B. Smart Factory) der prozentuale Anteil der maximal zu erreichenden zu erreichenden Punkte berechnet.

2.3.2. Bewertung der Modelle

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Reifegradmodelle jeweils mit ihren Betrachtungsbereichen, Reifegradstufen und Testergebnissen vorgestellt.

2.3.2.1. Industrie 4.0 Maturity Index (acatech)

Der Industrie 4.0 Maturity Index von acatech (Schuh, et al., 2017) zielt darauf ab, Unternehmen eine „Digitale Roadmap“ zu Industrie 4.0 aufzuzeigen. Hierzu werden die vorhandenen und aufzubauenden Fähigkeiten anhand von vier Gestaltungsfeldern, fünf Funktionsbereichen und sechs Reifegradstufen ermittelt (vgl. Tabelle 2.17). Die Ermittlung der Reife erfolgt durch die Beantwortung eines Fragebogens mit Fragen zu den Geschäftsprozessen der fünf Funktionsbereiche. Die Antwortmöglichkeiten entsprechen den jeweiligen Reifegradstufen.

Betrachtungsbereiche	Reifegradstufen
1. Gestaltungsfelder	1. Computerisierung
1.1 Ressourcen	2. Konnektivität
1.1.1 Digitale Befähigung	3. Sichtbarkeit
1.1.2 Geregelte Kommunikation	4. Transparenz
1.2 Informationssysteme	5. Prognosefähigkeit
1.2.1 Selbstlernende Informationsverarbeitung	6. Adaptierbarkeit
1.2.2 Integration der Informationssysteme	
1.3 Organisationsstruktur	
1.3.1 Organische interne Organisation	
1.3.2 Dynamische Kollaboration im Wertschöpfungsnetzwerk	
1.4 Kultur	
1.4.1 Bereitschaft zur Veränderung	
1.4.2 Soziale Kollaboration	
2. Funktionsbereiche	
2.1 Entwicklung (Ressourcen, Informationssysteme, Organisationsstruktur, Kultur)	
2.2 Produktion (Ressourcen, Informationssysteme, Organisationsstruktur, Kultur)	
2.3 Logistik (Ressourcen, Informationssysteme, Organisationsstruktur, Kultur)	
2.4 Service (Ressourcen, Informationssysteme, Organisationsstruktur, Kultur)	
2.5 Marketing/Vertrieb (Ressourcen, Informationssysteme, Organisationsstruktur, Kultur)	

Tabelle 2.17 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen des Industrie 4.0 Maturity Index (acatech)

Tabelle 2.18 zeigt das Ergebnis der Bewertung. Die Bereiche Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus und neue Geschäftsmodelle haben eine recht gute Industrie 4.0 Abdeckung von 78 Prozent bzw. 73 Prozent. Im Bereich der Smart Factory sind die für produzierende Unternehmen wichtigen Aspekte, wie Produktion, Intralogistik, Instandhaltungsmanagement und Werkzeugmanagement nur oberflächlich beschrieben, Qualitätsmanagement wurde nicht erwähnt. Der Bereich Smart Supply Chain ist gut abgedeckt, es fehlt jedoch an Detaillierungen in den Bereichen Planung, Steuerung und Überwachung sowie Assistenzsys-

teme in der Supply Chain. Der sozio-technische Ansatz wurde verfolgt, organisatorische Aspekte sowie die sich verändernde Rolle des Menschen wurden nur oberflächlich bzw. gar nicht beschrieben. Unternehmenskultur und Aspekte des Change Managements wurden beschrieben. Auf die Transformationsstrategie wurde innerhalb des Reifegrads nicht eingegangen, da die Autoren die Strategie als „Input“ vor der Analyse sehen. Das Reifegradmodell lässt sich in allen geforderten Bereichen anwenden. Aufgrund seines mehrdimensionalen Aufbaus ist es jedoch erklärungsbedürftig und könnte manchen KMU/Mittelstand als (zu) komplex erscheinen. Ein Reifegradindex wird je Betrachtungsbereich ermittelt. Abbildung 2.31 stellt das Profil des Industrie 4.0 Maturity Index zusammenfassend grafisch dar.

Industrie 4.0 Maturity Index (acatech)			
Bewertungskategorie	Bewertung	Bewertungskategorie	Bewertung
Industrie 4.0 Abdeckung	63%	Sozio-technischer Fokus	58%
1. Smart Factory	55%	5. Mensch	33%
1.1 Smart Factory allgemein	1	5.1 Dimension Mensch allgemein	2
1.2 Produktion	1	5.2 Rolle des Menschen	0
1.3 Datenerfassung	3	5.3 Qualifikation	1
1.4 Assistenzsysteme	2		
1.5 Produktionsplanung und -steuerung	2	6. Technik	72%
1.6 Intralogistik	1	6.1 Dimension Technik allgemein	2
1.7 Instandhaltungsmanagement	1	6.2 Betriebsmittel (Produktion/Logistik)	2
1.8 Werkzeugmanagement	1	6.3 Cyber-physische Systeme (CPS)	3
1.9 Qualitätsmanagement	0	6.4 Roboter und Assistenzsysteme	2
1.10 Horizontale- und vertikale Integration	3	6.5 Automatisierungstechnik	1
1.11 Big Data Analyse	3	6.6 Software	3
2. Smart Supply Chain	62%	7. Organisation	56%
2.1 Smart Supply Chain allgemein	2	7.1 Dimension Organisation allgemein	2
2.2 Wertschöpfungsnetzwerke	2	7.2 Aufbauorganisation	1
2.3 Echtzeitstatus & Tracking	2	7.3 Ablauforganisation	1
2.4 Planung, Steuerung und Überwachung	1	7.4 Arbeitsgestaltung	1
2.5 Assistenzsysteme	1	7.5 Kommunikation	3
2.6 Transportmanagement	2	7.6 Wissens- und Kompetenzmanagement	2
2.7 Horizontale Integration	3		
		Management und Unternehmenskultur	56%
3. Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	78%	8. Management und Unternehmenskultur	56%
3.1 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus allgemein	2	8.1 Transformationsstrategie	0
3.2 Smart Products (Abbildung Produktlebenszyklus)	2	8.2 Change Management	2
3.3 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	3	8.3 Unternehmenskultur	3
4. Neue Geschäftsmodelle	73%	Anwendbarkeit des Reifegradmodells	92%
4.1 Geschäftsmodelle allgemein	2	9. Anwendbarkeit des Reifegradmodells	92%
4.2 Smart Products (Geschäftsmodell)	3	9.1 Ausgangsbasis von KMU/Mittelstand darstellbar	2
4.3 Smart Services	3	9.2 Ermittlung des Ist-Zustands	3
4.4 Digitale Geschäftsmodelle	1	9.3 Definition des Soll-Zustands	3
4.5 Digitale Plattformen	2	9.4 Ableitung von Maßnahmen	3
3=Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegradmodell ausführlich berücksichtigt		Reifegradindex	50%
2=Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt		10. Reifegradindex	50%
1=Das Kriterium wird indirekt erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt		10.1 Reifegradindex gesamt	0
0=Das Kriterium wird nicht im Reifegradmodell berücksichtigt		10.2 Reifegradindex je Betrachtungsbereich	3

Tabelle 2.18 Bewertung des Industrie 4.0 Maturity Index (acatech)

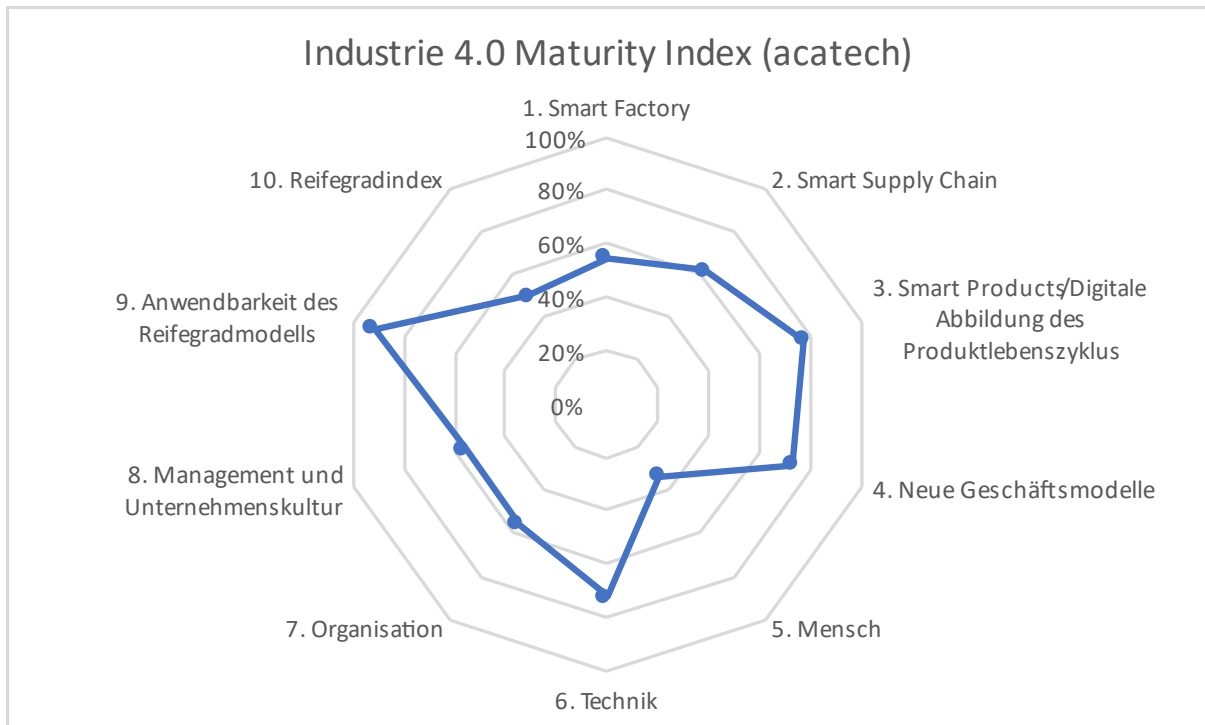


Abbildung 2.31 Profil des Industrie 4.0 Maturity Index (acatech)

2.3.2.2. Werkzeugkasten Industrie 4.0 (VDMA)

Der Werkzeugkasten Industrie 4.0 des VDMA (VDMA, 2017) wurde insbesondere für die mittelständischen Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus entwickelt, um ihnen Orientierung auf dem Weg zu Industrie 4.0 zu geben und um ihnen die Potenziale im Bereich ihrer Produkte und ihrer Produktion aufzuzeigen. Hierzu werden die Reifegrade von Produkten und Produktion in jeweils sechs Betrachtungsbereichen und fünf Reifegradstufen (vgl. Tabelle 2.19) tabellarisch dargestellt, so dass sich das Unternehmen selbst einordnen kann.

Betrachtungsbereiche	Reifegradstufen
1. Produkte	1. Stufe 1
1.1 Integration von Sensoren/Aktoren	2. Stufe 2
1.2 Kommunikation/Connectivity	3. Stufe 3
1.3 Funktionalitäten zur Datenspeicherung und Informationsaustausch	4. Stufe 4
1.4 Monitoring	5. Stufe 5
1.5 Produktbezogene IT-Services	
1.6 Geschäftsmodelle um das Produkt	
2. Produktion	
2.1 Datenverarbeitung in der Produktion	
2.2 Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M)	
2.3 Unternehmensweise Vernetzung mit der Produktion	
2.4 IKT-Infrastruktur in der Produktion	
2.5 Mensch-Maschine-Schnittstellen	

2.6 Effizienz bei kleinen Losgrößen

Tabelle 2.19 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen des Werkzeugkasten Industrie 4.0 (VDMA)

Tabelle 2.20 zeigt das Ergebnis der Bewertung. Der Werkzeugkasten Industrie 4.0 fokussiert hauptsächlich auf die Bereiche Smart Products, Smart Services sowie technische Aspekte, wie Datenerfassung, Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M) und Kommunikation/Connectivity. Wichtige Themen der Smart Factory, wie Intralogistik, Instandhaltungsmanagement, Werkzeugmanagement und Qualitätsmanagement werden nicht betrachtet. Auch auf den Faktor Mensch, organisatorische Themen sowie Management und Unternehmenskultur wird nicht oder nur eingeschränkt eingegangen. Das Reifegradmodell lässt sich in allen geforderten Bereichen anwenden. Ein Reifegradindex wird nicht berechnet. Abbildung 2.32 stellt das Profil des Werkzeugkasten Industrie 4.0 zusammenfassend grafisch dar.

Werkzeugkasten Industrie 4.0 (VDMA)			
Bewertungskategorie	Bewertung	Bewertungskategorie	Bewertung
Industrie 4.0 Abdeckung	37%	Sozio-technischer Fokus	33%
1. Smart Factory	36%	5. Mensch	0%
1.1 Smart Factory allgemein	1	5.1 Dimension Mensch allgemein	0
1.2 Produktion	2	5.2 Rolle des Menschen	0
1.3 Datenerfassung	2	5.3 Qualifikation	0
1.4 Assistenzsysteme	2	6. Technik	50%
1.5 Produktionsplanung und -steuerung	2	6.1 Dimension Technik allgemein	2
1.6 Intralogistik	0	6.2 Betriebsmittel (Produktion/Logistik)	2
1.7 Instandhaltungsmanagement	0	6.3 Cyber-physische Systeme (CPS)	1
1.8 Werkzeugmanagement	0	6.4 Roboter und Assistenzsysteme	2
1.9 Qualitätsmanagement	0	6.5 Automatisierungstechnik	1
1.10 Horizontale- und vertikale Integration	2	6.6 Software	1
1.11 Big Data Analyse	1	7. Organisation	33%
2. Smart Supply Chain	29%	7.1 Dimension Organisation allgemein	1
2.1 Smart Supply Chain allgemein	1	7.2 Aufbauorganisation	1
2.2 Wertschöpfungsnetzwerke	2	7.3 Ablauforganisation	1
2.3 Echtzeitstatus & Tracking	1	7.4 Arbeitsgestaltung	1
2.4 Planung, Steuerung und Überwachung	0	7.5 Kommunikation	2
2.5 Assistenzsysteme	0	7.6 Wissens- und Kompetenzmanagement	0
2.6 Transportmanagement	0	Management und Unternehmenskultur	0%
2.7 Horizontale Integration	2	8. Management und Unternehmenskultur	0%
3. Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	44%	8.1 Transformationsstrategie	0
3.1 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus allgemein	1	8.2 Change Management	0
3.2 Smart Products (Abbildung Produktlebenszyklus)	3	8.3 Unternehmenskultur	0
3.3 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	0	Anwendbarkeit des Reifegradmodells	100%
4. Neue Geschäftsmodelle	47%	9. Anwendbarkeit des Reifegradmodells	100%
4.1 Geschäftsmodelle allgemein	1	9.1 Ausgangsbasis von KMU/Mittelstand darstellbar	3
4.2 Smart Products (Geschäftsmodell)	2	9.2 Ermittlung des Ist-Zustands	3
4.3 Smart Services	2	9.3 Definition des Soll-Zustands	3
4.4 Digitale Geschäftsmodelle	0	9.4 Ableitung von Maßnahmen	3
4.5 Digitale Plattformen	2	Reifegradindex	0%
3=Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegradmodell ausführlich berücksichtigt		10. Reifegradindex	0%
2=Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt		10.1 Reifegradindex gesamt	0
1=Das Kriterium wird indirekt erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt		10.2 Reifegradindex je Betrachtungsbereich	0
0=Das Kriterium wird nicht im Reifegradmodell berücksichtigt			

Tabelle 2.20 Bewertung des Werkzeugkasten Industrie 4.0 (VDMA)

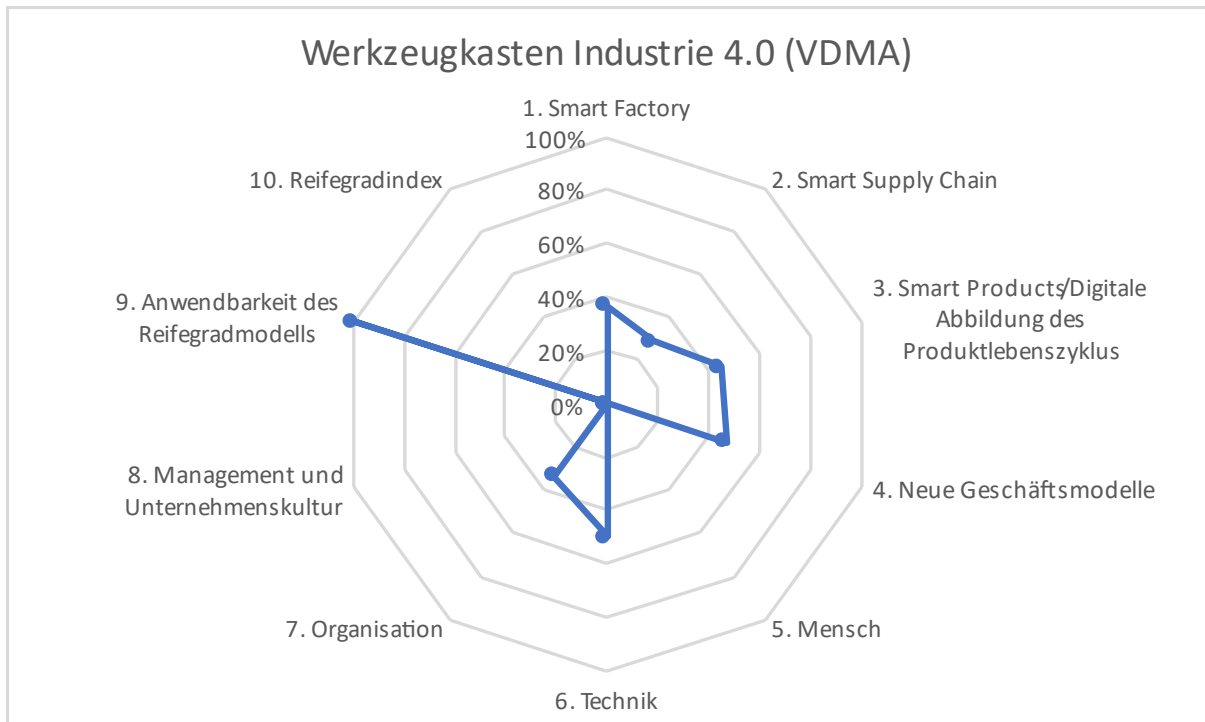


Abbildung 2.32 Profil des Werkzeugkasten Industrie 4.0 (VDMA)

2.3.2.3. Industrie 4.0-Readiness (IMPULS-Stiftung des VDMA)

Das Industrie 4.0-Readiness Modell der IMPULS-Stiftung des VDMA (Lichtblau, et al., 2015) wurde entwickelt, um den Unternehmen darzustellen, wo sie aktuell stehen und ob sie bereits die Potenziale von Industrie nutzen. Die Ermittlung der Reife erfolgt durch die Beantwortung eines Fragebogens mit Fragen zu sechs Betrachtungsbereichen und insgesamt 18 Unterpunkten. Die Antwortmöglichkeiten entsprechen jeweils einer von sechs Reifegradstufen (vgl. Tabelle 2.21).

Betrachtungsbereiche	Reifegradstufen
1. Strategie und Organisation	1. Stufe 0 Außenstehender
1.1 Strategie	2. Stufe 1 Anfänger
1.2 Investitionen	3. Stufe 2 Fortgeschrittener
1.3 Innovationsmanagement	4. Stufe 3 Erfahrener
2. Smart Factory	5. Stufe 4 Experte
2.1 Digitales Abbild	6. Stufe 5 Exzellenz
2.2 Maschinenpark	
2.3 Datennutzung	
2.4 IT-Systeme	
3. Smart Operations	
3.1 Cloud-Nutzung	
3.2 IT-Sicherheit	
3.3 Autonome Prozesse	
3.4 Informationsaustausch	
4. Smart Products	
4.1 Datenanalyse Nutzungsphase	

<ul style="list-style-type: none"> 4.2 IKT-Zusatzfunktionalitäten 5. Data-driven Services <ul style="list-style-type: none"> 5.1 Anteil Datennutzung 5.2 Umsatzanteil 5.3 Datenbasierte Dienstleistungen 6. Mitarbeiter <ul style="list-style-type: none"> 6.1 Aufbau von Kompetenzen 6.2 Kompetenzen der Mitarbeiter 	
---	--

Tabelle 2.21 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen des Industrie 4.0-Readiness Modells (IMPULS-Stiftung)

Tabelle 2.22 zeigt das Ergebnis der Bewertung. Das Industrie 4.0-Readiness Modell fokussiert auf eine recht breite Abdeckung der Industrie 4.0 Themen. Die Bereiche Smart Products und Smart Services sind gut abgedeckt. Im Bereich der Smart Factory wurden fast alle Kriterien direkt im Reifegrad berücksichtigt. Werkzeugmanagement fehlt jedoch und Themen der Produktion sowie Assistenzsysteme für den Menschen wurden nur indirekt und oberflächlich erwähnt. Der Bereich Smart Supply Chain wird überwiegend nur indirekt angesprochen ist daher nur oberflächlich abgedeckt. Beim sozio-technischen Fokus ist der Bereich Mensch gut abgedeckt. Der Bereich Technik wurde jedoch überwiegend oberflächlich behandelt, es fehlen Detaillierungen zu cyber-physischen Produktionssystemen, Robotern und Assistenzsystemen sowie zu Aspekten der Automatisierung. Bis auf das Kriterium Wissens- und Kompetenzmanagement wurden organisatorische Themen nicht oder nur oberflächlich beschrieben. Im Bereich Management und Unternehmenskultur wurden die Aspekte Transformationsstrategie und Change Management beschrieben, auf die Unternehmenskultur wurde nur indirekt eingegangen. Das Reifegradmodell lässt sich in allen geforderten Bereichen anwenden. Ein Reifegradindex wird je Betrachtungsbereich ermittelt. Abbildung 2.33 stellt das Profil des Industrie 4.0-Readiness Modells zusammenfassend grafisch dar.

Industrie 4.0-Readiness (IMPULS-Stiftung)			
Bewertungskategorie	Bewertung	Bewertungskategorie	Bewertung
Industrie 4.0 Abdeckung	56%	Sozio-technischer Fokus	51%
1. Smart Factory	61%	5. Mensch	78%
1.1 Smart Factory allgemein	3	5.1 Dimension Mensch allgemein	2
1.2 Produktion	1	5.2 Rolle des Menschen	2
1.3 Datenerfassung	2	5.3 Qualifikation	3
1.4 Assistenzsysteme	1	6. Technik	56%
1.5 Produktionsplanung und -steuerung	2	6.1 Dimension Technik allgemein	2
1.6 Intralogistik	2	6.2 Betriebsmittel (Produktion/Logistik)	2
1.7 Instandhaltungsmanagement	2	6.3 Cyber-physische Systeme (CPS)	1
1.8 Werkzeugmanagement	0	6.4 Roboter und Assistenzsysteme	1
1.9 Qualitätsmanagement	2	6.5 Automatisierungstechnik	1
1.10 Horizontale- und vertikale Integration	3	6.6 Software	3
1.11 Big Data Analyse	2	7. Organisation	33%
2. Smart Supply Chain	43%	7.1 Dimension Organisation allgemein	1
2.1 Smart Supply Chain allgemein	2	7.2 Aufbauorganisation	1
2.2 Wertschöpfungsnetzwerke	1	7.3 Ablauforganisation	1
2.3 Echtzeitstatus & Tracking	2	7.4 Arbeitsgestaltung	0
2.4 Planung, Steuerung und Überwachung	1	7.5 Kommunikation	1
2.5 Assistenzsysteme	1	7.6 Wissens- und Kompetenzmanagement	2
2.6 Transportmanagement	0	Management und Unternehmenskultur	67%
2.7 Horizontale Integration	2	8. Management und Unternehmenskultur	67%
3. Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	56%	8.1 Transformationsstrategie	3
3.1 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus allgemein	2	8.2 Change Management	2
3.2 Smart Products (Abbildung Produktlebenszyklus)	2	8.3 Unternehmenskultur	1
3.3 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	1	Anwendbarkeit des Reifegradmodells	100%
4. Neue Geschäftsmodelle	67%	9. Anwendbarkeit des Reifegradmodells	100%
4.1 Geschäftsmodelle allgemein	2	9.1 Ausgangsbasis von KMU/Mittelstand darstellbar	3
4.2 Smart Products (Geschäftsmodell)	3	9.2 Ermittlung des Ist-Zustands	3
4.3 Smart Services	3	9.3 Definition des Soll-Zustands	3
4.4 Digitale Geschäftsmodelle	2	9.4 Ableitung von Maßnahmen	3
4.5 Digitale Plattformen	0	Reifegradindex	50%
3=Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegradmodell ausführlich berücksichtigt		10. Reifegradindex	50%
2=Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt		10.1 Reifegradindex gesamt	0
1=Das Kriterium wird indirekt erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt		10.2 Reifegradindex je Betrachtungsbereich	3
0=Das Kriterium wird nicht im Reifegradmodell berücksichtigt			

Tabelle 2.22 Bewertung des Industrie 4.0-Readiness Modells (IMPULS-Stiftung)

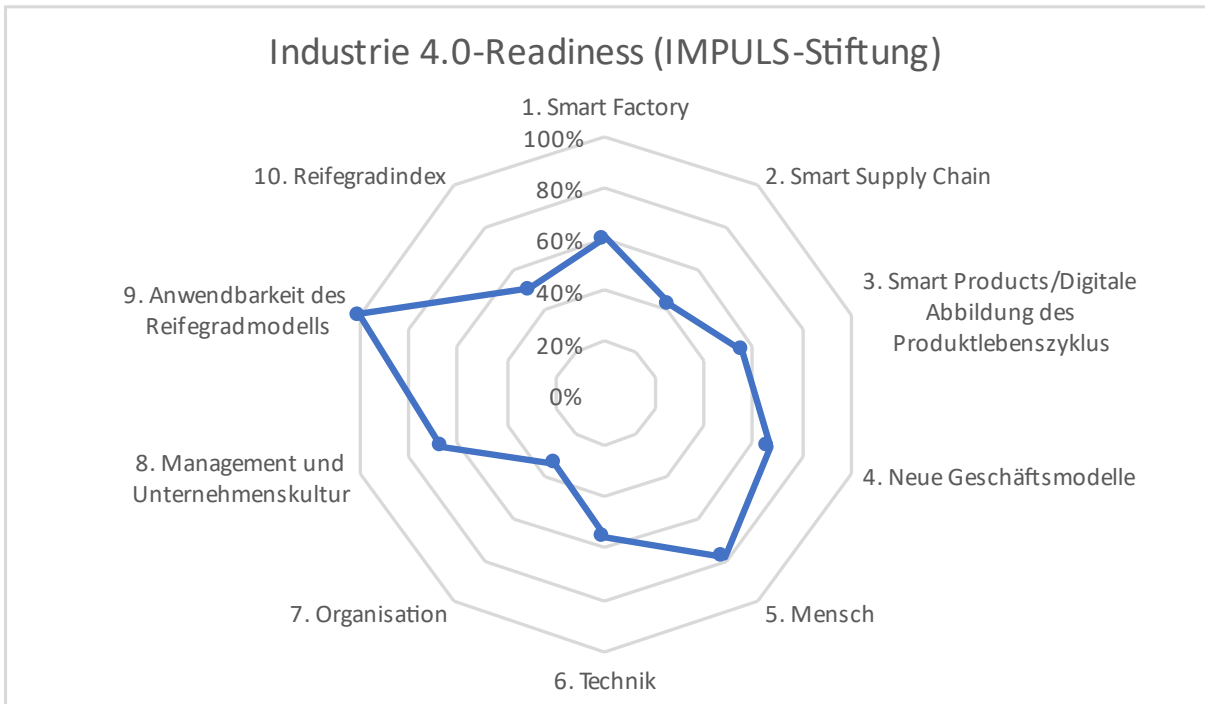


Abbildung 2.33 Profil des Industrie 4.0-Readiness Modells (IMPULS-Stiftung)

2.3.2.4. Industrie 4.0 Assessment (Matt et al.)

Das Industrie 4.0 Assessment Modell von Matt et al. (2018) ist Teil einer 5-stufigen Methode zur Einführung von Industrie 4.0 in KMUs. Es dient der Selbstbewertung des Unternehmens bevor eine Potenzialanalyse und ein Implementierungsplan folgen. Die Ermittlung der Reife erfolgt durch die Beantwortung eines Fragebogens mit Fragen zu vier Betrachtungsbereichen und insgesamt 22 Unterpunkten. Die Antwortmöglichkeiten entsprechen jeweils einer von fünf Reifegradstufen (vgl. Tabelle 2.23).

Betrachtungsbereiche	Reifegradstufen
1. Operation	1. Maturity Level 1
1.1 Agile Manufacturing Systems	2. Maturity Level 2
1.2 Monitoring & Decision Systems	3. Maturity Level 3
1.3 Big Data for Production	4. Maturity Level 4
1.4 Production Planning and Control	5. Maturity Level 5
2. Organization	
2.1 Business Models 4.0	
2.2 Innovation Strategy	
2.3 Strategy 4.0	
2.4 Supply Chain Management 4.0	
3. Socio-Culture	
3.1 Human Ressource 4.0	
3.2 Work 4.0	
3.3 Culture 4.0	
4. Technology	
4.1 Big Data	
4.2 Communication & Connectivity	
4.3 Cyber Security	
4.4 Deep Learning, Machine Learning, Artificial Intelligence	
4.5 Additive Manufacturing	
4.6 Maintenance	
4.7 Robotics & Automation	
4.8 Product Design and Development	
4.9 Standards 4.0	
4.10 Virtual Reality, Augmented Reality and Simulation	

Tabelle 2.23 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen des Industrie 4.0 Assessment (Matt et al.)

Tabelle 2.24 zeigt das Ergebnis der Bewertung. Das Industrie 4.0 Assessment Modell fokussiert auf eine recht breite Abdeckung der Industrie 4.0 Themen. Am besten werden die neuen Geschäftsmodelle mit Smart Products und Smart Services abgedeckt sowie der Bereich Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus. Der Bereich Smart Factory ist nur durchschnittlich abgedeckt. Es fehlen die Aspekte Werkzeugmanagement und Qualitätsmanagement, auf die Datenerfassung wird nur indirekt eingegangen. Im sozio-technischen Bereich

hat das Modell eine sehr gute Abdeckung der Dimension Mensch, neben Themen der Qualifikation und der Weiterbildung wird auch auf die Rolle des Menschen eingegangen. Ebenfalls ausführlich beschrieben ist der Bereich Technik während organisatorische Themen bis auf Wissens- und Kompetenzmanagement nur indirekt angesprochen werden. Auf das Kriterium Kommunikation wird nicht eingegangen. Sehr gut abgebildet ist der Bereich Management und Unternehmenskultur, in dem die Themen Transformationsstrategie, Change Management und Unternehmenskultur aufgegriffen werden. Die Anwendbarkeit des Reifegradindex erfüllt alle Kriterien. Der Reifegradindex wird je Betrachtungsbereich berechnet, ein Gesamtreifegradindex wird nicht berechnet. Abbildung 2.34 stellt das Profil des Industrie 4.0 Assessment Modells zusammenfassend grafisch dar.

Industrie 4.0 Assessment (Matt et al.)			
Bewertungskategorie	Bewertung	Bewertungskategorie	Bewertung
Industrie 4.0 Abdeckung	55%	Sozio-technischer Fokus	60%
1. Smart Factory	52%	5. Mensch	89%
1.1 Smart Factory allgemein	2	5.1 Dimension Mensch allgemein	3
1.2 Produktion	2	5.2 Rolle des Menschen	3
1.3 Datenerfassung	1	5.3 Qualifikation	2
1.4 Assistenzsysteme	2		
1.5 Produktionsplanung und -steuerung	2	6. Technik	67%
1.6 Intralogistik	2	6.1 Dimension Technik allgemein	2
1.7 Instandhaltungsmanagement	2	6.2 Betriebsmittel (Produktion/Logistik)	2
1.8 Werkzeugmanagement	0	6.3 Cyber-physische Systeme (CPS)	2
1.9 Qualitätsmanagement	0	6.4 Roboter und Assistenzsysteme	2
1.10 Horizontale- und vertikale Integration	2	6.5 Automatisierungstechnik	2
1.11 Big Data Analyse	2	6.6 Software	2
2. Smart Supply Chain	43%	7. Organisation	39%
2.1 Smart Supply Chain allgemein	2	7.1 Dimension Organisation allgemein	2
2.2 Wertschöpfungsnetzwerke	2	7.2 Aufbauorganisation	1
2.3 Echtzeitstatus & Tracking	2	7.3 Ablauforganisation	1
2.4 Planung, Steuerung und Überwachung	1	7.4 Arbeitsgestaltung	1
2.5 Assistenzsysteme	1	7.5 Kommunikation	0
2.6 Transportmanagement	0	7.6 Wissens- und Kompetenzmanagement	2
2.7 Horizontale Integration	1		
		Management und Unternehmenskultur	89%
3. Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	67%	8. Management und Unternehmenskultur	89%
3.1 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus allgemein	2	8.1 Transformationsstrategie	3
3.2 Smart Products (Abbildung Produktlebenszyklus)	2	8.2 Change Management	2
3.3 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	2	8.3 Unternehmenskultur	3
4. Neue Geschäftsmodelle	73%	Anwendbarkeit des Reifegradmodells	100%
4.1 Geschäftsmodelle allgemein	3	9. Anwendbarkeit des Reifegradmodells	100%
4.2 Smart Products (Geschäftsmodell)	2	9.1 Ausgangsbasis von KMU/Mittelstand darstellbar	3
4.3 Smart Services	2	9.2 Ermittlung des Ist-Zustands	3
4.4 Digitale Geschäftsmodelle	2	9.3 Definition des Soll-Zustands	3
4.5 Digitale Plattformen	2	9.4 Ableitung von Maßnahmen	3
3=Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegradmodell ausführlich berücksichtigt		Reifegradindex	50%
2=Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt		10. Reifegradindex	50%
1=Das Kriterium wird indirekt erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt		10.1 Reifegradindex gesamt	0
0=Das Kriterium wird nicht im Reifegradmodell berücksichtigt		10.2 Reifegradindex je Betrachtungsbereich	3

Tabelle 2.24 Bewertung des Industrie 4.0 Assessment (Matt et al.)

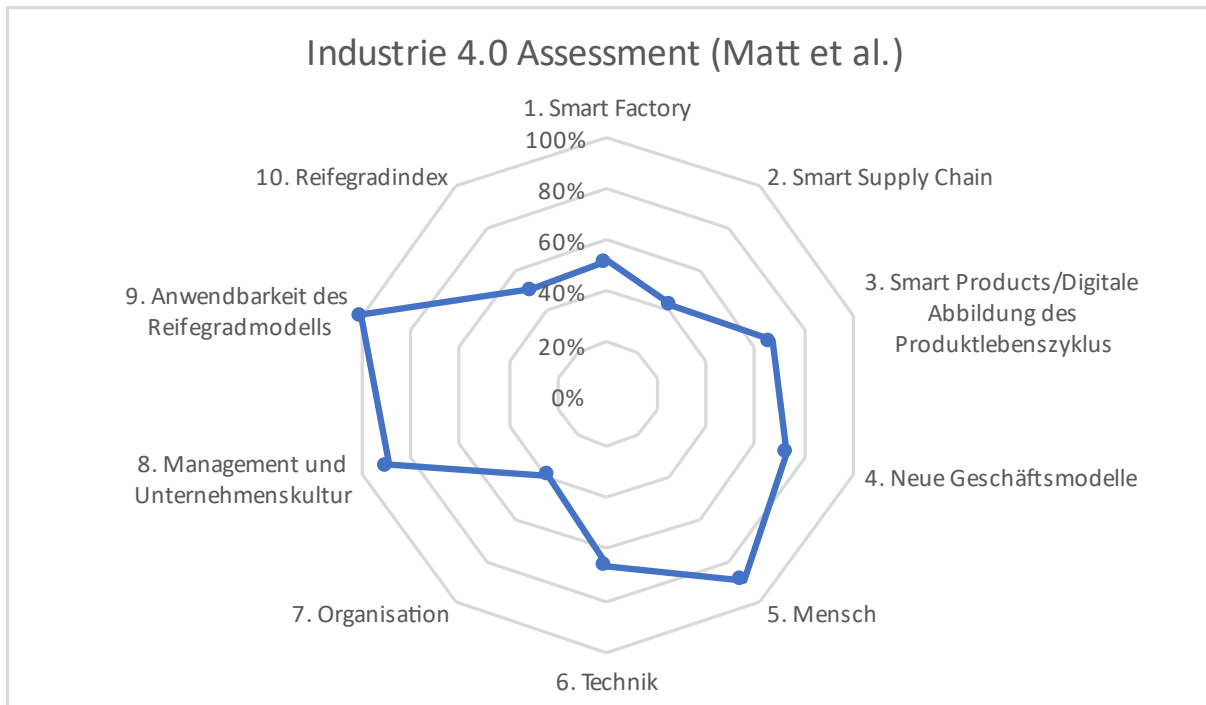


Abbildung 2.34 Profil des Industrie 4.0 Assessment (Matt et al.)

2.3.2.5. Quick-Check Industrie 4.0 (INLUMIA)

Der Quick-Check Industrie 4.0 ist im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojekts INLUMIA entstanden (Pierenkemper, et al., 2019). Das Ziel bestand in der Entwicklung eines „Instrumentarium zur Steigerung der Leistungsfähigkeit durch Industrie 4.0“ für KMU (Heppner, et al., 2019). Die Ermittlung der Reife erfolgt durch die Beantwortung eines (Online) Fragebogens mit Fragen zu den drei Dimensionen Technik, Business und Mensch. Jeweils gibt es vier Bewertungskriterien. Die Antwortmöglichkeiten entsprechen jeweils einer von vier Reifegradstufen (vgl. Tabelle 2.25).

Betrachtungsbereiche	Reifegradstufen
1. Technik	1. Stufe 1
1.1 Technikorganisation	2. Stufe 2
1.2 Engineering	3. Stufe 3
1.3 Produktion	4. Stufe 4
1.4 Produkt	
2. Business	
2.1 Strategie	
2.2 Innovationskultur	
2.3 Geschäftsmodell	
2.4 Daten	
3. Mensch	
3.1 Arbeitsgestaltung	
3.2 Qualifikation	
3.3 Innerbetr. Kommunikation	
3.4 Interaktion	

Tabelle 2.25 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen des Quick-Check Industrie 4.0 (INLUMIA)

Tabelle 2.26 zeigt das Ergebnis der Bewertung. Der Quick-Check Industrie 4.0 deckt die Handlungsbereiche von Industrie 4.0 nur teilweise ab. Die Bereiche Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus und neue Geschäftsmodelle werden nur indirekt beschrieben, indem auf die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle eingegangen wird, nicht aber auf den Reifegrad der verschiedenen Formen neuer Geschäftsmodelle. Im Bereich der Smart Factory fehlen die Bereiche Intralogistik, Instandhaltungsmanagement, Werkzeugmanagement und Qualitätsmanagement. Auf organisatorische Themen in der Produktion und Produktionsplanung und -steuerung wurde nur indirekt eingegangen. Die Berücksichtigung der Dimension Mensch ist gut, die Rolle des Menschen sowie die Qualifikation wurden berücksichtigt. Die Bereiche Technik sowie organisatorische Aspekte wurden nur oberflächlich berücksichtigt. Das Thema Kommunikation wurde nicht beschrieben. Der Bereich Management und Unternehmenskultur wurde gut beschrieben, es wurde auf alle drei Kriterien direkt bzw. indirekt eingegangen. Das Reifegradmodell lässt sich in allen geforderten Bereichen anwenden. Ein Reifegradindex wird je Betrachtungsbereich ermittelt. Abbildung 2.35 stellt das Profil des Quick-Check Industrie 4.0 zusammenfassend grafisch dar.

Quick-Check Industrie 4.0 (INLUMIA)			
Bewertungskategorie	Bewertung	Bewertungskategorie	Bewertung
Industrie 4.0 Abdeckung	32%	Sozio-technischer Fokus	53%
1. Smart Factory	36%	5. Mensch	78%
1.1 Smart Factory allgemein	2	5.1 Dimension Mensch allgemein	2
1.2 Produktion	1	5.2 Rolle des Menschen	3
1.3 Datenerfassung	2	5.3 Qualifikation	2
1.4 Assistenzsysteme	2		
1.5 Produktionsplanung und -steuerung	1	6. Technik	44%
1.6 Intralogistik	0	6.1 Dimension Technik allgemein	2
1.7 Instandhaltungsmanagement	0	6.2 Betriebsmittel (Produktion/Logistik)	1
1.8 Werkzeugmanagement	0	6.3 Cyber-physische Systeme (CPS)	1
1.9 Qualitätsmanagement	0	6.4 Roboter und Assistenzsysteme	2
1.10 Horizontale- und vertikale Integration	2	6.5 Automatisierungstechnik	1
1.11 Big Data Analyse	2	6.6 Software	1
2. Smart Supply Chain	43%	7. Organisation	50%
2.1 Smart Supply Chain allgemein	2	7.1 Dimension Organisation allgemein	2
2.2 Wertschöpfungsnetzwerke	2	7.2 Aufbauorganisation	2
2.3 Echtzeitstatus & Tracking	1	7.3 Ablauforganisation	2
2.4 Planung, Steuerung und Überwachung	1	7.4 Arbeitsgestaltung	1
2.5 Assistenzsysteme	1	7.5 Kommunikation	0
2.6 Transportmanagement	0	7.6 Wissens- und Kompetenzmanagement	2
2.7 Horizontale Integration	2		
		Management und Unternehmenskultur	67%
3. Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	11%	8. Management und Unternehmenskultur	67%
3.1 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus allgemein	1	8.1 Transformationsstrategie	3
3.2 Smart Products (Abbildung Produktlebenszyklus)	0	8.2 Change Management	1
3.3 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	0	8.3 Unternehmenskultur	2
4. Neue Geschäftsmodelle	20%	Anwendbarkeit des Reifegradmodells	100%
4.1 Geschäftsmodelle allgemein	2	9. Anwendbarkeit des Reifegradmodells	100%
4.2 Smart Products (Geschäftsmodell)	0	9.1 Ausgangsbasis von KMU/Mittelstand darstellbar	3
4.3 Smart Services	0	9.2 Ermittlung des Ist-Zustands	3
4.4 Digitale Geschäftsmodelle	0	9.3 Definition des Soll-Zustands	3
4.5 Digitale Plattformen	1	9.4 Ableitung von Maßnahmen	3
3=Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegradmodell ausführlich berücksichtigt		Reifegradindex	50%
2=Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt		10. Reifegradindex	50%
1=Das Kriterium wird indirekt erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt		10.1 Reifegradindex gesamt	0
0=Das Kriterium wird nicht im Reifegradmodell berücksichtigt		10.2 Reifegradindex je Betrachtungsbereich	3

Tabelle 2.26 Bewertung des Quick-Check Industrie 4.0 (INLUMIA)

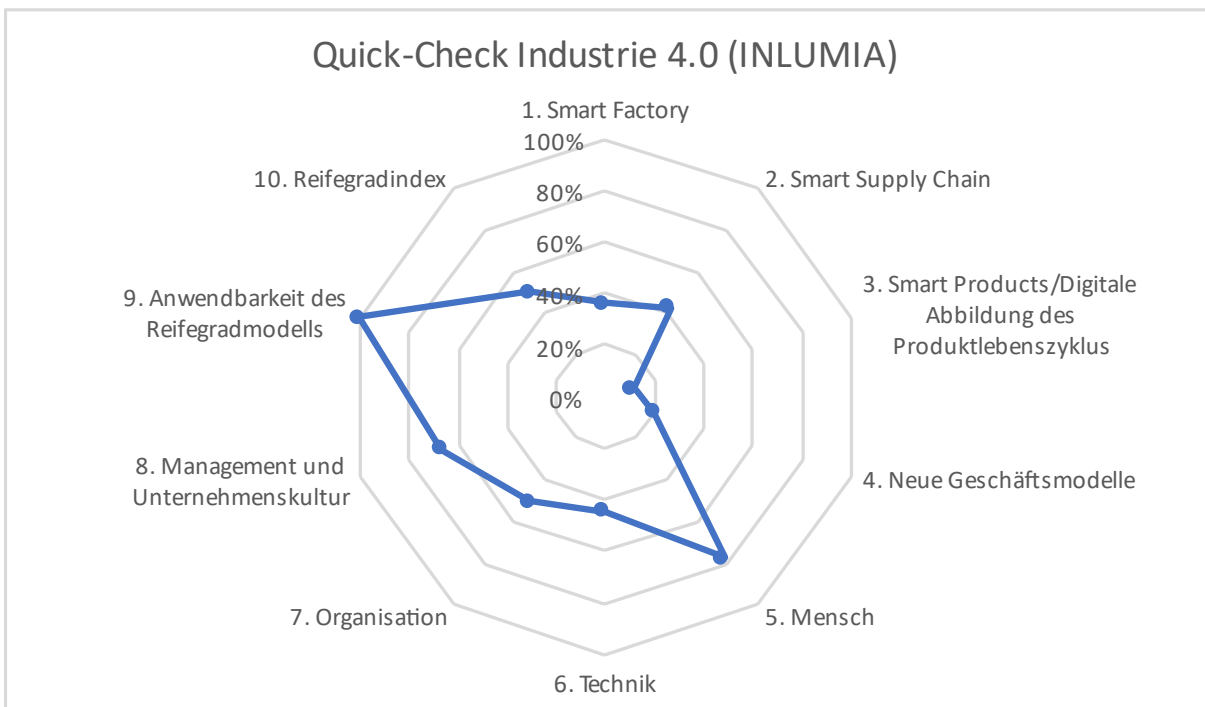


Abbildung 2.35 Profil des Quick-Check Industrie 4.0 (INLUMIA)

2.3.2.6. Industrie 4.0-Reifegradmodell (WZL, RWTH Aachen)

Das Industrie 4.0-Reifegradmodell des WZL (Schuh, et al., 2018) ist Teil eines Leitfadens zur Implementierung von Industrie 4.0-Lösungen. Es dient in produzierenden Unternehmen der Bewertung des Status Quo sowie der Definition konkreter Ziele bzgl. der Umsetzung von Industrie 4.0 (ebd.). Die Ermittlung der Reife erfolgt durch die Beantwortung eines Fragebogens mit Fragen zu acht Betrachtungsbereichen, die sich an den Unternehmensfunktionen entlang der Wertschöpfungskette produzierender Unternehmen orientieren (ebd.). Die Antwortmöglichkeiten entsprechen jeweils einer von sechs Reifegradstufen (vgl. Tabelle 2.27).

Betrachtungsbereiche	Reifegradstufen
1. Marketing & Vertrieb	1. Computerisierung
2. Produktentwicklung	2. Vernetzung
3. Supply Chain Management & Einkauf	3. Visualisierung
4. Produktionsplanung und -steuerung	4. Transparenz
5. Logistik	5. Vorhersage
6. Produktion	6. Adaptabilität
7. Qualitätssicherung	
8. Unterstützende Funktionen	

Tabelle 2.27 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen des Industrie 4.0-Reifegradmodells (WZL, RWTH Aachen)

Tabelle 2.28 zeigt das Ergebnis der Bewertung. Das Industrie 4.0-Reifegradmodell fokussiert hauptsächlich auf die innerbetrieblichen Prozesse der Smart Factory sowie auf die Vernetzung mit den Wertschöpfungspartnern in der Supply Chain. Neue Geschäftsmodelle und die digitale Abbildung des Produktlebenszyklus werden nicht thematisiert. Das Modell hat keinen sozio-technischen Ansatz. Die Dimension Mensch wird nicht beschrieben, technische und organisatorische Aspekte werden lediglich indirekt erwähnt. Organisatorische Themen der Produktion sowie Wissens- und Kompetenzmanagement werden nicht beschrieben. Der Bereich Management und Unternehmenskultur ist nicht Bestandteil des Reifegradindex, wird jedoch im oben erwähnten Leitfaden ausführlich behandelt. Das Reifegradmodell lässt sich in allen geforderten Bereichen anwenden. Ein Reifegradindex wird je Betrachtungsbereich ermittelt. Abbildung 2.36 stellt das Profil des Industrie 4.0-Reifegradmodells zusammenfassend grafisch dar.

Industrie 4.0-Reifegradmodell (WZL, RWTH Aachen)			
Bewertungskategorie	Bewertung	Bewertungskategorie	Bewertung
Industrie 4.0 Abdeckung	41%	Sozio-technischer Fokus	27%
1. Smart Factory	55%	5. Mensch	0%
1.1 Smart Factory allgemein	2	5.1 Dimension Mensch allgemein	0
1.2 Produktion	0	5.2 Rolle des Menschen	0
1.3 Datenerfassung	3	5.3 Qualifikation	0
1.4 Assistenzsysteme	1	6. Technik	39%
1.5 Produktionsplanung und -steuerung	2	6.1 Dimension Technik allgemein	2
1.6 Intralogistik	1	6.2 Betriebsmittel (Produktion/Logistik)	1
1.7 Instandhaltungsmanagement	1	6.3 Cyber-physische Systeme (CPS)	1
1.8 Werkzeugmanagement	1	6.4 Roboter und Assistenzsysteme	1
1.9 Qualitätsmanagement	3	6.5 Automatisierungstechnik	1
1.10 Horizontale- und vertikale Integration	2	6.6 Software	1
1.11 Big Data Analyse	2	7. Organisation	28%
2. Smart Supply Chain	57%	7.1 Dimension Organisation allgemein	1
2.1 Smart Supply Chain allgemein	2	7.2 Aufbauorganisation	1
2.2 Wertschöpfungsnetzwerke	2	7.3 Ablauforganisation	1
2.3 Echtzeitstatus & Tracking	2	7.4 Arbeitsgestaltung	1
2.4 Planung, Steuerung und Überwachung	2	7.5 Kommunikation	1
2.5 Assistenzsysteme	1	7.6 Wissens- und Kompetenzmanagement	0
2.6 Transportmanagement	1	Management und Unternehmenskultur	0%
2.7 Horizontale Integration	2	8. Management und Unternehmenskultur	0%
3. Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	0%	8.1 Transformationsstrategie	0
3.1 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus allgemein	0	8.2 Change Management	0
3.2 Smart Products (Abbildung Produktlebenszyklus)	0	8.3 Unternehmenskultur	0
3.3 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	0	Anwendbarkeit des Reifegradmodells	100%
4. Neue Geschäftsmodelle	13%	9. Anwendbarkeit des Reifegradmodells	100%
4.1 Geschäftsmodelle allgemein	1	9.1 Ausgangsbasis von KMU/Mittelstand darstellbar	3
4.2 Smart Products (Geschäftsmodell)	0	9.2 Ermittlung des Ist-Zustands	3
4.3 Smart Services	0	9.3 Definition des Soll-Zustands	3
4.4 Digitale Geschäftsmodelle	0	9.4 Ableitung von Maßnahmen	3
4.5 Digitale Plattformen	1	Reifegradindex	50%
3=Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegradmodell ausführlich berücksichtigt		10. Reifegradindex	50%
2=Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt		10.1 Reifegradindex gesamt	0
1=Das Kriterium wird indirekt erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt		10.2 Reifegradindex je Betrachtungsbereich	3
0=Das Kriterium wird nicht im Reifegradmodell berücksichtigt			

Tabelle 2.28 Bewertung des Industrie 4.0-Reifegradmodells (WZL, RWTH Aachen)

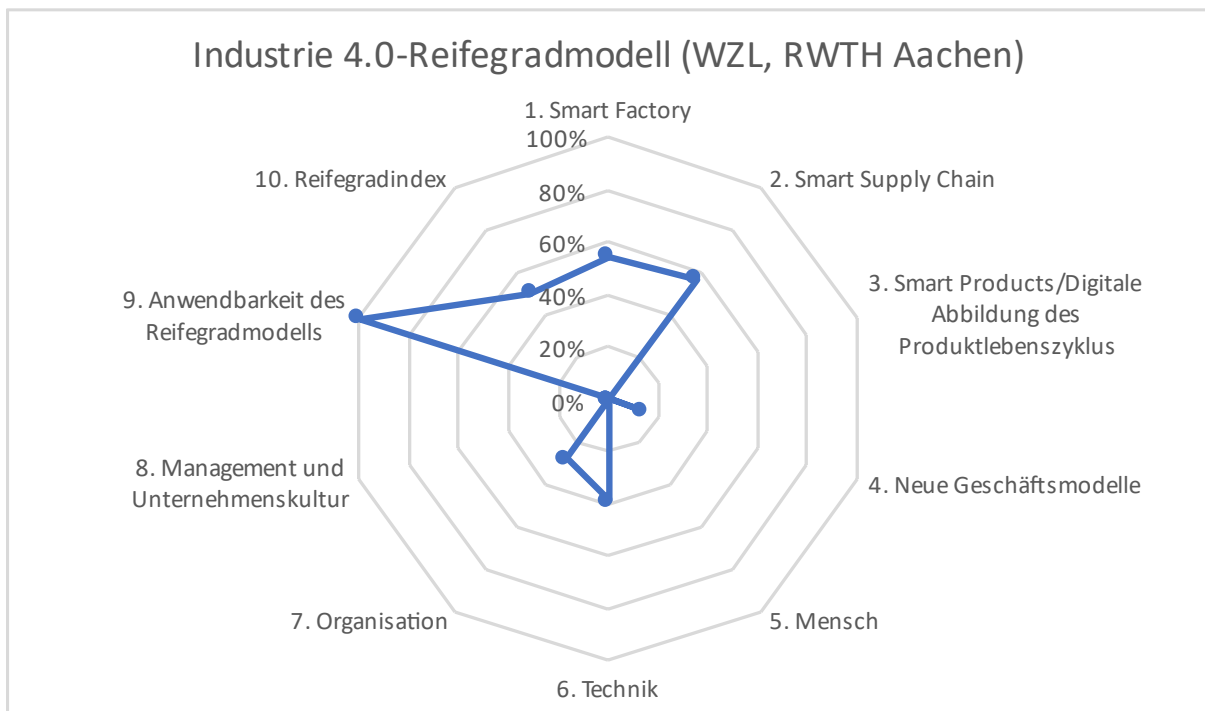


Abbildung 2.36 Profil des Industrie 4.0-Reifegradmodells (WZL, RWTH Aachen)

2.3.2.7. Reifegradmodell (Appelfeller & Feldmann)

Das Reifegradmodell von Appelfeller & Feldmann ist Teil eines umfangreichen Leitfadens (Appelfeller & Feldmann, 2018) zur Strukturierung der digitalen Transformation und Reifegradmessung von Unternehmen. Es basiert auf einem von den Autoren entwickelten Referenzmodell eines digitalen Unternehmens (ebd., S. 4). Die Ermittlung der Reife erfolgt durch die Beantwortung eines Fragebogens mit Fragen zu 10 Betrachtungsbereichen. Die Antwortmöglichkeiten entsprechen jeweils einer von vier Reifegradstufen (vgl. Tabelle 2.29).

Betrachtungsbereiche	Reifegradstufen
1. Prozesse	1. Stufe 1
1.1 Digitalisierungsgrad	2. Stufe 2
1.2 Digitaler Automatisierungsgrad	3. Stufe 3
1.3 Digitaler Integrationsgrad	4. Stufe 4
1.4 Digitaler Selbststeuerungsgrad	
2. Kundenanbindung	
2.1 Phase 1: Entwicklung von Produkten und Dienstleistungen	
2.2 Phase 2: Vorverkauf (Presales)	
2.3 Phase 3: Kauf	
2.4 Phase 4: Nach dem Kauf (After Sales)	
2.5 Phasenübergreifende Kriterien	
3. Lieferantenanbindung	
3.1 Anbahnung	
3.2 Vereinbarung	
3.3 Abwicklung	
3.4 Lieferantenmanagement	
4. Mitarbeiter (geistige/körperliche Tätigkeit)	
4.1 Papierverwendung und IT-Unterstützung	
4.2 Prozesscharakter	
4.3 Arbeitszeit	
4.4 Hardware	
4.5 Kollaboration	
4.6 Vernetzung	
4.7 Arbeitsplatz	
5. Daten	
5.1 Integrationsgrad der Systeme	
5.2 Umfang digitaler Daten	
5.3 Anteil digitaler Daten	
5.4 Datenqualität	
5.5 Struktur der Daten	
5.6 Datenmanagementprozess (Data Governance)	
5.7 Stammdatenharmonisierung	
5.8 Umfang der Datenauswertungen	
5.9 Art der Datenauswertungen	
6. Produkte	
6.1 Überwachung	
6.2 Steuerung	
6.3 Optimierung	
6.4 Autonomie	
6.5 Vernetzung	

<ul style="list-style-type: none"> 7. Maschinen und Roboter <ul style="list-style-type: none"> 7.1 Datengenerierung 7.2 Datenverarbeitung und -analyse 7.3 Integrationsfähigkeit: Vernetzung und IT-Infrastruktur 7.4 Integrationsfähigkeit: Horizontale und vertikale Vernetzung 7.5 Integrationsfähigkeit: Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M) 7.6 Unterstützung selbststeuernder Prozesse 7.7 Wandlungsfähigkeit 8. IT-Systeme <ul style="list-style-type: none"> 8.1 Anpassungs- und Entwicklungsfähigkeit 8.2 Integrationsfähigkeit 8.3 Analysefähigkeit und kontinuierliches Lernen 9. Vernetzung <ul style="list-style-type: none"> 9.1 Dichte des Netzwerks 9.2 Reichweite der Vernetzung 9.3 Internet of Things: Vernetzung von Maschinen und Robotern 9.4 Internet of Things: Vernetzung von Produkten 9.5 Internet of Things: Vernetzung von Mitarbeitern 9.6 Cybersicherheit 10. Geschäftsmodell <ul style="list-style-type: none"> 10.1 Bedeutung der Digitalisierung für die Geschäftsidee 10.2 Bedeutung der Digitalisierung für die Leistungserstellung 10.3 Interaktion mit Kunden 10.4 Produkte und Dienstleistungen 10.5 Ziele der Digitalisierung 	
---	--

Tabelle 2.29 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen des Reifegradmodells (Appelfeller & Feldmann)

Tabelle 2.30 zeigt das Ergebnis der Bewertung. Von den Industrie 4.0 Handlungsbereichen wird am besten der Bereich der neuen Geschäftsmodelle mit datenbasierten Produkten und Services, digitalen Geschäftsmodellen und digitalen Plattformen abgedeckt. Im Bereich der Smart Factory liegt der Fokus auf der horizontalen und vertikalen Integration, der Datenerfassung und -analyse sowie der Assistenz für den Menschen. Auf unterstützende Prozesse, wie Instandhaltungsmanagement, Werkzeugmanagement und Qualitätsmanagement wird nicht eingegangen. Im Bereich der Smart Supply Chain liegt der Fokus auf der horizontalen Integration, auf andere Kriterien wird nicht oder nur indirekt eingegangen. Das Modell geht sehr detailliert auf die Dimension Technik ein, die Qualifikation des Menschen, Wissen- und Kompetenzmanagement und sonstige organisatorischen Themen werden jedoch nicht oder nur indirekt thematisiert. Der Bereich Management und Unternehmenskultur ist auch nicht im Reifegradmodell verankert. Das Reifegradmodell lässt sich in allen geforderten Bereichen anwenden. Ein Reifegradindex wird je Betrachtungsbereich ermittelt. Abbildung 2.37 stellt das Profil des Industrie 4.0-Reifegradmodells zusammenfassend grafisch dar.

Reifegradmodell (Appelfeller & Feldmann)			
Bewertungskategorie	Bewertung	Bewertungskategorie	Bewertung
Industrie 4.0 Abdeckung	54%	Sozio-technischer Fokus	56%
1. Smart Factory	48%	5. Mensch	44%
1.1 Smart Factory allgemein	2	5.1 Dimension Mensch allgemein	2
1.2 Produktion	1	5.2 Rolle des Menschen	2
1.3 Datenerfassung	2	5.3 Qualifikation	0
1.4 Assistenzsysteme	2	6. Technik	72%
1.5 Produktionsplanung und -steuerung	2	6.1 Dimension Technik allgemein	2
1.6 Intralogistik	1	6.2 Betriebsmittel (Produktion/Logistik)	2
1.7 Instandhaltungsmanagement	0	6.3 Cyber-physische Systeme (CPS)	1
1.8 Werkzeugmanagement	0	6.4 Roboter und Assistenzsysteme	3
1.9 Qualitätsmanagement	0	6.5 Automatisierungstechnik	2
1.10 Horizontale- und vertikale Integration	3	6.6 Software	3
1.11 Big Data Analyse	3	7. Organisation	44%
2. Smart Supply Chain	33%	7.1 Dimension Organisation allgemein	2
2.1 Smart Supply Chain allgemein	2	7.2 Aufbauorganisation	1
2.2 Wertschöpfungsnetzwerke	1	7.3 Ablauforganisation	1
2.3 Echtzeitstatus & Tracking	1	7.4 Arbeitsgestaltung	3
2.4 Planung, Steuerung und Überwachung	1	7.5 Kommunikation	1
2.5 Assistenzsysteme	0	7.6 Wissens- und Kompetenzmanagement	0
2.6 Transportmanagement	0	Management und Unternehmenskultur	11%
2.7 Horizontale Integration	2	8. Management und Unternehmenskultur	11%
3. Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	56%	8.1 Transformationsstrategie	1
3.1 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus allgemein	2	8.2 Change Management	0
3.2 Smart Products (Abbildung Produktlebenszyklus)	2	8.3 Unternehmenskultur	0
3.3 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	1	Anwendbarkeit des Reifegradmodells	100%
4. Neue Geschäftsmodelle	93%	9. Anwendbarkeit des Reifegradmodells	100%
4.1 Geschäftsmodelle allgemein	3	9.1 Ausgangsbasis von KMU/Mittelstand darstellbar	3
4.2 Smart Products (Geschäftsmodell)	3	9.2 Ermittlung des Ist-Zustands	3
4.3 Smart Services	3	9.3 Definition des Soll-Zustands	3
4.4 Digitale Geschäftsmodelle	3	9.4 Ableitung von Maßnahmen	3
4.5 Digitale Plattformen	2	Reifegradindex	50%
3=Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegradmodell ausführlich berücksichtigt		10. Reifegradindex	50%
2=Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt		10.1 Reifegradindex gesamt	0
1=Das Kriterium wird indirekt erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt		10.2 Reifegradindex je Betrachtungsbereich	3
0=Das Kriterium wird nicht im Reifegradmodell berücksichtigt			

Tabelle 2.30 Bewertung des Reifegradmodells (Appelfeller & Feldmann)

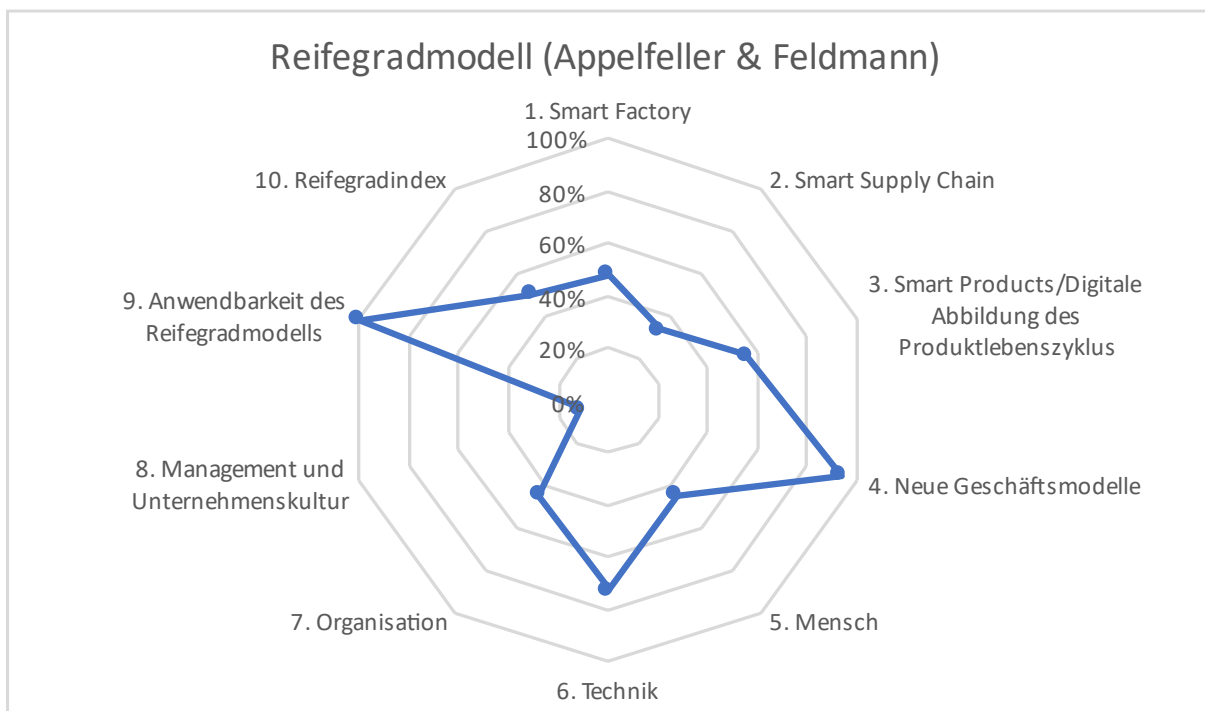


Abbildung 2.37 Profil des Reifegradmodells (Appelfeller & Feldmann)

2.3.2.8. Industrie 4.0-Reifegradmodell (INTRO 4.0)

Das Industrie 4.0-Reifegradmodell (Hübner, 2018) entstand im Rahmen des Forschungsprojekts INTRO 4.0 (INTRO 4.0, 2018). Es ist Teil eines vierstufigen Vorgehensmodells zur Einführung von Industrie 4.0. Die Ermittlung der Reife erfolgt durch die Beantwortung eines Online-Fragebogens mit Fragen zu fünf Betrachtungsbereichen mit jeweils mehreren Unterpunkten. Die Antwortmöglichkeiten entsprechen jeweils einer von vier Reifegradstufen (vgl. Tabelle 2.31).

Betrachtungsbereiche	Reifegradstufen
1. Organisation und Administration	1. Reifestufe 1
1.1 IT-Infrastruktur	2. Reifestufe 2
1.2 Allgemeine Organisation	3. Reifestufe 3
1.3 Mitarbeiter	4. Reifestufe 4
1.4 Physische Assistenzsysteme	
1.5 Datenspeicherung	
1.6 Datenanalyse	
2. Produktionsplanung und -steuerung	
2.1 Allgemeine Produktionsplanung und -steuerung	
2.2 Bedarfsplanung	
2.3 Eigenfertigungsplanung und -steuerung	
2.4 Bestandsmanagement	
2.5 Produktionscontrolling	
3. Qualitäts- und Störungsmanagement	
3.1 Qualitätsmanagement	
3.2 Störungsmanagement	
4. Station	
4.1 Schnittstellen	
4.2 Rückmeldedaten	
4.3 Condition-Monitoring-Technologie	
4.4 Bestandsmanagement	
4.5 Stationssteuerung	
5. Produkt	
5.1 Kommunikation	
5.2 Datenerfassung	

Tabelle 2.31 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen des Industrie 4.0-Reifegradmodells (INTRO 4.0)

Tabelle 2.32 zeigt das Ergebnis der Bewertung. Das Industrie 4.0-Reifegradmodell fokussiert auf die Anwendung von Industrie 4.0 innerhalb der Smart Factory. Dabei werden die Aspekte Datenerfassung, Produktionsplanung und -steuerung, Qualitätsmanagement, Assistenzsysteme und Datenanalysen überwiegend ausführlich betrachtet. Instandhaltungsmanagement und Werkzeugmanagement werden nicht betrachtet, auf Aspekte der Intralogistik wird nur indirekt

eingegangen. Die Bereiche Smart Supply Chain und neue Geschäftsmodelle werden nicht betrachtet. Smart Products sowie die digitale Abbildung des Produktlebenszyklus sind im Reifegradmodell enthalten. Der sozio-technische Fokus ist gegeben. Es werden alle Dimensionen Mensch, Technik und Organisation im Reifegradmodell berücksichtigt. Lediglich die Themen Kommunikation und Wissens- und Kompetenzmanagement wurde nicht bzw. nur indirekt angesprochen. Aspekte der Transformationsstrategie sind teilweise enthalten, auf die Bereiche Change Management und Unternehmenskultur wird nicht eingegangen. Das Reifegradmodell lässt sich in allen geforderten Bereichen anwenden. Ein Reifegradindex wird je Betrachtungsbereich ermittelt. Abbildung 2.38 stellt das Profil des Industrie 4.0-Reifegradmodells zusammenfassend grafisch dar.

Industrie 4.0-Reifegradmodell (INTRO 4.0)			
Bewertungskategorie	Bewertung	Bewertungskategorie	Bewertung
Industrie 4.0 Abdeckung	33%	Sozio-technischer Fokus	60%
1. Smart Factory	64%	5. Mensch	67%
1.1 Smart Factory allgemein	2	5.1 Dimension Mensch allgemein	2
1.2 Produktion	2	5.2 Rolle des Menschen	2
1.3 Datenerfassung	3	5.3 Qualifikation	2
1.4 Assistenzsysteme	3		
1.5 Produktionsplanung und -steuerung	3	6. Technik	67%
1.6 Intra-logistik	1	6.1 Dimension Technik allgemein	2
1.7 Instandhaltungsmanagement	0	6.2 Betriebsmittel (Produktion/Logistik)	2
1.8 Werkzeugmanagement	0	6.3 Cyber-physische Systeme (CPS)	1
1.9 Qualitätsmanagement	3	6.4 Roboter und Assistenzsysteme	3
1.10 Horizontale- und vertikale Integration	1	6.5 Automatisierungstechnik	2
1.11 Big Data Analyse	3	6.6 Software	2
2. Smart Supply Chain	0%	7. Organisation	50%
2.1 Smart Supply Chain allgemein	0	7.1 Dimension Organisation allgemein	2
2.2 Wertschöpfungsnetzwerke	0	7.2 Aufbauorganisation	2
2.3 Echtzeitstatus & Tracking	0	7.3 Ablauforganisation	2
2.4 Planung, Steuerung und Überwachung	0	7.4 Arbeitsgestaltung	2
2.5 Assistenzsysteme	0	7.5 Kommunikation	0
2.6 Transportmanagement	0	7.6 Wissens- und Kompetenzmanagement	1
2.7 Horizontale Integration	0		
		Management und Unternehmenskultur	22%
3. Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	56%	8. Management und Unternehmenskultur	22%
3.1 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus allgemein	1	8.1 Transformationsstrategie	2
3.2 Smart Products (Abbildung Produktlebenszyklus)	3	8.2 Change Management	0
3.3 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	1	8.3 Unternehmenskultur	0
4. Neue Geschäftsmodelle	0%	Anwendbarkeit des Reifegradmodells	100%
4.1 Geschäftsmodelle allgemein	0	9. Anwendbarkeit des Reifegradmodells	100%
4.2 Smart Products (Geschäftsmodell)	0	9.1 Ausgangsbasis von KMU/Mittelstand darstellbar	3
4.3 Smart Services	0	9.2 Ermittlung des Ist-Zustands	3
4.4 Digitale Geschäftsmodelle	0	9.3 Definition des Soll-Zustands	3
4.5 Digitale Plattformen	0	9.4 Ableitung von Maßnahmen	3
		Reifegradindex	50%
		10. Reifegradindex	50%
		10.1 Reifegradindex gesamt	0
		10.2 Reifegradindex je Betrachtungsbereich	3

Tabelle 2.32 Bewertung des Industrie 4.0-Reifegradmodells (INTRO 4.0)

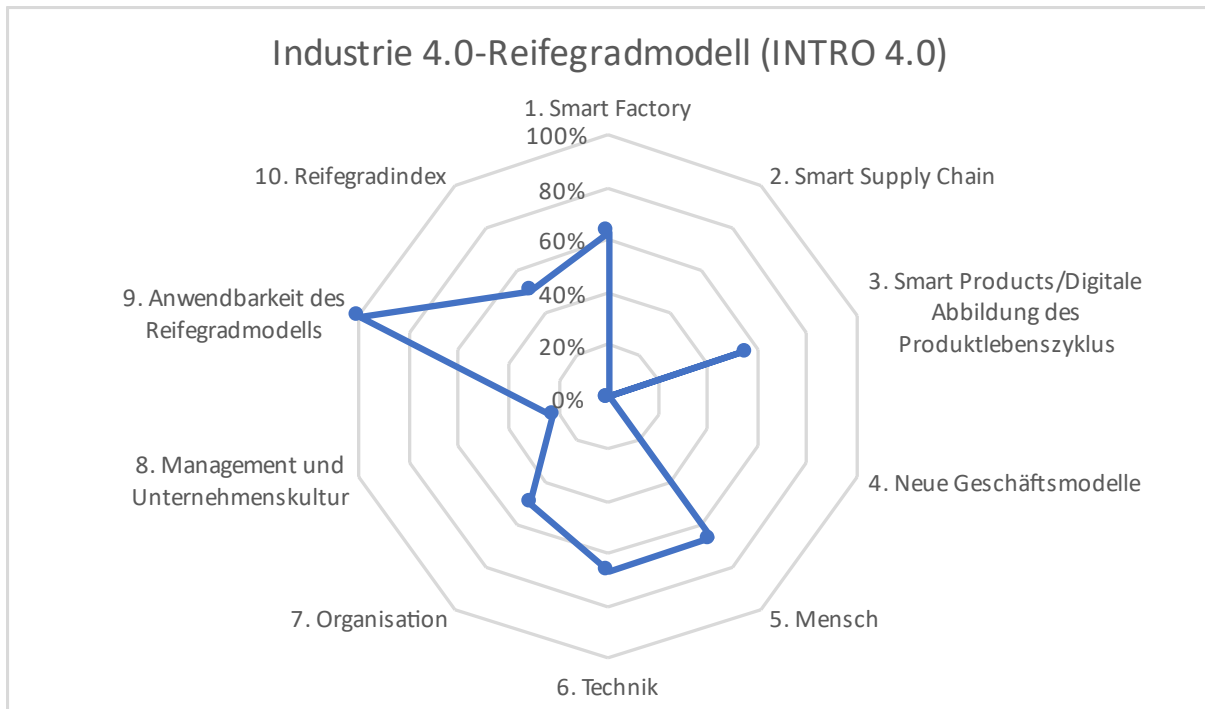


Abbildung 2.38 Profil des Industrie 4.0-Reifegradmodells (INTRO 4.0)

2.3.2.9. Industrie 4.0-Reifegradmodell (Puchan & Zeifang)

Das Industrie 4.0-Reifegradmodell der Hochschule München (Puchan & Zeifang, 2017) basiert auf einem Fragebogen mit Fragen zu fünf Betrachtungsbereichen mit insgesamt 29 Unterpunkten. Die Antwortmöglichkeiten entsprechen jeweils einer von fünf Reifegradstufen (vgl. Tabelle 2.33).

Betrachtungsbereiche	Reifegradstufen
1. Schlüsselfaktoren 1.1 Geschäftsmodell 1.2 IT-Sicherheit 1.3 Kommunikation 1.4 Management 1.5 Rechtsrahmen 1.6 Normen & Standards 1.7 Stellung der IT 1.8 Vernetzung der IT	1. Standard Level 2. Novice Level 3. Advanced Level 4. Expert Level 5. Pioneer Level
2. Mitarbeiter 2.1 Arbeitsstrukturen 2.2 Assistenzsysteme 2.3 Engagement 2.4 Informationssysteme 2.5 I4.0 Kompetenz	
3. Organisation 3.1 Informationsaustausch 3.2 Innovations- und Technologiemanagement 3.3 Kennzahlensystem	

<ul style="list-style-type: none"> 3.4 Prozessmanagement 3.5 I4.0 Strategie 3.6 Wissensmanagement 4. Produkt <ul style="list-style-type: none"> 4.1 Datenanalytik 4.2 Produktfunktion 4.3 Produktsystem 4.4 Systemintegration 5. Produktion <ul style="list-style-type: none"> 5.1 Datenerfassung 5.2 Datennutzung 5.3 Kommunikation 5.4 Produktionslogistik 5.5 Produktionsressourcen 5.6 Produktionssystem 	
---	--

Tabelle 2.33 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen des Industrie 4.0-Reifegradmodells (Puchan & Zeifang)

Tabelle 2.34 zeigt das Ergebnis der Bewertung. Das Industrie 4.0-Reifegradmodell geht nicht auf die Vernetzung in der Supply Chain ein, hat aber sonst eine sehr gute Abdeckung der Industrie 4.0 Handlungsbereiche. Im Bereich der Smart Factory sind fast alle Kriterien gut abgedeckt, es fehlen lediglich die Aspekte Instandhaltungsmanagement, Werkzeugmanagement, und Qualitätsmanagement. Das Modell hat auch einen sehr guten sozio-technischen Fokus. Es wird auf alle drei Dimensionen Mensch, Technik und Organisation ausführlich eingegangen. Im Bereich Management und Unternehmenskultur ist das Kriterium Transformationsstrategie gut abgedeckt, Change Management und Unternehmenskultur sind indirekt erwähnt. Das Reifegradmodell lässt sich in allen geforderten Bereichen anwenden. Ein Reifegradindex wird je Betrachtungsbereich ermittelt. Abbildung 2.39 stellt das Profil des Industrie 4.0-Readiness Modells zusammenfassend grafisch dar.

Industrie 4.0-Reifegradmodell (Puchan & Zeifang)			
Bewertungskategorie	Bewertung	Bewertungskategorie	Bewertung
Industrie 4.0 Abdeckung	49%	Sozio-technischer Fokus	76%
1. Smart Factory	73%	5. Mensch	67%
1.1 Smart Factory allgemein	2	5.1 Dimension Mensch allgemein	2
1.2 Produktion	3	5.2 Rolle des Menschen	1
1.3 Datenerfassung	3	5.3 Qualifikation	3
1.4 Assistenzsysteme	3		
1.5 Produktionsplanung und -steuerung	3	6. Technik	72%
1.6 Intralogistik	3	6.1 Dimension Technik allgemein	2
1.7 Instandhaltungsmanagement	1	6.2 Betriebsmittel (Produktion/Logistik)	3
1.8 Werkzeugmanagement	0	6.3 Cyber-physische Systeme (CPS)	1
1.9 Qualitätsmanagement	0	6.4 Roboter und Assistenzsysteme	3
1.10 Horizontale- und vertikale Integration	3	6.5 Automatisierungstechnik	1
1.11 Big Data Analyse	3	6.6 Software	3
		7. Organisation	83%
2. Smart Supply Chain	5%	7.1 Dimension Organisation allgemein	2
2.1 Smart Supply Chain allgemein	0	7.2 Aufbauorganisation	2
2.2 Wertschöpfungsnetzwerke	0	7.3 Ablauforganisation	2
2.3 Echtzeitstatus & Tracking	0	7.4 Arbeitsgestaltung	3
2.4 Planung, Steuerung und Überwachung	0	7.5 Kommunikation	3
2.5 Assistenzsysteme	0	7.6 Wissens- und Kompetenzmanagement	3
2.6 Transportmanagement	0		
2.7 Horizontale Integration	1	Management und Unternehmenskultur	56%
		8. Management und Unternehmenskultur	56%
3. Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	67%	8.1 Transformationsstrategie	3
3.1 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus allgemein	2	8.2 Change Management	1
3.2 Smart Products (Abbildung Produktlebenszyklus)	3	8.3 Unternehmenskultur	1
3.3 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	1		
		Anwendbarkeit des Reifegradmodells	100%
4. Neue Geschäftsmodelle	47%	9. Anwendbarkeit des Reifegradmodells	100%
4.1 Geschäftsmodelle allgemein	3	9.1 Ausgangsbasis von KMU/Mittelstand darstellbar	3
4.2 Smart Products (Geschäftsmodell)	1	9.2 Ermittlung des Ist-Zustands	3
4.3 Smart Services	1	9.3 Definition des Soll-Zustands	3
4.4 Digitale Geschäftsmodelle	1	9.4 Ableitung von Maßnahmen	3
4.5 Digitale Plattformen	1		
		Reifegradindex	50%
		10. Reifegradindex	50%
		10.1 Reifegradindex gesamt	0
		10.2 Reifegradindex je Betrachtungsbereich	3

3=Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegradmodell ausführlich berücksichtigt
 2=Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt
 1=Das Kriterium wird indirekt erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt
 0=Das Kriterium wird nicht im Reifegradmodell berücksichtigt

Tabelle 2.34 Bewertung des Industrie 4.0-Reifegradmodells (Puchan & Zeifang)

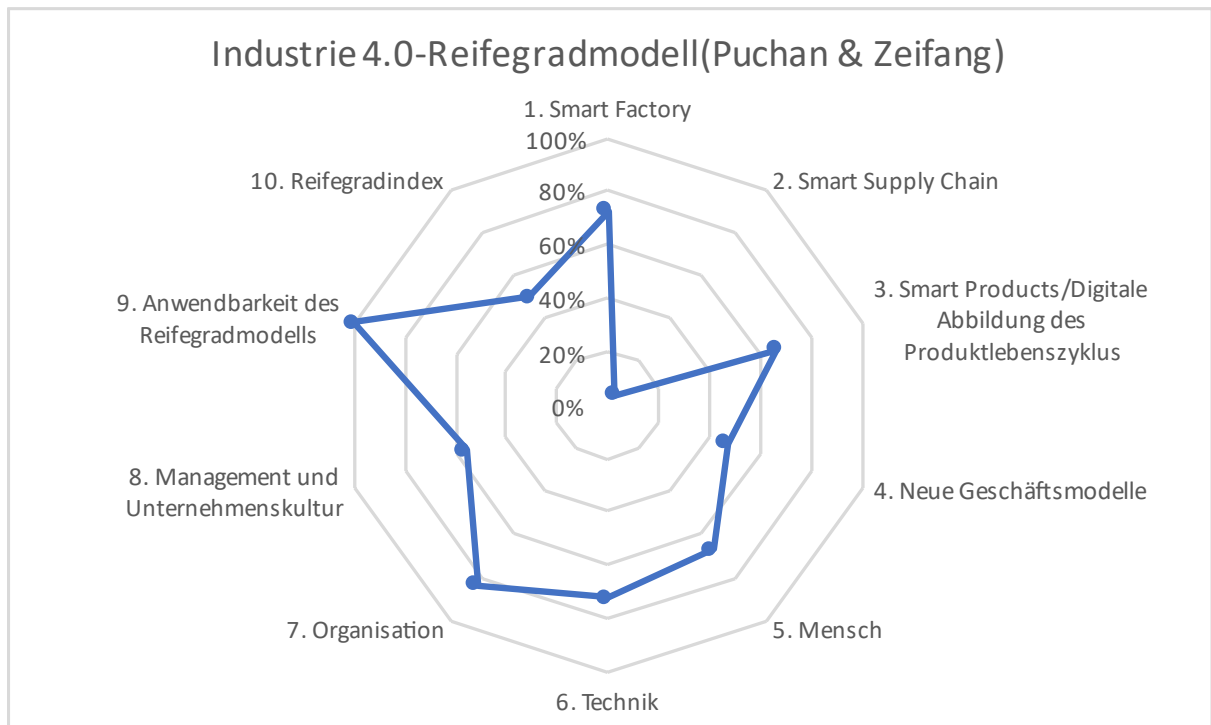


Abbildung 2.39 Profil des Industrie 4.0-Reifegradmodells (Puchan & Zeifang)

2.3.2.10. Reifegradmodell (InAsPro)

Das Reifegradmodell (Ehemann, et al., 2021) entstand im Rahmen des Forschungsprojekts InAsPro (InAsPro, 2021). Es ist Teil eines vierstufigen Transformationskonzepts. Die Ermittlung der Reife erfolgt durch die Beantwortung eines Fragebogens mit Fragen zu fünf Betrachtungsbereichen mit jeweils mehreren Unterpunkten zu den sozio-technischen Dimensionen Mensch, Technologie und Organisation. Die Antwortmöglichkeiten entsprechen jeweils einer von vier Reifegradstufen (vgl. Tabelle 2.35).

Betrachtungsbereiche	Reifegradstufen
1. Unternehmen	1. Stufe 1
1.1 Technologie	2. Stufe 2
1.1.1 IT-Systemgestaltung	3. Stufe 3
1.1.2 IT-Sicherheit	4. Stufe 4
1.2 Organisation	
1.2.1 Datenmanagement	
1.2.2 Kooperation & Kollaboration	
1.3 Mensch	
1.3.1 Unternehmenskultur	
1.3.2 Führung	
1.3.3 Mitarbeiterentwicklung	
1.4 Strategie	
1.4.1 Digitalisierungsstrategie	
1.4.2 Geschäftsmodell	
2. Entwicklung	
2.1 Technologie	
2.1.1 Anforderungsdefinition	
2.1.2 Systementwurf & -architektur	
2.1.3 Modellbildung und Simulation	
2.1.4 Validierung	
2.1.5 Systemintegration & Prozessplanung / technische Organisation	
2.1.6 Produkt- und Programmplanung	
2.2 Organisation	
2.2.1 Datenmanagement	
2.2.2 Prozessgestaltung	
2.2.3 Kooperation & Kollaboration	
2.3 Mensch	
2.3.1 Unternehmenskultur	
2.3.2 Führung	
2.3.3 Mitarbeiterentwicklung	
3. Fertigung	
3.1 Technologie	
3.1.1 Fertigungsprozesse & Bearbeitung	
3.1.2 Lagerung	
3.1.3 Transport	
3.1.4 Qualitätsmanagement	
3.1.5 Fertigungsplanung & -steuerung	
3.1.6 IT-Systemgestaltung	
3.2 Organisation	

3.2.1	Datenmanagement	
3.2.2	Prozessgestaltung	
3.2.3	Kooperation & Kollaboration	
3.3	Mensch	
3.3.1	Unternehmenskultur	
3.3.2	Führung	
3.3.3	Mitarbeiterentwicklung	
4.	Montage	
4.1	Technologie	
4.1.1	Montageprozesse & Bearbeitung	
4.1.2	Lagerung	
4.1.3	Transport	
4.1.4	Qualitätsmanagement	
4.1.5	Montageplanung & -steuerung	
4.1.6	IT-Systemgestaltung	
4.2	Organisation	
4.2.1	Datenmanagement	
4.2.2	Prozessgestaltung	
4.2.3	Kooperation & Kollaboration	
4.3	Mensch	
4.3.1	Unternehmenskultur	
4.3.2	Führung	
4.3.3	Mitarbeiterentwicklung	
5.	Aftersales	
5.1	Technologie	
5.1.1	Kundenservice	
5.1.2	Ersatzteillogistik & Wartung	
5.1.3	IT-Systemgestaltung	
5.2	Organisation	
5.2.1	Datenmanagement	
5.2.2	Prozessgestaltung	
5.2.3	Kooperation & Kollaboration	
5.3	Mensch	
5.3.1	Unternehmenskultur	
5.3.2	Führung	
5.3.3	Mitarbeiterentwicklung	

Tabelle 2.35 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen Reifegradmodells (InAsPro)

Tabelle 2.36 zeigt das Ergebnis der Bewertung. Das Reifegradmodell deckt am besten den Bereich neuer Geschäftsmodelle mit den Aspekten Smart Products, Smart Services und digitalen Plattformen ab. Im Bereich der Smart Factory sind bis auf das Kriterium Werkzeugmanagement alle Kriterien direkt oder indirekt beschrieben. Der Fokus liegt beim Kriterium Produktion auf der Digitalisierung und Steuerung der Prozesse, weniger auf organisatorischen Aspekten, wie z.B. Modularisierung. Im Bereich der Assistenzsysteme wird lediglich der Aspekt Mensch-Maschine-Schnittstelle bewertet. Die Themen der Intralogistik beschränken sich auf die Identifizierung und Rückverfolgbarkeit von Produkten. Im Bereich der Smart Supply Chain wird auf die horizontale Integration eingegangen, nicht jedoch auf die anderen Kriterien. Der Bereich Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus wird direkt bzw. indirekt be-

schrieben. Neue Geschäftsmodelle sind sehr gut abgedeckt. Das Modell hat einen sozio-technischen Fokus, geht aber in allen drei Dimensionen Mensch, Technik und Organisation nicht sehr in die Tiefe. Die Bereiche Management und Unternehmenskultur und die Anwendbarkeit des Reifegradmodells sind sehr gut abgedeckt. Der Reifegradindex wird je Betrachtungsbereich und auch als Gesamtindex berechnet. Abbildung 2.40 stellt das Profil des Reifegradmodells zusammenfassend grafisch dar.

Reifegradmodell (InAsPro)			
Bewertungskategorie	Bewertung	Bewertungskategorie	Bewertung
Industrie 4.0 Abdeckung	62%	Sozio-technischer Fokus	53%
1. Smart Factory	64%	5. Mensch	56%
1.1 Smart Factory allgemein	2	5.1 Dimension Mensch allgemein	2
1.2 Produktion	2	5.2 Rolle des Menschen	0
1.3 Datenerfassung	2	5.3 Qualifikation	3
1.4 Assistenzsysteme	1	6. Technik	50%
1.5 Produktionsplanung und -steuerung	3	6.1 Dimension Technik allgemein	2
1.6 Intralogistik	1	6.2 Betriebsmittel (Produktion/Logistik)	2
1.7 Instandhaltungsmanagement	2	6.3 Cyber-physische Systeme (CPS)	1
1.8 Werkzeugmanagement	0	6.4 Roboter und Assistenzsysteme	1
1.9 Qualitätsmanagement	2	6.5 Automatisierungstechnik	1
1.10 Horizontale- und vertikale Integration	3	6.6 Software	2
1.11 Big Data Analyse	3	7. Organisation	56%
2. Smart Supply Chain	38%	7.1 Dimension Organisation allgemein	2
2.1 Smart Supply Chain allgemein	2	7.2 Aufbauorganisation	1
2.2 Wertschöpfungsnetzwerke	1	7.3 Ablauforganisation	1
2.3 Echtzeitstatus & Tracking	1	7.4 Arbeitsgestaltung	1
2.4 Planung, Steuerung und Überwachung	1	7.5 Kommunikation	2
2.5 Assistenzsysteme	0	7.6 Wissens- und Kompetenzmanagement	3
2.6 Transportmanagement	0	Management und Unternehmenskultur	100%
2.7 Horizontale Integration	3	8. Management und Unternehmenskultur	100%
3. Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	56%	8.1 Transformationsstrategie	3
3.1 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus allgemein	2	8.2 Change Management	3
3.2 Smart Products (Abbildung Produktlebenszyklus)	2	8.3 Unternehmenskultur	3
3.3 Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	1	Anwendbarkeit des Reifegradmodells	100%
4. Neue Geschäftsmodelle	93%	9. Anwendbarkeit des Reifegradmodells	100%
4.1 Geschäftsmodelle allgemein	3	9.1 Ausgangsbasis von KMU/Mittelstand darstellbar	3
4.2 Smart Products (Geschäftsmodell)	3	9.2 Ermittlung des Ist-Zustands	3
4.3 Smart Services	3	9.3 Definition des Soll-Zustands	3
4.4 Digitale Geschäftsmodelle	2	9.4 Ableitung von Maßnahmen	3
4.5 Digitale Plattformen	3	Reifegradindex	100%
3=Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegradmodell ausführlich berücksichtigt		10. Reifegradindex	100%
2=Das Kriterium wird erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt		10.1 Reifegradindex gesamt	3
1=Das Kriterium wird indirekt erwähnt und im Reifegrad teilweise berücksichtigt		10.2 Reifegradindex je Betrachtungsbereich	3
0=Das Kriterium wird nicht im Reifegradmodell berücksichtigt			

Tabelle 2.36 Bewertung des Reifegradmodells (InAsPro)

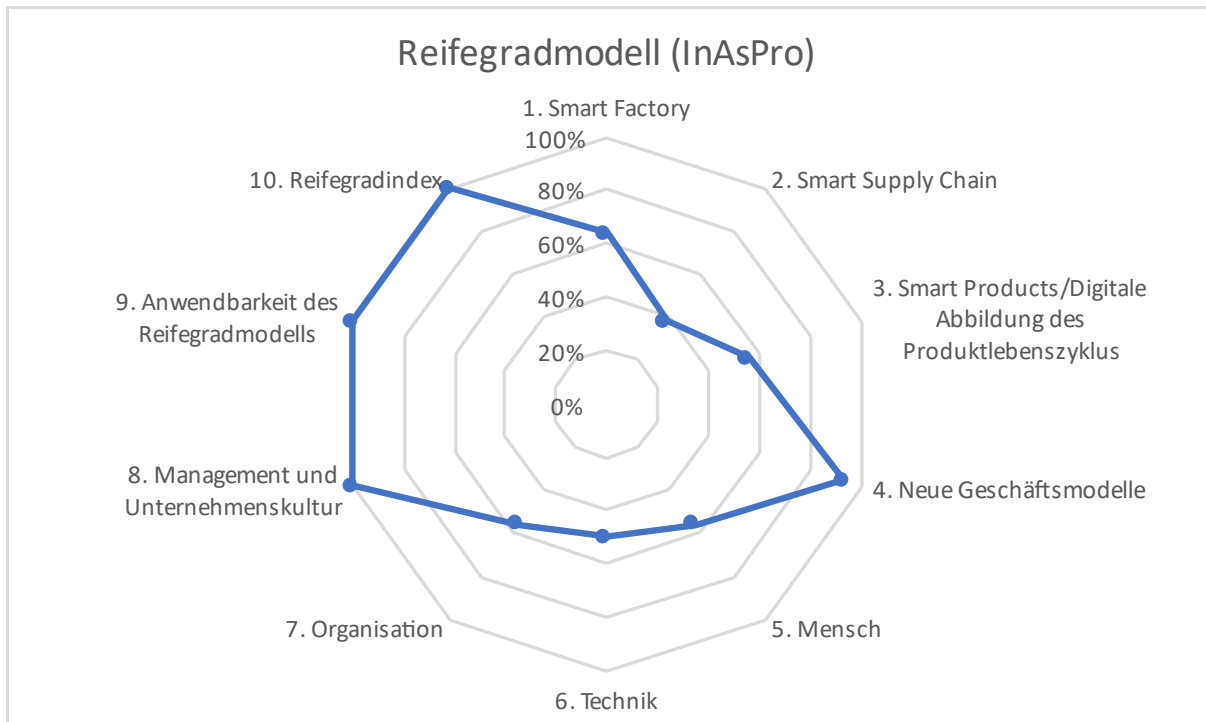


Abbildung 2.40 Profil des Reifegradmodells (InAsPro)

2.3.3. Zusammenfassung und Fazit

Die Gesamtergebnisse der Bewertung bestehender Industrie 4.0 Reifegradmodelle sind in Tabelle 2.37 im Überblick dargestellt. Insgesamt sind alle Reifegradmodelle dazu geeignet, einen Ist-Zustand zu erfassen, einen Soll-Zustand zu definieren und Maßnahmen abzuleiten. Aufgrund seines (insbesondere für KMU) sehr erklärungsbedürftigen Aufbaus wurde die Anwendbarkeit des Industrie 4.0 Maturity Index (acacatech) gegenüber den anderen Modellen etwas abgewertet. Alle Modelle berechnen einen entsprechenden Reifegradindex je Betrachtungsbereich, das Reifegradmodell (InAsPro) berechnet als einziges Modell zusätzlich auch einen Gesamtreifegradindex. Große Unterschiede konnten im Hinblick auf die Industrie 4.0 Abdeckung, den sozio-technischen Fokus sowie den Bereich Management und Unternehmenskultur festgestellt werden.

Industrie 4.0 Reifegradmodelle im Vergleich	Industrie 4.0 Maturity Index (acatech)	Werkzeugkasten Industrie 4.0 (VDMA)	Industrie 4.0-Readiness (IMPULS-Stiftung)	Industrie 4.0 Assessment (Matt et al.)	Quick-Check Industrie 4.0 (INLUMIA)	Industrie 4.0-Reifegradmodell (WZL, RWTH Aachen)	Reifegradmodell (Appelfeller & Feldmann)	Industrie 4.0-Reifegradmodell (INTRO 4.0)	Industrie 4.0-Reifegradmodell (Puchan & Zeifang)	Reifegradmodell (InAsPro)
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
Industrie 4.0 Abdeckung	63%	37%	56%	55%	32%	41%	54%	33%	49%	62%
1. Smart Factory	55%	36%	61%	52%	36%	55%	48%	64%	73%	64%
2. Smart Supply Chain	62%	29%	43%	43%	43%	57%	33%	0%	5%	38%
3. Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	78%	44%	56%	67%	11%	0%	56%	56%	67%	56%
4. Neue Geschäftsmodelle	73%	47%	67%	73%	20%	13%	93%	0%	47%	93%
Sozio-technischer Fokus	58%	33%	51%	60%	53%	27%	56%	60%	76%	53%
5. Mensch	33%	0%	78%	89%	78%	0%	44%	67%	67%	56%
6. Technik	72%	50%	56%	67%	44%	39%	72%	67%	72%	50%
7. Organisation	56%	33%	33%	39%	50%	28%	44%	50%	83%	56%
Management und Unternehmenskultur	56%	0%	67%	89%	67%	0%	11%	22%	56%	100%
Anwendbarkeit des Reifegradmodells	92%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Reifegradindex	50%	0%	50%	50%	50%	50%	0%	50%	50%	100%

Tabelle 2.37 Industrie 4.0 Reifegradmodelle im Vergleich

Industrie 4.0 Abdeckung

Die insgesamt beste Industrie 4.0 Abdeckung haben der Industrie 4.0 Maturity Index (acatech) mit 63 Prozent sowie das Reifegradmodell (InAsPro) mit 62 Prozent. Der Industrie 4.0 Maturity Index (acatech) zeigt auch die beste Abdeckung der Bereiche Smart Supply Chain und Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus, während das Reifegradmodell (InAsPro) den Bereich neuer Geschäftsmodelle am besten abdeckt. Der Bereich Smart Factory wird am besten durch das Industrie 4.0-Reifegradmodell (Puchan & Zeifang) abgebildet. Insgesamt kann festgestellt werden, dass lediglich der Bereich Smart Factory von allen Modellen abgedeckt wird (36 bis 73 Prozent). Die anderen Industrie 4.0 Bereiche werden teilweise nicht oder nur indirekt bzw. sehr oberflächlich betrachtet.

Sozio-technischer Fokus

Den insgesamt besten sozio-technischen Fokus hat mit 76 Prozent das Industrie 4.0-Reifegradmodell (Puchan & Zeifang). Es deckt auch mit 83 Prozent am besten die Dimension Organisation ab. Die Dimension Mensch wird mit 89 Prozent am besten vom Industrie 4.0 Assessment (Matt et al.) abgebildet, gefolgt von den Modellen Industrie 4.0-Readiness (IMPULS-Stiftung)

und Quick-Check Industrie 4.0 (INLUMIA) mit je 78 Prozent. Die beste Abdeckung der Dimension Technik teilen sich der Industrie 4.0 Maturity Index (acatech), das Reifegradmodell (Appelfeller & Feldmann) sowie das Industrie 4.0-Reifegradmodell (Puchan & Zeifang) mit je 72 Prozent. Insgesamt kann festgestellt werden, dass alle Modelle die Dimensionen Technik mit 39 bis 72 Prozent abdecken, die Dimension Organisation mit 28 bis 83 Prozent und die Dimension Mensch mit 0 bis 89 Prozent. Nicht alle Modelle berücksichtigen daher den Menschen im Industrie 4.0 Reifegrad.

Management und Unternehmenskultur

Die beste Berücksichtigung der Themen Transformationsstrategie, Change Management und Unternehmenskultur zeigen das Reifegradmodell (InAsPro) mit 100 Prozent sowie das Industrie 4.0 Assessment (Matt et al.) mit 89 Prozent. Insgesamt kann festgestellt werden, dass dieser Bereich zwischen 0 und 100 Prozent abgedeckt wird, d.h. nicht alle Modelle berücksichtigen diese Themen im Reifegrad.

Fazit

Durch die Bewertung der Reifegradmodelle konnten in diesem Abschnitt wichtige Erkenntnisse zur Beantwortung der Forschungsfrage F1 nach der Eignung bestehender Reifegradmodelle als Werkzeug für die digitale Transformation von KMU und Mittelstand gewonnen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass es bei den bestehenden Reifegradmodellen noch inhaltliche Defizite bzgl. der Industrie 4.0 Abdeckung, des sozio-technischen Fokus sowie des Bereichs Management und Unternehmenskultur gibt. Für KMU und Mittelstand ist es aufgrund ihrer begrenzten Ressourcen aber wichtig, konkrete, vollständige und detaillierte Handlungsempfehlungen zu erhalten (vgl. Abschnitt 2.1.5). Künftige Modelle müssen daher insbesondere die folgenden Themen weiter konkretisieren, um sie für KMU und Mittelstand nutzbar zu machen:

- organisatorische Themen in der Produktion (z.B. Lean Production, Modularisierung)
- Datenerfassung und Produktionsplanung und -steuerung
- unterstützende Prozesse, wie Intralogistik, Instandhaltungsmanagement, Werkzeugmanagement und Qualitätsmanagement
- Dezentralisierung von Organisationseinheiten
- die sich ändernde Rolle des Menschen
- kognitive und physische Assistenzfunktionen für den Menschen
- Wissens- und Kompetenzmanagement
- horizontale und vertikale Integration
- Vernetzung in der Supply Chain

- digitale Abbildung des Produktlebenszyklus
- neue datenbasierte Geschäftsmodelle

2.4. Marktstudie zur Nutzung von Industrie 4.0 Modellen

Im Zeitraum von Oktober bis November 2017 wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Marktstudie „Status Quo der Nutzung von Industrie 4.0 Modellen“ durchgeführt. Sie zielte darauf ab, folgende Punkte zu klären:

1. Status Quo der Unternehmen auf dem Weg zu Industrie 4.0
Abgleich der Ergebnisse mit den Ergebnissen bisheriger Studien (vgl. Abschnitt 1.2).
2. Status Quo hinsichtlich der Einführung von Lean Production
Ermittlung des „Reifegrads“ der Prozesse und der Organisation in der Produktion, um ihn bei der Entwicklung des Reifegradindex berücksichtigen zu können.
3. Status Quo hinsichtlich der Einführung von Manufacturing Execution Systemen
Ermittlung des Status der Digitalisierung und Vernetzung in der Produktion und in produktionsnahen Bereichen, um ihn bei der Entwicklung des Reifegradindex berücksichtigen zu können.
4. Hindernisgründe für die Einführung von Industrie 4.0
Klärung der Hindernisse für die Einführung von Industrie 4.0 inkl. des Aspekts der Industrie 4.0 Modelle, da dieser bei bisherigen Marktstudien nicht berücksichtigt wurde (vgl. Abschnitt 1.2).
5. Defizite bestehender Modelle aus Anwendersicht
Klärung, ob geeignete Modelle als Vorlage für das eigene Unternehmen gefunden wurden und Ermittlung eventueller Defizite bestehender Modelle.

Damit trägt auch diese Umfrage zur Beantwortung der Forschungsfrage F1 nach der Eignung bestehender Reifegradmodelle als Werkzeug für die digitale Transformation von KMU und Mittelstand bei.

2.4.1. Methodik und Fragebogendesign

Zur Befragung der Unternehmen wurde mit dem Umfragetool LimeSurvey ein entsprechender Internetfragebogen erstellt. Der Link zum anonymen Fragebogen wurde mit der Bitte um Teilnahme per Email an ca. 500 zufällig ausgewählte Geschäftsführer produzierender Unternehmen der verschiedensten Branchen und Größen in Deutschland, Österreich und Schweiz versandt.

Unter den Teilnehmern wurden Amazon Gutscheine und Fachbücher verlost. Darüber hinaus erhielten die Teilnehmer eine schriftliche Zusammenfassung der Umfrageergebnisse.

Tabelle 2.38 zeigt den groben Aufbau des Fragebogens. Er umfasst 25 Fragen und gliedert sich in die Bereiche A Fragen zum aktuellen Industrie 4.0 Status, B Hindernisse bei der Einführung von Industrie 4.0, C Fragen zum erwarteten Nutzen von Industrie 4.0 und D Fragen zum Unternehmen. Der vollständige Fragebogen mit allen Antwortmöglichkeiten ist im Anhang dargestellt.

A Fragen zum aktuellen Industrie 4.0 Status	
A1 Was ist in Ihrer Branche das Ziel einer vollständigen Industrie 4.0 Realisierung?	Mehrfachauswahl, Freitext (Sonstiges)
A2 Welchen Status hat das Thema Industrie 4.0 in Ihrem Unternehmen?	Einfachauswahl, Freitext (Sonstiges)
A3 In welchen Bereichen haben Sie bzw. planen Sie Industrie 4.0 Projekte?	Mehrfachauswahl, Freitext (Sonstiges)
A4 Wer ist bei Ihnen der Initiator von Industrie 4.0 Aktivitäten?	Mehrfachauswahl, Freitext (Sonstiges)
A5 Haben Sie ein für Ihr Unternehmen anwendbares Industrie 4.0 Modell gefunden, nach dem Sie die Einführung von Industrie 4.0 planen?	Einfachauswahl
A6 Welches Modell / welche Modelle dienen Ihnen als Vorlage?	Freitext
A7 Wie haben Sie das Modell / die Modelle gefunden?	Einfachauswahl, Freitext (Sonstiges)
A8 Was fehlt Ihnen bei bestehenden Modellen?	Mehrfachauswahl, Freitext (Sonstiges)
A9 Ist in Ihrem Unternehmen das Thema Lean Production etabliert?	Mehrfachauswahl, je Kriterium 4-stufige Likert Skala
A10 Verfügt Ihr Unternehmen über ein Manufacturing Execution System (MES)?	Einfachauswahl
A11 Welche MES-Funktionen setzen Sie ein?	Mehrfachauswahl, je Kriterium 4-stufige Likert Skala
B Hindernisse bei der Einführung von Industrie 4.0	
B1 Wie stark werden Sie durch die nachfolgend genannten Einflussfaktoren auf Ihrem Weg zu Industrie 4.0 behindert?	Mehrfachauswahl, je Kriterium 4-stufige Likert Skala

B2 Was könnte Ihrem Unternehmen die Einführung von Industrie 4.0 erleichtern?	Freitext
C Fragen zum erwarteten Nutzen von Industrie 4.0	
C1 Wie hoch schätzen Sie den Nutzen von Industrie 4.0 für Ihr Unternehmen ein?	Mehrfachauswahl, je Kriterium 4-stufige Likert Skala
D Fragen zum Unternehmen	
D1 In welcher Branche ist Ihr Unternehmen tätig?	Mehrfachauswahl, Freitext (Sonstiges)
D2 An wie vielen Standorten produziert Ihr Unternehmen?	Einfachauswahl, Freitext (Sonstiges)
D3 Wie viele Mitarbeiter beschäftigt Ihr Unternehmen?	Einfachauswahl
D4 Wie ist Ihre Produktion überwiegend organisiert?	Einfachauswahl, Freitext (Sonstiges)
D5 Welche Logistikstrategie verfolgen Sie?	Mehrfachauswahl, Freitext (Sonstiges)
D6 Wie viele Endprodukte (ohne Varianten) stellen Sie her?	Einfachauswahl
D7 Wie viele Varianten produzieren Sie durchschnittlich je Endprodukt?	Einfachauswahl
D8 Wie viele Arbeitsschritte sind zur Produktion eines durchschnittlichen Endprodukts erforderlich?	Einfachauswahl
D9 Wie hoch ist die durchschnittliche Durchlaufzeit in Tagen eines Produkts in der Fertigung?	Einfachauswahl
D10 Welche Funktion haben Sie im Unternehmen?	Mehrfachauswahl, Freitext (Sonstiges)
D11 An welchen Forschungsthemen haben Sie Interesse?	Freitext

Tabelle 2.38 Fragebogenaufbau Marktstudie "Status Quo der Nutzung von Industrie 4.0 Modellen"

2.4.2. Wesentliche Ergebnisse der Umfrage

Die Ergebnisse der Marktstudie wurden bereits veröffentlicht (Schumacher, 2018), weshalb hier lediglich auf die für diese Arbeit wesentlichen Ergebnisse eingegangen wird.

Teilgenommen haben 68 produzierende Unternehmen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz, die überwiegend aus den Branchen Metallverarbeitung (28 Prozent), Kunststoff/Gummi (21 Prozent), Maschinen- und Anlagenbau (18 Prozent), Automotive (14 Prozent) und Elektrotechnik/Elektronik (12 Prozent) kommen. Davon hatten 9 Prozent bis zu 100 Beschäftigte, 25 Prozent zwischen 101 und 500 Beschäftigte, 16 Prozent zwischen 501 und 1.000 Beschäftigte und 50 Prozent mehr als 1.001 Beschäftigte. Geantwortet haben bei 19 Prozent

der Unternehmen die Geschäftsführung, bei 18 Prozent die Werksleitung, bei 28 Prozent die Produktionsleitung und bei 9 Prozent die IT-Leitung. Bei den sonstigen Teilnehmern handelt es sich überwiegend um Projektleiter oder Inhouse-Consultants.

Status des Themas Industrie 4.0 im Unternehmen

Die Umfrage ergab, dass von den befragten Unternehmen ca. 50 Prozent bereits erste Industrie 4.0 Projekte umgesetzt bzw. geplant hat (vgl. Abbildung 2.41). Die restlichen Unternehmen beobachten das Thema noch oder haben sich noch nicht damit beschäftigt. Die in Abschnitt 1.2 vorgestellte Studie der Stufen AG kam im Jahr 2017 auf einen Anteil aktiver Unternehmen von 62 Prozent. Es kann daher mit den Umfrageergebnissen bestätigt werden, dass 40 bis 50 Prozent der Unternehmen im Jahr 2017 noch nicht mit Industrie 4.0 Projekte gestartet ist.

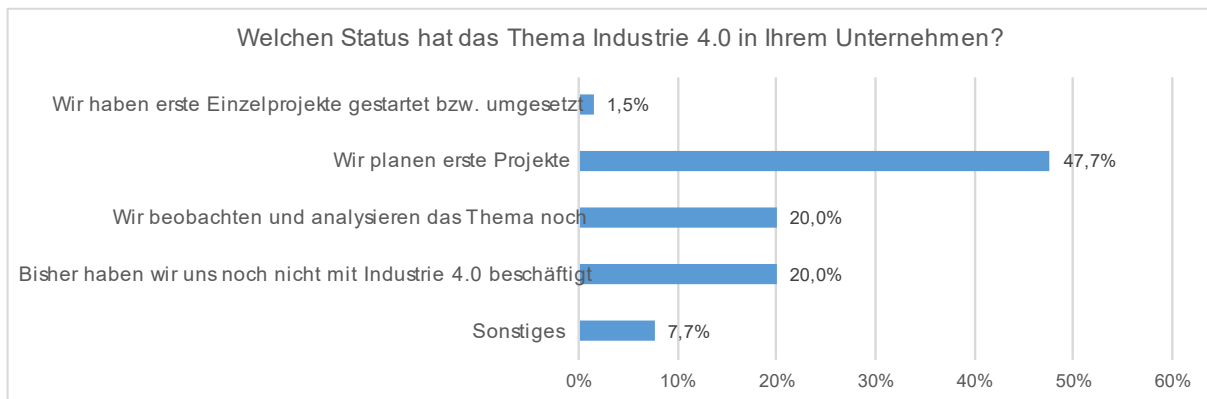


Abbildung 2.41 Status des Themas Industrie 4.0 im Unternehmen (n=68)

Status der Einführung von Lean Production

Es konnte festgestellt werden, dass den Unternehmen in den meisten Fällen noch eine gute Ausgangsbasis für Industrie 4.0 fehlt. Zwar gaben 87 Prozent der Unternehmen an, bereits Ordnung und Sauberkeit (5S-Methoden) im Unternehmen etabliert zu haben, Fließprinzipien wurden jedoch erst von 55 Prozent eingeführt (vgl. Abbildung 2.42). Selbstregelnde Prozesse (z.B. Kanban) wurden erst von 44 Prozent etabliert und eine dezentrale Produktionsplanung erst von 41 Prozent der befragten Unternehmen.

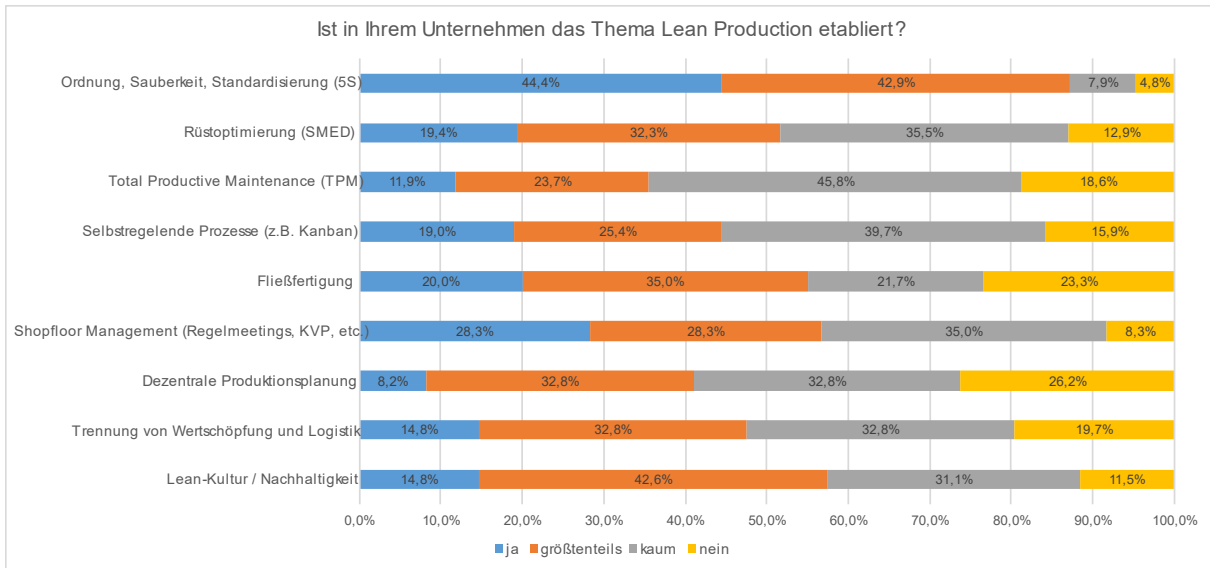


Abbildung 2.42 Status der Einführung von Lean Production im Unternehmen (n=68)

Status der Digitalisierung in der Produktion

51 Prozent der Unternehmen gaben an, bereits ein Manufacturing Execution System (MES) zur Digitalisierung in der Produktion einzusetzen. Davon nutzen 97 Prozent das MES im Bereich Auftragsmanagement, 94 Prozent zur Datenerfassung (Mengen, Zeiten, Prozessdaten, Störungen), 79 Prozent zur Feinplanung der Produktion und 72 Prozent zur Leistungsanalyse (vgl. Abbildung 2.43). Alle anderen Funktionen eines MES gemäß VDI 5600 (vgl. Abschnitt 2.2.2.3) werden deutlich seltener genutzt.

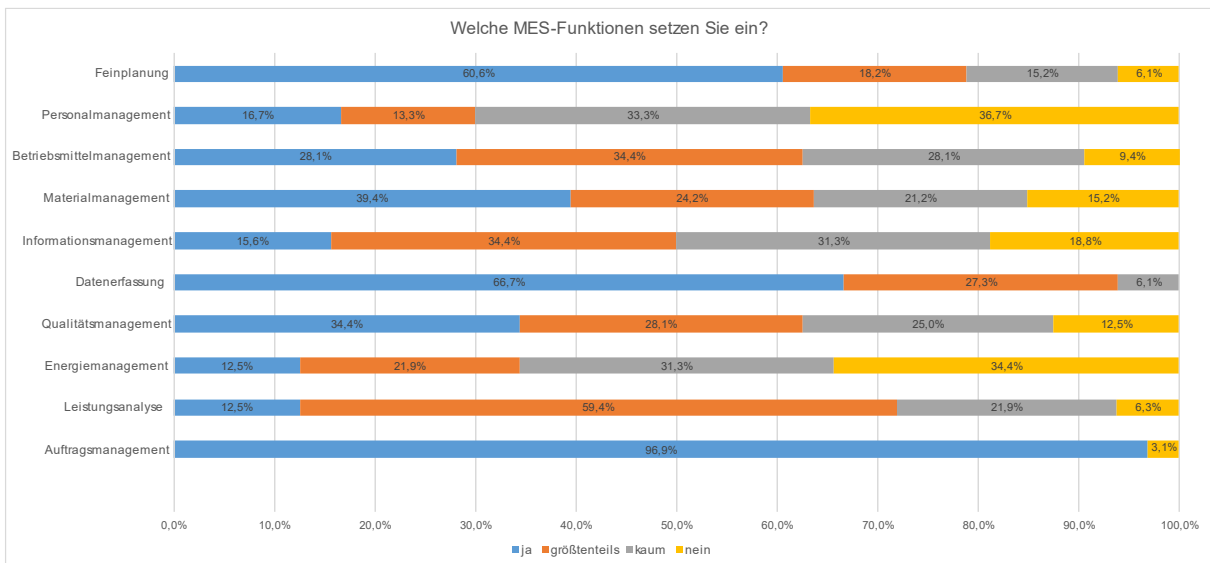


Abbildung 2.43 Status der eingesetzten Funktionalitäten eines Manufacturing Execution System (MES) (n=34)

Hindernisgründe auf dem Weg zu Industrie 4.0

Die meisten der befragten Unternehmen gaben das fehlende Wissen von Personal (63 Prozent) und Führungskräften (59 Prozent) sowie die Kosten der Digitalisierung (60 Prozent) als stärksten Hindernisgrund an (vgl. Abbildung 2.44). Erst dann folgen weitere Hindernisgründe, wie fehlende Plattformen zur Datenintegration (54 Prozent), Datensicherheit (51 Prozent) oder unzureichende IT-Infrastruktur (48 Prozent). Das Fehlen geeigneter Industrie 4.0 Modelle wurde „nur“ von 39 Prozent der Unternehmen als starker bis sehr starker Hindernisgrund genannt. Es ist jedoch zu vermuten, dass das fehlende Wissen von Personal und Führungskräften auch mit dem Fehlen geeigneter Industrie 4.0-Modelle zusammenhängt. Erst wenn es für die praktische Umsetzung geeignete Industrie 4.0-Modelle gibt, lässt sich darauf basierend auch ein Schulungs- und Weiterbildungsangebot für Personal und Führungskräfte aufbauen.

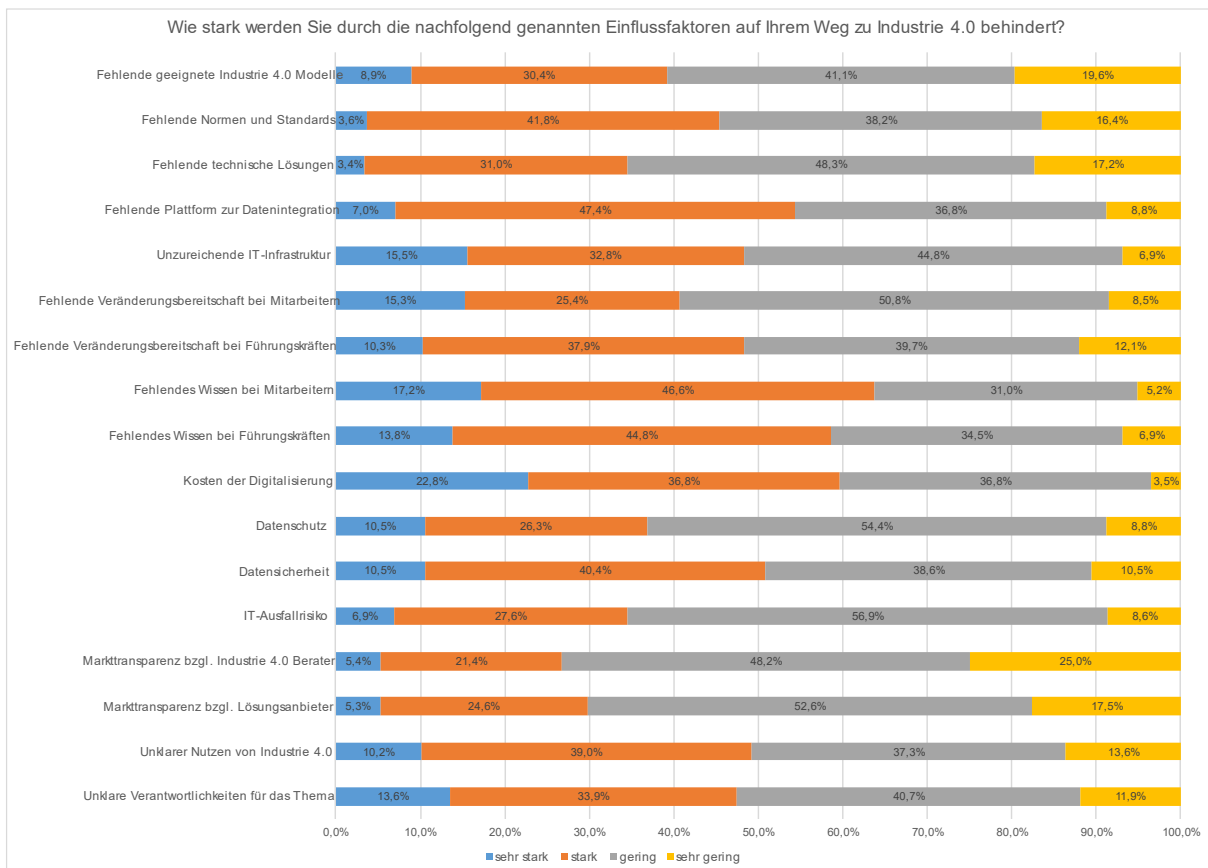


Abbildung 2.44 Hindernisgründe auf dem Weg zu Industrie 4.0 (n=68)

Eignung von Industrie 4.0 Modellen

86 Prozent der befragten Unternehmen gaben an, bisher kein anwendbares Industrie 4.0 Modell für ihr Unternehmen gefunden zu haben, nachdem sie die Einführung von Industrie 4.0 planen könnten. Als Begründung nannten 37 Prozent, dass ihnen die Modelle zu abstrakt und nicht

praxisnah genug seien (vgl. Abbildung 2.45). 27 Prozent bemängelten, dass die geprüften Modelle keine Umsetzungsstufen (Reifegrad) beinhalten, sondern nur den Endzustand darstellen. 24 Prozent bemängelten jeweils, dass die Modelle zu wenig auf organisatorische Veränderungen und den Faktor Mensch sowie auf Prozessveränderungen in der Produktion eingehen. Erst dann folgen weitere Punkte, wie die Anwendbarkeit in einer bestimmten Branche sowie die ungenaue Beschreibung von IT-technischen Veränderungen, individualisierten Produkte, Vernetzung in der Supply Chain und Abbildung des Produktlebenszyklus.

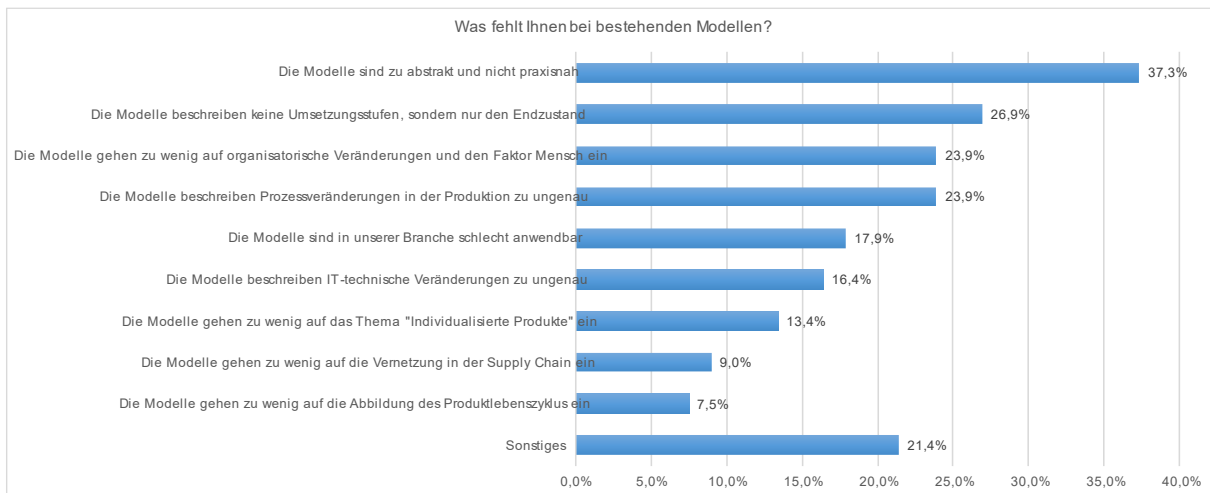


Abbildung 2.45 Defizite bestehender Industrie 4.0 Modelle (n=68)

2.4.3. Zusammenfassung und Fazit

Mit der Marktstudie konnte bestätigt werden, dass sich im Jahr 2017 erst 50 bis 60 Prozent der Unternehmen mit der Einführung von Industrie 4.0 beschäftigt haben. Das fehlende Wissen von Personal und Führungskräften sowie die Kosten der Digitalisierung werden als häufigste Gründe genannt. Dies deckt sich auch mit der in Abschnitt 1.2 vorgestellten Auswertung von 15 Studien und Marktumfragen im Zeitraum von 2014 bis 2019.

86 Prozent der befragten Unternehmen hatte bisher kein für ihr Unternehmen geeignetes Industrie 4.0 Modell gefunden, das als Vorlage für den Transformationsprozess dienen könnte. Als Hauptdefizite wird gesehen, dass diese zu abstrakt und nicht praxisnah seien, keine Umsetzungsstufen aufzeigen und zu wenig auf organisatorische Themen sowie den Faktor Mensch eingehen.

Die Studie zeigte aber auch auf, dass ca. 50 Prozent der Unternehmen die Lean Production Prinzipien noch nicht vollständig umgesetzt haben, d.h. hier bestehen noch Optimierungspotenziale, die im Transformationsprozess zu Industrie 4.0 zu berücksichtigen sind. Das gleiche

gilt für die Nutzung von Manufacturing Execution Systemen (MES). Dieser bisherige „Quasi-Standard“ für die Digitalisierung und Vernetzung in der Produktion wird nur von 51 Prozent der befragten Unternehmen genutzt.

2.5. Zusammenfassung

Mit Kapitel 2 konnte der erste Schritt „Identify problem & motivate“ in dem dieser Arbeit zugrunde liegenden DSRM Prozessmodell (vgl. Abschnitt 1.4) abgeschlossen werden. Hierzu wurden in Abschnitt 2.1 und in der Marktstudie in Abschnitt 2.4 zunächst die Ausgangssituation produzierender Unternehmen sowie die Besonderheiten von KMU und Mittelstand ermittelt. Mit der Beschreibung der Industrie 4.0 Technologien und deren Anwendungsbereiche in Abschnitt 2.2 wurden die Handlungsbereiche der Transformation in Richtung Industrie 4.0 dargestellt – sozusagen als Benchmark („da könnten die Unternehmen stehen“). Die Analyse und Bewertung bestehender Industrie 4.0 Reifegradmodelle in Abschnitt 2.3 zeigte, dass diese noch Defizite hinsichtlich der Abdeckung dieser Handlungsbereiche aufweisen aber auch hinsichtlich der Abdeckung der Wechselbeziehungen zwischen den Dimensionen Mensch, Technik und Organisation. Die in Abschnitt 2.4 vorgestellte Marktstudie ergab, dass die Mehrzahl der Unternehmen (86 Prozent) kein für ihr Unternehmen geeignetes Industrie 4.0 Reifegradmodell gefunden hat, da diese zu abstrakt und nicht praxisnah seien und zudem wichtige Aspekte der Transformation fehlen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Modellbewertung. Damit konnten in Kapitel 2 nicht nur die Defizite bestehender Reifegradmodelle identifiziert werden, sondern es konnte auch dargestellt werden, welche Wichtigkeit die Entwicklung eines verbesserten Modells hat. Im nun folgenden Kapitel 3 werden entsprechend des zweiten DSRM Prozessschritts „Define objectives of a solution“ auf Basis der Ergebnisse von Kapitel 2 die Anforderungen an ein neues Modelldesign definiert.

3. Anforderungen an Modelldesign und Reifegradindex

Vor der Entwicklung eines neuen Reifegradmodells und -index werden in diesem Kapitel gemäß des zweiten DSRM Prozessschritts „Define objectives of a solution“ zunächst die Anforderungen an das zu entwickelnde Artefakt definiert. Dazu werden in Abschnitt 3.1 die allgemeinen Anforderungen an Reifegradmodelle beschrieben, in Abschnitt 3.2 die Ziele und Anwendungsbereiche und in Abschnitt 3.3 die Betrachtungsbereiche des neuen Modells.

3.1. Allgemeine Anforderungen an Reifegradmodelle

Reifegradmodelle müssen es Organisationen ermöglichen, den Status Quo der betrachteten Objekte zu ermitteln, einen typischen, stufenweisen Entwicklungspfad zu einem höheren Grad der Reife zu erkennen und Maßnahmen zur Verbesserung der Reife abzuleiten (Knackstedt, et al., 2009, S. 535f.). Der Reifegrad des zu untersuchenden Objekts muss sich dabei anhand festgelegter Merkmale und den entsprechenden reifegradabhängigen Merkmalsausprägungen bestimmen lassen (ebd.). Die „Reife“ beschreibt dabei den Fortschritt hinsichtlich einer bestimmten Fähigkeit oder den Grad einer Zielerreichung (Mettler, 2011, S. 83).

Während sich Reifegradmodelle häufig nur auf eine Dimension beziehen, müssen Reifegradmodelle sozio-technischer Systeme aufgrund der Wechselwirkungen untereinander alle drei Dimensionen Mensch („people/culture“), Technik („objects/technology“) und Organisation („process/structures“) abbilden (ebd.). Anders als Vorgehensmodelle müssen Reifegradmodelle dabei nicht beschreiben, „wie“ etwas getan werden sollte, sondern „was“ zu tun ist, um einen höheren Grad der Reife zu erreichen (Leineweber, et al., 2018, S. 25).

Die Ermittlung der Reife muss im Rahmen eines Assessments durch die Beantwortung eines Fragebogens möglich sein (Knackstedt, et al., 2009, S. 535).

3.2. Ziele und Anwendungsbereiche

Das Ziel ist die Entwicklung eines Industrie 4.0 Reifegradmodells mit Reifegradindex für KMU und mittelständische Unternehmen aller Branchen mit einer mehrstufigen diskreten Fertigung. Die Unternehmen sollen durch das Reifegradmodell und den -index dabei unterstützt werden, ihren Status Quo auf dem Weg zu Industrie 4.0 zu bewerten, Ziele zu definieren und Maßnahmen für einen höheren Grad der Reife abzuleiten (vgl. Abschnitt 1.3). Das mehrdimensionale Modell soll die Unternehmen dabei wie ein morphologischer Kasten bei der Visionsentwicklung („da wollen wir hin“), das heißt bei der Findung einer zu ihrem Unternehmen passenden

optimalen „Zielkennlinie“ bezüglich der Reifegrade verschiedener Bewertungskategorien unterstützen. Anhand des Reifegradindex soll der Fortschritt der Transformation in Richtung Industrie 4.0 messbar werden, so dass Transformationsziele verfolgt werden können. Das Reifegradmodell soll von den Unternehmen selbst im Rahmen regelmäßiger interner Assessments anwendbar sein.

Darüber hinaus soll das Modell der Schulung von Führungskräften und Personal in den Unternehmen dienen, die dadurch ein einheitliches Verständnis für Industrie 4.0 sowie für den eigenen, unternehmensspezifischen Transformationsweg erhalten.

Die im Rahmen dieser Arbeit entstehende Systematik für ein Industrie 4.0 Reifegradmodell soll aber auch als wissenschaftliches Framework für darauf aufbauende Folgearbeiten dienen.

3.3. Betrachtungsbereiche

Das dem Reifegradindex zugrunde liegende Reifegradmodell soll alle in Abschnitt 2.2 beschriebenen Handlungsfelder und Betrachtungsbereiche von Industrie 4.0 umfassen und damit die Lücken bestehender Industrie 4.0 Reifegradmodelle (vgl. Abschnitt 2.3) schließen. Dabei sollen – wie in Abschnitt 2.3.3 in der Zusammenfassung der Modellbewertung gefordert – insbesondere die folgenden Themen weiter konkretisiert werden, um sie für KMU und Mittelstand nutzbar zu machen:

- organisatorische Themen in der Produktion (z.B. Lean Production, Modularisierung)
- Datenerfassung und Produktionsplanung und -steuerung
- unterstützende Prozesse, wie Intralogistik, Instandhaltungsmanagement, Werkzeugmanagement und Qualitätsmanagement
- Dezentralisierung von Organisationseinheiten
- die sich ändernde Rolle des Menschen
- kognitive und physische Assistenzfunktionen für den Menschen
- Wissens- und Kompetenzmanagement
- horizontale und vertikale Integration
- Vernetzung in der Supply Chain
- digitale Abbildung des Produktlebenszyklus
- neue datenbasierte Geschäftsmodelle

Tabelle 3.1 zeigt zusammenfassend die wesentlichen im Reifegradmodell und Reifegradindex abzubildenden Handlungsfelder und Betrachtungsbereiche.

Handlungsfeld	Betrachtungsbereiche	Beschreibung
Smart Factory	<ul style="list-style-type: none"> Entwicklung Produktion Produktionsplanung und -steuerung Intralogistik Instandhaltungsmanagement Werkzeugmanagement Qualitätsmanagement Assistenzsysteme Betriebsmittel Horizontale und vertikale Integration Kommunikation Big Data Analyse Qualifikation der Beschäftigten Aufgabenspektrum der Beschäftigten Wissens- und Kompetenzmanagement Unternehmenskultur Change Management Smart Factory Strategie 	Abschnitt 2.2.3
Smart Supply Chain	<ul style="list-style-type: none"> Flexible Wertschöpfungsnetzwerke Echtzeitstatus und Tracking Planung, Steuerung und Überwachung Assistenzsysteme Transportmanagement Horizontale Integration der IT-Systeme Mitarbeiterqualifizierung Smart Supply Chain Strategie 	Abschnitt 2.2.4
Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	<ul style="list-style-type: none"> Smart Products (Abbildung des Produktlebenszyklus) Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus 	Abschnitt 2.2.5
Neue Geschäftsmodelle	<ul style="list-style-type: none"> Smart Products (Geschäftsmodell) Smart Services Digitale Geschäftsmodelle Digitale Plattformen Strategie für neue Geschäftsmodelle 	Abschnitt 2.2.6

Tabelle 3.1 Handlungsfelder und wesentliche Betrachtungsbereiche (Anforderung)

Sozio-technische Betrachtung

Die Bewertungskriterien zu den oben genannten Betrachtungsbereichen sollen nicht nur Aspekte der sozio-technischen Dimensionen Mensch (M), Technologie (T), Organisation (O) umfassen (vgl. Abschnitt 3.1), sondern insbesondere auch die Schnittstellen Mensch-Technik (MT), Mensch-Organisation (MO) und Technik-Organisation (TO), wie in Abschnitt 2.2.3.11 dargestellt.

Reifegradskala

Bezüglich der Reifegradskala besteht die Anforderung, dass sie anhand festgelegter Merkmale den Reifegrad in mehreren Stufen von einer Ausgangssituation bis zum höchsten Grad der Reife beschreibt (vgl. Abschnitt 3.1). Bei der Festlegung der Merkmale der Ausgangssituation ist zu berücksichtigen, dass KMU und Mittelstand teilweise noch nicht in die Digitalisierung eingestiegen sind und dass auch organisatorische Themen, wie die Einführung von Lean Production Prinzipien, noch nicht umfassend umgesetzt wurden (vgl. Abschnitte 2.1 und 2.4.2). Die Anforderung besteht auch darin, die Reifegradstufen klar zu benennen, wie z.B. die Stufen „Computerisierung“, „Konnektivität“, „Sichtbarkeit“, „Transparenz“, „Prognosefähigkeit“ und „Adaptierbarkeit“ des Industrie 4.0 Maturity Index von acatech (Schuh, et al., 2017) oder die von Bauernhansl et al. (2016, S. 15) beschriebenen Stufen „Datenerfassung und -verarbeitung“, „Assistenzsysteme“, „Vernetzung und Integration“, „Dezentralisierung und Serviceorientierung“ und „Selbstorganisation und Autonomie“. Nur so können die einzelnen Merkmale der Bewertungskriterien dem Reifegrad entsprechend richtig eingeordnet und Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Bisherige Reifegradmodelle verwenden teilweise Bezeichnungen, wie „Stufe 1“, „Stufe 2“, „Stufe 3“, etc. oder „Außenstehender“, „Anfänger“, „Fortgeschrittener“ (vgl. Abschnitt 2.3.2), was eine reifegradbezogene Synchronisierung der Merkmale verschiedener Bewertungskriterien erschwert.

Reifegradindex

Bezüglich des Reifegradindex besteht die Anforderung darin, dass dieser je Betrachtungsbereich (z.B. Intralogistik) berechnet wird und dann zu einem Index je Handlungsfeld (z.B. Smart Factory) sowie zu einem Gesamtreifegradindex aggregiert wird. Damit erhalten die Anwender die Möglichkeit des „Drill-Downs“ vom Gesamtindex über die Handlungsfelder bis hin zu den einzelnen Betrachtungsbereichen.

4. Design und Entwicklung eines Industrie 4.0 Reifegradindex

Kapitel 4 befasst sich mit der Entwicklung eines neuen Industrie 4.0 Reifegradindex sowie eines dem Reifegradindex zugrunde liegenden Industrie 4.0 Reifegradmodells. Dieser dritte Schritt „Design & Development“ im DSRM Prozessmodell basiert auf

- der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Ausgangssituation produzierender Unternehmen
- den in Abschnitt 2.2 beschriebenen Technologien, Anwendungen und Handlungsbereichen von Industrie 4.0
- den in Abschnitt 2.3 dargestellten Defiziten bestehender Reifegradmodelle
- dem mit der Marktumfrage in Abschnitt 2.4 nachgewiesenen Bedarf an einem geeigneten Reifegradmodell
- den in Kapitel 3 zusammengefassten Ziele und Anforderungen an das neue Modell

Damit dient Kapitel 4 auch der Beantwortung der in Abschnitt 1.3 formulierten Forschungsfragen 2 (Industrie 4.0 Reifegradmodell für KMU und Mittelstand) und 3 (Industrie 4.0 Reifegradindizes zur Bewertung der Gesamt-Industrie 4.0-Reife eines Unternehmens).

4.1. Allgemeines Modelldesign

Basierend auf Forschungsfrage 3 und den Anforderungen an den zu entwickelnden Reifegradindex (vgl. Abschnitt 3.3) wurde ein modulares Modelldesign gewählt. Abbildung 4.1 zeigt die Zusammensetzung des gesamten Industrie 4.0 Reifegradindex „Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)“ aus den Einzelindizes der vier in Abschnitt 2.2 beschriebenen Industrie 4.0 Handlungsbereiche:

- Smart Factory Maturity Index (SFMI)
Reifegradindex zur Bestimmung der Industrie 4.0 Reife der Smart Factory.
- Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI)
Reifegradindex zur Bestimmung der Industrie 4.0 Reife der Supply Chain.
- Smart Products & Life Cycle Maturity Index (PLCMI)
Reifegradindex zur Bestimmung der Reife von Smart Products und der digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus.
- New Business Maturity Index (NBMI)
Reifegradindex zur Bestimmung der Reife im Hinblick auf die Nutzung neuer datenbasierter Geschäftsmodelle.

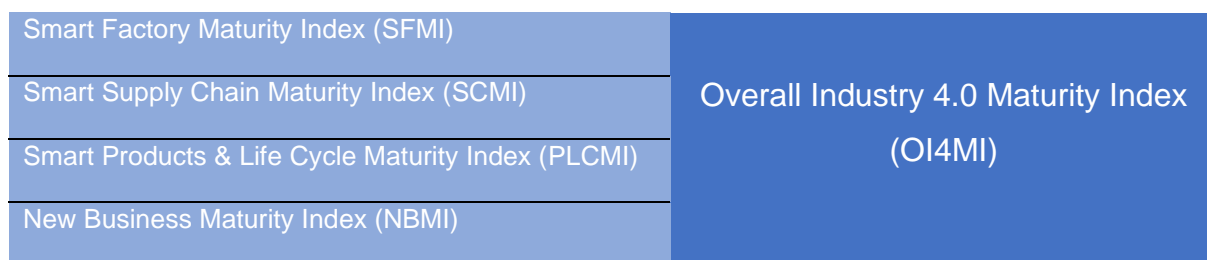


Abbildung 4.1 Modularer Aufbau des Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)

Die vier Einzelindizes SFMI, SCMI, PLCMI und NBMI werden jeweils durch ein zugrunde liegendes Reifegradmodell ermittelt. Der grundsätzliche Aufbau dieser Reifegradmodelle orientiert sich an den allgemeinen Anforderungen an Reifegradmodelle (vgl. Abschnitt 3.1), d.h. es gibt verschiedene Betrachtungsbereiche sowie deren reifegradabhängigen Merkmale. Dieser grundsätzliche Aufbau wurde entsprechend der Anforderungen (vgl. Abschnitt 3.3) jedoch um Bewertungskriterien erweitert, die den verschiedenen sozio-technischen Dimensionen Mensch (M), Technik (T) und Organisation (O) sowie deren Schnittstellen M-T, MO, TO und MTO entsprechen. Darüber hinaus wurde der grundsätzliche Aufbau von Reifegradmodellen um Reifegradindizes je Betrachtungsbereich sowie um einen gesamten Einzelindex SFMI, SCMI, PLCMI bzw. NBMI erweitert. Tabelle 4.2 zeigt den schematischen Aufbau der Reifegradmodelle zur Ermittlung der Einzelindizes. Die einzelnen Komponenten werden im Folgenden näher erläutert.

Smart Factory Maturity Index (SFMI)			Reifegradstufen					Reifegradindex				
			Ausgangsbasis	Transparenz	Reaktionsfähigkeit/Assistenz	Vernetzung/Dezentralisierung	Prognose	Selbstorganisation/Autonomie	23%	53%	2,2	
Betrachtungsbereich	Bewertungskriterium	Dimension	Reifegradmerkmale						IST	SOLL	Priorität	Bemerkung
Betrachtungsbereich 1									27%	60%	2,0	
	Bewertungskriterium 1	M	Merkmal 1.1	Merkmal 1.2	Merkmal 1.3	Merkmal 1.4	Merkmal 1.5	Merkmal 1.6	1	3	3	Bemerkung 1
	Bewertungskriterium 2	T	Merkmal 2.1	Merkmal 2.2	Merkmal 2.3	Merkmal 2.4	Merkmal 2.5	Merkmal 2.6	0	2	2	Bemerkung 2
	Bewertungskriterium 3	O	Merkmal 3.1	Merkmal 3.2	Merkmal 3.3	Merkmal 3.4	Merkmal 3.5	Merkmal 3.6	3	4	1	Bemerkung 3
Betrachtungsbereich 2									20%	47%	2,3	
	Bewertungskriterium 1	M	Merkmal 1.1	Merkmal 1.2	Merkmal 1.3	Merkmal 1.4	Merkmal 1.5	Merkmal 1.6	0	2	3	Bemerkung 1
	Bewertungskriterium 2	T	Merkmal 2.1	Merkmal 2.2	Merkmal 2.3	Merkmal 2.4	Merkmal 2.5	Merkmal 2.6	1	2	3	Bemerkung 2
	Bewertungskriterium 3	O	Merkmal 3.1	Merkmal 3.2	Merkmal 3.3	Merkmal 3.4	Merkmal 3.5	Merkmal 3.6	2	3	1	Bemerkung 3

Abbildung 4.2 Schematischer Aufbau der Reifegradmodelle je Einzelindex

Betrachtungsbereiche

Die jeweiligen Betrachtungsbereiche eines Einzelindex werden in den nachfolgenden Abschnitten 4.2 bis 4.5 ausführlich vorgestellt. Sie basieren auf den in Abschnitt 3.3 beschriebenen An-

forderungen. Beispiele solcher Betrachtungsbereiche sind im Fall der Smart Factory die Produktion, die Produktionsplanung und -steuerung, die Intralogistik, das Instandhaltungsmanagement oder das Qualitätsmanagement.

Bewertungskriterien und sozio-technische Dimensionen

Je Betrachtungsbereich gibt es verschiedene Bewertungskriterien, anhand derer der Betrachtungsbereich bewertet wird. Jedes dieser Bewertungskriterien steht für eine bestimmte sozio-technische Dimension Mensch (M), Technik (T), Organisation (O), Mensch-Technik (MT), Mensch-Organisation (MO), Technik-Organisation (TO) oder gesamt (MTO). Die den Reifegradmodellen zugrunde liegenden Definitionen dieser Dimensionen basieren auf den Ausführungen in Abschnitt 2.2.3.11 und sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Die jeweiligen Bewertungskriterien werden in den nachfolgenden Abschnitten 4.2 bis 4.5 ausführlich vorgestellt.

Mensch (M)	Mensch-Technik (MT)
Beschäftigte mit ihren Fähigkeiten, Fertigkeiten und Kenntnissen.	<p>„Menschzentrierte Technikgestaltung“</p> <ul style="list-style-type: none"> • die Automatisierung bzw. Assistenz bei besonders belastenden Tätigkeiten (z.B. durch Mensch-Roboter-Kollaboration) • Intelligente Assistenzsysteme mit nutzer- und kontextsensitiver Filterung und Bereitstellung von Informationen • lernförderliche Arbeitsmittel • die Lernfähigkeit des Systems
Technik (T)	Mensch-Organisation (MO)
Alle physischen Elemente, wie Betriebs- und Prüfmittel, Transport- und Lagermittel, Automatisierungstechnik, Software, Cyber-Physische Systeme (CPS), Roboter und Assistenzsysteme.	<p>Neue Organisationsformen mit dem Ziel der „Ganzheitlichkeit“ von Tätigkeiten.</p> <ul style="list-style-type: none"> • ganzheitliche Arbeitsaufgaben (Ausführung, Planung, Kontrolle) • große Handlungsspielräume und Selbstorganisation der Menschen • die Aufwertung von Qualifikation und Tätigkeiten • Förderung von Lernprozessen • Horizontale und vertikale Vernetzung der Beschäftigten
Organisation (O)	Technik-Organisation (TO)
Aufbauorganisation, Ablauforganisation, Methoden, Maßnahmen, Werkzeuge, Hierarchien, Zuständig-	<p>Neue Rahmenbedingungen für die Organisation, die sich durch die Technik ergeben.</p> <ul style="list-style-type: none"> • die Dezentralisierung von Organisationseinheiten

keiten, Informations- und Kommunikationsstrukturen sowie Arbeitstätigkeiten und Arbeitsgestaltung.	<ul style="list-style-type: none"> • die dezentrale Selbststeuerung und Autonomie der Systeme • Aufhebung der vertikalen Arbeitsteilung zwischen Shopfloor und indirekten Bereichen • Interdisziplinäre Kommunikation und Kooperation (z.B. mit Hilfe von Social-Media Funktionen) • Verfügbarkeit relevanter Wissens- und Informationsquellen und Erzeugung eines kontextspezifischen Informationsangebots
Mensch-Technik-Organisation (MTO)	
Übergreifende Themen, wie Strategie und Wissens- und Kompetenzmanagement.	

Tabelle 4.1 Definitionen der sozio-technische Dimensionen des Industrie 4.0 Reifegradmodells

Anzahl der Reifegradstufen

Die in Abschnitt 2.3 untersuchten Industrie 4.0 Reifegradmodelle umfassen zwischen vier und sechs Reifegradstufen. Um die Sprünge zwischen den einzelnen Stufen für KMU und Mittelstand nicht zu groß zu machen und um auch die Ausgangssituation mit einer eigenen Stufe abzubilden, wurde im Rahmen des Modelldesigns eine 6-stufige Likert Skala ausgewählt (vgl. Abbildung 4.2).

Bezeichnung der Reifegradstufen

Während die meisten der untersuchten Reifegradmodelle für die einzelnen Reifegradstufen Bezeichnungen, wie „Stufe 1“, „Stufe 2“, „Stufe 3“, etc. oder „Außenstehender“, „Anfänger“, „Fortgeschrittener“ (vgl. Abschnitt 2.3.2) verwenden, wurde beim Design des neuen Reifegradmodells darauf geachtet, eine Systematik zu finden, die es erlaubt, die reifegradbezogenen Merkmale verschiedener Bewertungskriterien miteinander zu synchronisieren. So kann beispielsweise eine Reaktion auf Daten erst dann erfolgen, wenn die entsprechenden Daten zuvor erfasst wurden. Folglich müssen Reaktionen auf Daten auf einer höheren Reifegradstufe liegen, als die Erfassung der Daten. Es besteht daher der Bedarf an „sprechenden“ Reifegradstufen (vgl. Abschnitt 3.3). Von den untersuchten Modellen verfolgten nur der Industrie 4.0 Maturity Index von acatech und das Industrie 4.0-Reifegradmodell des WZL diesen Ansatz (vgl. Abschnitt 2.3.2):

Industrie 4.0 Maturity Index von acatech

1. Computerisierung
2. Konnektivität
3. Sichtbarkeit
4. Transparenz
5. Prognosefähigkeit
6. Adaptierbarkeit

Industrie 4.0-Reifegradmodell des WZL

1. Computerisierung
2. Vernetzung
3. Visualisierung
4. Transparenz
5. Vorhersage
6. Adaptabilität

Aufgrund der nicht ganz einfachen Abgrenzung der Begriffe Computerisierung und Konnektivität/Vernetzung bzw. Sichtbarkeit/Visualisierung und Transparenz werden Verständnisprobleme bei der Zielgruppe KMU und Mittelstand befürchtet. Zudem zeigen die Bezeichnungen der Reifegradstufen keine für KMU und Mittelstand erstrebenswerten Stufen einer höheren Reife auf. Darüber hinaus sind in beiden Systematiken die zentralen Ziele von Industrie 4.0, wie Assistenz, Selbstorganisation und Autonomie nicht ersichtlich. Beim Design des neuen Reifegradmodells wurde daher eine neue Reifegradskala in Anlehnung an (Bauernhansl, et al., 2016, S. 15) entwickelt (vgl. Abbildung 4.3).

Ausgangsbasis	Transparenz	Reaktionsfähigkeit/ Assistenz	Vernetzung/ Dezentralisierung	Prognosefähigkeit	Selbstorganisation/ Autonomie
0	1	2	3	4	5

Abbildung 4.3 Reifegradskala des Industrie 4.0 Reifegradmodells

Die Reifegradstufe 0 „Ausgangsbasis“ entspricht der Ausgangssituation der Unternehmen, wie auch in Abschnitt 2.1 dargestellt. Die Reifegradstufe 1 „Transparenz“ beschreibt die Schaffung von Transparenz, insbesondere durch eine erste Digitalisierung und Datenerfassung, aber z.B. auch durch das Erstellen von Kompetenzprofilen der Beschäftigten. Die Reifegradstufe 2 „Reaktionsfähigkeit / Assistenz“ beschreibt die Reaktion auf die erfassten Daten und die Nutzung der Daten z.B. für erste Assistenzfunktionen für den Menschen. Auf der Reifegradstufe 3 „Vernetzung / Dezentralisierung“ geht es um die breitere Vernetzung der erfassten Daten, die Integration der IT-Systeme sowie die daraus möglich werdende Dezentralisierung von Organisationsformen. Die Reifegradstufe 4 „Prognosefähigkeit“ beschreibt Aspekte, die sich durch die Prognosefähigkeit moderner Datenanalysemethoden ergeben (vgl. Abschnitt 2.2.3.10). Mit der Reifegradstufe 5 „Selbstorganisation / Autonomie“ ist der höchste Grad der Reife erreicht. Hier werden Aspekte der Selbstorganisation und autonomen Steuerung von Abläufen beschrieben.

Reifegradmerkmale

Die Reifegradmerkmale je Bewertungskriterium wurden im Rahmen dieser Arbeit komplett neu entwickelt. Merkmale bestehender Reifegradmodelle konnten nur bedingt verwendet werden, da

- die neue Reifegradskala mit den Stufen Transparenz, Reaktionsfähigkeit / Assistenz, Vernetzung / Dezentralisierung, Prognose und Selbstorganisation / Autonomie andere Merkmale erfordert
- sich die neuen Merkmale an den Dimensionen M, T, O, MT, MO, TO und MTO orientieren
- die neuen Merkmale detaillierter dargestellt werden müssen, um sie für KMU und Mittelstand operabel zu machen

Bestehende Reifegradmodelle konnten jedoch wertvolle Anregungen liefern. Häufig konnten aufeinander aufbauende Reifegradmerkmale auch aus der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Ausgangssituation produzierender Unternehmen sowie den in Abschnitt 2.2 beschriebenen Technologien, Anwendungen und Handlungsbereichen von Industrie 4.0 abgeleitet werden. In allen anderen Fällen mussten zu den Bewertungskriterien und Reifegradstufen passende Reifegradmerkmale neu entwickelt werden. Die Herausforderung bestand dabei in der Entwicklung logisch aufeinander aufbauender Reifegradmerkmale, die umsetzbar sind und die auch einen Nutzen für die Unternehmen darstellen. Zur Entwicklung neuer Reifegradmerkmale wurden die aus den Abschnitten 2.1 und 2.2 ableitbaren Merkmale den entsprechenden Reifegradstufen zugeordnet. Die dann noch fehlenden Reifegradmerkmale zu einem Bewertungskriterium wurden entsprechend der jeweiligen Reifegradstufe logisch erschlossen.

Beispiel Produktionsplanung und -steuerung

Aus den Ausführungen in den Abschnitten 2.1 und 2.2 folgt, dass auf Reifegradstufe 1 (Transparenz) ein ERP-System zur Grobplanung zur Verfügung steht. Auf Reifegradstufe 2 (Reaktionsfähigkeit/Assistenz) steht ein zusätzliches MES zur reaktiven Feinplanung zur Verfügung. Die logische Ableitung für die Reifegradstufe 0 (Ausgangsbasis) ist, dass es dort kein System gibt (manuelle Planung). Die logische Ableitung für die Reifegradstufe 3 (Vernetzung/Dezentralisierung) ist, dass die Produktionsplanung und -steuerung dezentral erfolgt. Die logische Ableitung für die Reifegradstufe 4 (Prognose) ist, dass die Systeme auch prognosefähig sind. Die logische Ableitung für die Reifegradstufe 5 (Selbstorganisation/Autonomie) ist, dass sich die Produktion weitestgehend selbst steuert.

Nicht immer lassen sich die Reifegradmerkmale eines Bewertungskriteriums den Stufen Transparenz, Reaktionsfähigkeit / Assistenz, Vernetzung / Dezentralisierung, Prognose und Selbstorganisation / Autonomie zuordnen. So lässt sich beispielsweise bei dem Bewertungskriterium

„Strategie“ nicht von „Reaktionsfähigkeit / Assistenz“ oder von „Vernetzung / Dezentralisierung“ sprechen. In diesen Fällen sind die Reifegradstufen einfach als Stufen 0 bis 5 zu betrachten. Dennoch helfen die Bezeichnungen der Reifegradstufen bei der korrekten Synchronisierung der Reifemerkmale verschiedener Bewertungskriterien.

Auswahl von Reifegradstufen

Zur Auswahl einer zutreffenden Reifegradstufe wurden in Anlehnung an die Systematik des Industrie 4.0 Assessment Modells von Matt et al. (2018, S. 107) die drei Felder „IST“, „SOLL“, „Priorität“ und „Bemerkung“ in das Reifegradmodell eingefügt. Im Feld „IST“ wird der aktuelle Reifegrad aus den vorgegebenen Werten 0 bis 5 ausgewählt. Das Feld „SOLL“ dient der Auswahl eines gewünschten Zielzustands aus den vorgegebenen Werten 0 bis 5. Im Feld „Priorität“ kann eine Priorität des Bewertungskriteriums ausgewählt werden, so dass nach dem Assessment eine schnelle Selektion nach wichtigen und unwichtigen Schritten der Transformation erfolgen kann. Zur Auswahl stehen im Feld „Priorität“ die Werte 0 (unwichtig), 1 (weniger wichtig), 2 (wichtig) und 3 (sehr wichtig). Im Feld „Bemerkung“ können während des Assessments erste Ideen oder Fragen erfasst werden. Bei Bewertungskriterien, die für das Unternehmen nicht relevant sind, kann „n.a.“ (nicht anwendbar) ausgewählt werden, sie gehen dadurch nicht in die Bewertung ein.

Reifegradindizes

Auf der untersten Stufe wird ein *Reifegradindex RIB je Betrachtungsbereich* (z.B. Produktion) berechnet. Er wird in Prozent angegeben und berechnet sich aus dem Mittelwert aller Reifegrade RBK der Bewertungskriterien eines Betrachtungsbereichs bezogen auf den maximal zu erreichenden Reifegrad 5:

$$RIB_i = \frac{\sum_{j=1}^n RBK_{i,j}}{n * 5}$$

RIB = Reifegradindex des Betrachtungsbereich

RBK = Reifegrad eines Bewertungskriterium

i = Betrachtungsbereich

j = Bewertungskriterium

n = Anzahl der Bewertungskriterien des Betrachtungsbereichs

Die vier Einzelindizes *Smart Factory Maturity Index (SFMI)*, *Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI)*, *Smart Product & Life Cycle Maturity Index (PLCMI)* und *New Business Maturity Index (NBMI)* aggregieren ihre jeweiligen Reifegradindizes RIB der Betrachtungsbereiche. Die Einzelindizes werden in Prozent angegeben und berechnen sich jeweils aus dem Mittelwert

aller Reifegradindizes RIB ihrer Betrachtungsbereiche, wie am Beispiel des SFMI dargestellt (SCMI, PLCMI und NBMI analog dazu):

$$SFMI = \frac{\sum_{i=1}^n RIB_i}{n}$$

SFMI = Smart Factory Maturity Index

RIB = Reifegradindex des Betrachtungsbereich

i = Betrachtungsbereich

n = Anzahl der Betrachtungsbereiche

Der Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI) aggregiert die vier Einzelindizes SFMI, SCMI, PLCMI und NBMI zu einem Gesamtindex. Er wird in Prozent angegeben und berechnet sich aus dem Mittelwert der vier Einzelindizes:

$$OI4MI = \frac{SFMI + SCMI + PLCMI + NBMI}{4}$$

OI4MI = Overall Industry 4.0 Maturity Index

SFMI = Smart Factory Maturity Index

SCMI = Smart Supply Chain Maturity Index

PLCMI = Smart Product & Life Cycle Maturity Index

NBMI = New Business Maturity Index

Aggregation der Prioritäten

Die je Bewertungskriterium erfassten Prioritäten werden nach dem gleichen Prinzip zu Prioritäten je Betrachtungsbereich, Prioritäten je Handlungsfeld (SFMI, SCMI, PLCMI, NBMI) und einer Gesamtpriorität aggregiert. Die Darstellung erfolgt jedoch dezimal und nicht in Prozent (vgl. Abbildung 4.2).

4.2. Der Smart Factory Maturity Index (SFMI)

Der Smart Factory Maturity Index (SFMI) ist ein Maß für die Industrie 4.0 Reife der Smart Factory. Auf Basis des Smart Factory Modells (vgl. Abbildung 2.22), der detaillierten Ausführungen zur Smart Factory in Abschnitt 2.2.3 sowie der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Anforderungen wurden die in Tabelle 4.2 dargestellten acht Betrachtungsbereiche und 38 Bewertungskriterien des Smart Factory Maturity Index (SFMI) als Gliederung für die Reifegradbewertung der Smart Factory definiert.

Smart Factory Maturity Index (SFMI)	
Betrachtungsbereiche	Bewertungskriterien
Unternehmen	<ul style="list-style-type: none"> • Smart Factory Strategie • Wissens- und Kompetenzmanagement • Change Management • Unternehmens- und Führungskultur

	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgabenspektrum der Beschäftigten in den indirekten Bereichen • IT-Landschaft in der Auftragsabwicklung • Horizontale und vertikale Integration der IT-Systeme • Kommunikation • Big Data Analyse
Entwicklung	<ul style="list-style-type: none"> • Qualifikation der Beschäftigten • IT-Landschaft in der Entwicklung • Integration der IT in der Entwicklung • Assistenz für die Konstruktion • Assistenz für die Fertigungsplanung • Assistenz für die Arbeitsvorbereitung
Produktion	<ul style="list-style-type: none"> • Qualifikation der Beschäftigten • Maschinen und Anlagen • Intelligente Sensoren und Aktoren • Roboter • Produktionsprozess • Assistenz bei Datenerfassung und -analyse • Kognitive Assistenz • Physische Assistenz durch Roboter • Aufgabenspektrum der Beschäftigten auf der operativen Ebene
Produktionsplanung und -steuerung	<ul style="list-style-type: none"> • Qualifikation der Beschäftigten • Steuerungsprinzip • Assistenz für die Produktionsplanung und -steuerung
Intralogistik	<ul style="list-style-type: none"> • Qualifikation der Beschäftigten • Intralogistik (Technik) • Materialversorgungsprinzip • Assistenz für die Intralogistik (Kommissionierung) • Assistenz für die Intralogistik (Materialtransport)
Instandhaltungsmanagement	<ul style="list-style-type: none"> • Qualifikation der Beschäftigten • Instandhaltungsprinzip • Assistenz für die Instandhaltung
Werkzeugmanagement	<ul style="list-style-type: none"> • Qualifikation der Beschäftigten • Assistenz für das Werkzeugmanagement
Qualitätsmanagement	<ul style="list-style-type: none"> • Qualifikation der Beschäftigten • Assistenz für das Qualitätsmanagement

Tabelle 4.2 Smart Factory Maturity Index (SFMI) - Betrachtungsbereiche und Bewertungskriterien

In den folgenden Abschnitten werden die jeweiligen Bewertungskriterien und Reifegradmerkmale zu jedem dieser Betrachtungsbereiche näher beschrieben. Die Bewertungskriterien und Reifegradmerkmale wurden im Wesentlichen aus den Ausführungen zur Smart Factory in Abschnitt 2.2.3 sowie aus den Ausführungen zur Ausgangssituation der Unternehmen in Abschnitt 2.1 abgeleitet.

4.2.1. Unternehmen

Der Betrachtungsbereich *Unternehmen* dient dazu, den Reifegrad wichtiger Rahmenbedingungen auf dem Weg zu Industrie 4.0 zu bewerten. Dies erfolgt anhand der folgenden Bewertungskriterien:

1. Smart Factory Strategie
2. Wissens- und Kompetenzmanagement
3. Change Management
4. Unternehmens- und Führungskultur
5. Aufgabenspektrum der Beschäftigten in den indirekten Bereichen
6. IT-Landschaft in der Auftragsabwicklung
7. Horizontale und vertikale Integration der IT-Systeme
8. Kommunikation
9. Big Data Analyse

Smart Factory Strategie

Das Vorhandensein einer Smart Factory Strategie gehört zu den wesentlichen Erfolgsfaktoren bei der Umsetzung von Transformationsschritten in Richtung Industrie 4.0 (vgl. Abschnitt 2.2.3.12). Tabelle 4.3 zeigt die entsprechenden Reifegradmerkmale. Als Ausgangsbasis wird das Fehlen einer Smart Factory Strategie gesehen. Auf den Reifegradstufen 1 und 2 gibt es bereits erste Industrie 4.0 Aktivitäten im Unternehmen. Auf Reifegradstufe 3 liegt eine klar dokumentierte Smart Factory Strategie vor. Weitere Stufen der Reife sind die Überwachung der Umsetzung der Strategie (Reifegradstufe 4) sowie die kontinuierliche Weiterentwicklung und Anpassung der Strategie (Reifegradstufe 5).

Smart Factory Strategie (MTO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es gibt noch keine Digitalisierungsstrategie.	Es gibt noch keine Strategie, jedoch erste Digitalisierungsprojekte ("Use Cases") in Pilotbereichen.	Es gibt in einzelnen Abteilungen eine Digitalisierungsstrategie, die lokal umgesetzt wird.	Es gibt eine klar dokumentierte Digitalisierungsstrategie für das gesamte Unternehmen, die in der Unternehmensstrategie verankert ist.	Die Umsetzung der unternehmensweiten Digitalisierungsstrategie wird durch ein Management Team überwacht.	Die Smart Factory Strategie wird kontinuierlich weiterentwickelt und an sich verändernde Rahmenbedingungen angepasst.

Tabelle 4.3 Reifegradmerkmale Smart Factory Strategie

Wissens- und Kompetenzmanagement

Um das Wissen in der Smart Factory verfügbar zu machen und um die Kompetenzen der Beschäftigten systematisch weiterentwickeln zu können, bedarf es eines Wissens- und Kompetenzmanagements (vgl. Abschnitte 2.2.3.9 und 2.2.3.12). Die Reifegradmerkmale in Tabelle 4.4 beschreiben die zunehmende Personalisierung des Wissens- und Kompetenzmanagements im Unternehmen. Die Reifegradstufe 0 geht davon aus, dass es kein Wissens- und Kompetenzmanagement im Unternehmen gibt. Auf Reifegradstufe 1 existieren Kompetenzprofile für verschiedene Stellen und schaffen damit eine erste Transparenz. Auf Reifegradstufe 2 werden Qualifizierungsmaßnahmen „on-the-job“ ermöglicht. Ab Reifegradstufe 3 sind personenbezogene Kompetenzprofile verfügbar sowie ein System zur Analyse, Digitalisierung, Verknüpfung, Verteilung und Visualisierung des vorhandenen Wissens. Eine weitere Steigerung ergibt sich auf Reifegradstufe 4 durch den kontinuierlichen Abgleich der Kompetenzprofile mit aktuellen und künftigen Kompetenzbedarfen. Auf Reifegradstufe 5 existiert ein autonomes Wissens- und Kompetenzmanagementsystem.

Wissens- und Kompetenzmanagement (MTO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es gibt kein System für systematisches Wissens- und Kompetenzmanagement.	Für die verschiedenen Stellen im Unternehmen wurden Kompetenzprofile erstellt, in denen die für die Stelle erforderlichen Fach- und Methodenkompetenzen, personale Kompetenzen und sozial-kommunikative Kompetenzen beschrieben sind.	Lernförderliche Arbeitsplätze ermöglichen die Qualifizierung der Beschäftigten "on-the-job".	Personenbezogene Kompetenzprofile sind vorhanden. Es ist ein System zur Analyse, Digitalisierung, Verknüpfung, Verteilung und Visualisierung des vorhandenen Wissens etabliert.	Die jeweiligen Kompetenzprofile der Beschäftigten werden kontinuierlich mit künftigen Bedarfen abgeglichen und gegebenenfalls Qualifizierungsmaßnahmen gestartet.	Es existiert ein autonomes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement, das die jeweiligen Kompetenzprofile der Beschäftigten kontinuierlich mit künftigen Bedarfen abgleicht und gegebenenfalls Qualifizierungsmaßnahmen startet.

Tabelle 4.4 Reifegradmerkmale Wissens- und Kompetenzmanagement

Change Management

Neben der Smart Factory Strategie und einem geeigneten Wissens- und Kompetenzmanagement gehört auch ein begleitendes Change Management zu den wesentlichen Erfolgsfaktoren

im Transformationsprozess (vgl. Abschnitt 2.2.3.9). Die in Tabelle 4.5 dargestellten Reifegradmerkmale wurden in Anlehnung an die acht Erfolgsfaktoren nach Kotter (Kotter, 1995, S. 61) entwickelt. Auf Reifegrad 1 startet das Change Management mit der Vermittlung der Dringlichkeit der Veränderungen an die Beschäftigten. Auf Reifegradstufe 2 wurde ein Führungsteam etabliert und eine Smart Factory Vision und Strategie entwickelt. Auf Reifegradstufe 3 wurde die Strategie an die Beschäftigten kommuniziert (vgl. auch Bewertungskriterium Smart Factory Strategie auf Reifegradstufe 3), sie wurden (durch Qualifizierungsmaßnahmen) befähigt, Veränderungen zu gestalten und es wurden erste Erfolge geschaffen. Auf Reifegradstufe 4 wurden weitere Veränderungen eingeleitet. Der höchste Grad der Reife ist erreicht, wenn die kontinuierliche Weiterentwicklung der Smart Factory zur Unternehmenskultur geworden ist.

Change Management (MO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Bisher wurde noch keine Aktivitäten gestartet.	Den Beschäftigten wurde ein Gefühl der Dringlichkeit vermittelt.	Eine Führungskoalition wurde aufgebaut und eine Smart Factory Vision und Strategie entwickelt.	Die Veränderungsvision wurde an die Beschäftigten kommuniziert. Die Beschäftigten werden auf breiter Basis befähigt, die Veränderungen zu gestalten. Schnelle Erfolge werden geschaffen.	Die erzielten Erfolge werden konsolidiert und weitere Veränderungen eingeleitet.	Die kontinuierliche Weiterentwicklung zur Smart Factory ist zur Unternehmenskultur geworden.

Tabelle 4.5 Reifegradmerkmale Change Management

Unternehmens- und Führungskultur

Das Fehlen einer geeigneten Unternehmens- und Führungskultur ist einer der am häufigsten genannten Hindernisgründe für Industrie 4.0 (vgl. Tabelle 1.3). Dies trifft aufgrund ihrer meist zentralen Entscheidungsstrukturen insbesondere auf KMU und Mittelstand zu (vgl. Abschnitt 2.1.5). Die in Tabelle 4.6 dargestellten Reifegradmerkmale beschreiben daher den Weg von der klaren Zieldefinition, jedoch mit zentralen Entscheidungsprozessen (Reifegradstufe 1) über die Verlagerung von Entscheidungen in die Abteilungen (Reifegradstufe 2) bis hin zur vollkommenen Dezentralisierung von Entscheidungen mit der Führungskraft als Coach (Reifegradstufe 3). Auf Reifegradstufe 4 erhalten die Beschäftigten zudem große Handlungsspielräume und Entscheidungsbefugnisse. Die Reifegradstufe 5 beschreibt eine Kultur der kontinuierlichen Verbesserung und Veränderung (vgl. Change Management).

Unternehmens- und Führungskultur (MO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Die Ziele des Unternehmens sind nicht klar definiert.	Die Ziele des Unternehmens sind klar definiert. Entscheidungen werden zentral getroffen.	Entscheidungen werden dezentral in den Abteilungen getroffen.	Entscheidungen werden durch die Beschäftigten auf Basis der verfügbaren Informationen getroffen. Die Führungskraft als Coach.	Die Beschäftigten verfügen über große Handlungsspielräume und Entscheidungsbefugnisse. Sie haben eine große Veränderungsbereitschaft ("Unternehmer im Unternehmen").	Im Unternehmen herrscht eine Kultur der kontinuierlichen Verbesserung und Veränderung.

Tabelle 4.6 Reifegradmerkmale Unternehmens- und Führungskultur

Aufgabenspektrum der Beschäftigten in den indirekten Bereichen

Die Digitalisierung ermöglicht eine Dezentralisierung in der Organisation, so dass sich auch die Aufgaben der Beschäftigten in den indirekten Bereichen ändern werden (vgl. Abschnitt 2.2.3.8). Die in Tabelle 4.7 dargestellten Reifegradmerkmale basieren auf den in Abschnitt 2.2.3.8 zusammengefassten Ausführungen von (Hirsch-Kreinsen, 2015, S. 92f.). Während die Beschäftigten in den indirekten Bereichen auf Reifegradstufe 0 noch ihren bisherigen Tätigkeiten nachgehen, reduzieren sich Teile davon (z.B. die Erfassung von Rückmeldescheinen aus der Produktion) bereits auf Reifegradstufe 1 durch den Einsatz von Systemen zur Datenerfassung. Mit den erweiterten IT-Funktionalitäten auf Reifegradstufe 2 reduzieren sich die bisherigen Aufgaben weiter, es kommen jedoch neue Aufgaben im Bereich des „trouble shouting“ hinzu. Mit der Dezentralisierung von Aufgaben im Bereich Planung und Steuerung reduziert sich auch dieser Bereich des bisherigen Aufgabenspektrums. Der Schwerpunkt liegt nun auf der Überwachung und Koordination des vernetzten Systems. Auf Reifegradstufe 4 wird von einer vollständigen Verlagerung der Aufgaben im Bereich Planung und Steuerung auf die operative Ebene ausgegangen. Auf Reifegradstufe 5 beschränkt sich das Aufgabenspektrum auf die Festlegung, Überwachung und Umsetzung von Smart Factory Strategien. Der Mensch wird zum „Dirigenten der Wertschöpfung“ (BITKOM e.V., et al., 2015, S. 48).

Aufgabenspektrum der Beschäftigten in den indirekten Bereichen (MO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Das Aufgabenspektrum besteht aus Planungs- und Steuerungsaufgaben sowie sonstigen organisatorischen Tätigkeiten.	Teile der Aufgaben der indirekten Bereiche sind durch die Digitalisierung vereinfacht (z.B. Datenerfassung und -auswertung).	Teile der Aufgaben der indirekten Bereiche sind durch die Digitalisierung abgelöst. Teilweise neue Aufgaben, wie z.B. das "trouble shooting", das zudem interdisziplinäres Wissen erfordert.	Aufgaben im Bereich Planung und -steuerung sind dezentralisiert. Überwachung und Koordination des vernetzten Systems.	Aufgaben im Bereich Planung und -steuerung sind auf die operative Ebene verlagert. Überwachung und Koordination des vernetzten Systems.	Rolle als "Dirigenten der Wertschöpfung". Festlegung, Überwachung und Umsetzung von Smart Factory Strategien.

Tabelle 4.7 Reifegradmerkmale Aufgabenspektrum in den indirekten Bereichen

IT-Landschaft in der Auftragsabwicklung

Dieses Bewertungskriterium beschreibt die IT-Landschaft, die für die Auftragsabwicklung im Unternehmen eingesetzt wird. Nicht dazu gehören die Systeme der Entwicklung, die in Abschnitt 4.2.2 beschrieben werden. Die Marktstudie zur Nutzung von Industrie 4.0 Modellen ergab, dass erst 51 Prozent der befragten Unternehmen ein Manufacturing Execution System (MES) zur Datenerfassung in der Produktion einsetzen. Daher wird auf Reifegradstufe 0 davon ausgegangen, dass neben dem ERP-System noch kein weiteres IT-System für die Produktion vorhanden ist. Auf Reifegradstufe 1 sind erste Funktionalitäten, wie Betriebsdatenerfassung (BDE) zur Erfassung von Mengen und Zeiten, Maschinendatenerfassung (MDE) zur Erfassung von Maschinentakten und -status sowie ein Computer Aided Quality (CAQ) System zur Erfassung von Qualitätsdaten vorhanden. Während es sich bei den Systemen auf Reifegradstufe 1 häufig um Insellösungen handelt, wird auf Reifegradstufe 2 ein voll integriertes MES mit Funktionalitäten für alle produktionsnahen Bereiche (vgl. Abschnitte 2.1.3 und 2.2.2.3) eingesetzt. Eine weitere Steigerung der Reife ergibt sich auf Reifegradstufe 3 durch eine auf cyber-physischen Systemen basierenden serviceorientierten Architektur (vgl. Abschnitte 2.2.2.4 und 2.2.2.5). Die Reifegradstufe 4 sieht eine Standardisierung der Industrie 4.0 Komponenten vor (z.B. über die in Abschnitt 2.2.2.8 dargestellte Verwaltungsschale) sowie die Fähigkeit zur Prognose. Auf Reifegradstufe 5 unterstützen die Systeme die Selbststeuerung und Autonomie in der Auftragsabwicklung.

IT-Landschaft in der Auftragsabwicklung (T)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es gibt neben dem ERP-System keine speziellen IT-Systeme in der Produktion.	Betriebsdatenerfassung (BDE) und Maschinendatenerfassung (MDE) oder Manufacturing Execution System (MES) zur Datenerfassung und -auswertung. CAQ-System (Insellösung) zur Prüfplanung und Erfassung von Qualitätsdaten.	Integriertes Manufacturing Execution System (MES) für Feinplanung, Materialmanagement, Betriebsmittelmanagement, Qualitätsmanagement, Personalmanagement, Energiemanagement.	Serviceorientierte Architektur mit dezentraler Datenerfassung und Verarbeitung durch Cyber-Physische Systeme, Gateways und Edge-Bausteine. IoT-Plattform zur Vernetzung und Bereitstellung der Daten.	(Cloudbasierte) Webservices und Anwendungen (Apps). Fähigkeit zur Prognose. Einsatz standardisierter Industrie 4.0 Komponenten (Verwaltungsschale).	(Cloudbasierte) Webservices und Anwendungen (Apps). Fähigkeit zur Selbststeuerung und Autonomie. Einsatz standardisierter Industrie 4.0 Komponenten (Verwaltungsschale).

Tabelle 4.8 Reifegradmerkmale IT-Landschaft in der Auftragsabwicklung

Horizontale und vertikale Integration der IT-Systeme

Die horizontale und vertikale Integration der IT-Systeme ist ein wesentliches Ziel von Industrie 4.0 (vgl. Abschnitte 1.1 und 2.2.3.1). Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) sieht dabei eine Integration der Systeme aus „Life-Cycle“ und „Value Stream“ vor (vgl. Abschnitt 2.2.2.1). Dazu gehören die Systeme der digitalen Produktion („CAD-CAM-Kette“), die Systeme des digitalen Fabrikbetriebs (ERP, MES) sowie unterstützende Systeme für Managementaufgaben und Product Life Cycle Management (vgl. Abschnitt 2.2.3.1). Die in Tabelle 4.9 dargestellten Reifegradmerkmale beschreiben auf Reifegradstufe 0, dass nur ein ERP-System im Einsatz ist. Auf Reifegradstufe 1 besteht eine vertikale Integration der Systeme von Shopfloor über das MES bis zum ERP-System und damit die papierarme Fertigung. Auf Reifegradstufe sind – insbesondere durch das auf diese Reifegradstufe üblicherweise eingesetzte MES – die meisten Systeme in der Auftragsabwicklung vertikal und horizontal integriert. Auf Reifegradstufe 3 ist die vollständige Integration der Systeme der Entwicklung und der Auftragsabwicklung erfolgt (CAD-CAM-NC-MES, ERP-PLM-MES). Die Reifegradstufe 4 beschreibt eine teilweise Integration von Daten in der Supply Chain aus, Reifegradstufe 5 sieht die vollständige Integration in die Supply Chain und den Datenaustausch mit Kunden und Wertschöpfungspartnern vor.

Horizontale und vertikale Integration der IT-Systeme (TO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es gibt neben dem ERP-System keine speziellen IT-Systeme.	Vertikale Integration zwischen Shopfloor und ERP-System.	Vertikale und horizontale Integration der bestehenden Systeme in der Auftragsabwicklung.	Vollständige horizontale und vertikale Integration der Systeme in der Auftragsabwicklung und in der Entwicklung (z.B. CAD-CAM-NC-MES, ERP-PLM-MES).	Teilweise Integration in der Supply Chain und Datenaustausch mit Kunden und Wertschöpfungspartnern.	Vollständige Integration in der Supply Chain und Datenaustausch mit Kunden und Wertschöpfungspartnern.

Tabelle 4.9 Reifegradmerkmale Horizontale und vertikale Integration der IT-Systeme

Kommunikation

Durch das Reifegradkriterium Kommunikation mit der Dimension Technik-Organisation (TO) wird bewertet, inwieweit neue Techniken, wie Social Media, zur interdisziplinären Kommunikation und Kooperation genutzt werden (vgl. Tabelle 4.1). Tabelle 4.10 beschreibt die Reifegradmerkmale der Kommunikation, beginnend auf Reifegradstufe 0 auf der die Kommunikation nur per Telefon, Email und Meetings erfolgt. Auf Reiferadstufe 1 werden in einzelnen Bereichen Social Media Funktionen zum Chat zwischen den Beschäftigten genutzt. Auf Reifegradstufe 2 werden Social Media Funktionen genutzt, um an die Beschäftigten wichtige kontextsensitive Informationen zu „posten“ (vgl. Abschnitt 2.2.2.9). Auf Reifegradstufe 3 werden Social Media Funktionen umfassend zum interdisziplinären Informationsaustausch und Funktionalitäten, wie Schicht-Doodle, zur autonomen Schichtplanung genutzt. Auf Reifegradstufe 4 werden Social Media Funktionen auch teilweise zur Kommunikation mit Kunden und Wertschöpfungspartnern genutzt. Auf Reifegradstufe 5 sind Social Media Funktionen zur Kommunikation auch mit Kunden und Wertschöpfungspartnern fest etabliert, z.B. auch über entsprechende Funktionalitäten von Plattformen (vgl. Abschnitt 2.2.6.3).

Kommunikation (TO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Die Kommunikation erfolgt über Telefon, Email und Meetings.	In einzelnen Bereichen werden Social Media Funktionen zum Chat zwischen den Beschäftigten eingesetzt.	Social Media Funktionen werden genutzt, um hilfreiche, kontextsensitive Informationen, wie Maschinenstatus, Instandhaltungshinweise, Auftragsänderungen, Handlungsempfehlungen, etc. an die Menschen zu "posten".	Social Media Funktionen werden umfassend zum interdisziplinären Informationsaustausch, zur Problemlösung sowie zur autonomen Abstimmung (z.B. Schicht-Doodle) eingesetzt.	Social Media Funktionen werden teilweise auch in der Kommunikation mit Kunden und Wertschöpfungspartnern eingesetzt.	Social Media Funktionen werden in der Kommunikation mit Kunden und Wertschöpfungspartnern eingesetzt.

Tabelle 4.10 Reifegradmerkmale Kommunikation

Big Data Analyse

Die Fähigkeit, die erfassten Daten auch gewinnbringend analysieren zu können, ist eine wichtige Anforderung an die Unternehmen (vgl. Abschnitt 2.2.3.10). Tabelle 4.11 beschreibt die Merkmale einer zunehmenden Reife in Anlehnung an die Ausführungen in Abschnitt 2.2.3.10. Als Ausgangsbasis wird die manuelle Auswertung von Daten mit bestehender Office Software (z.B. Excel) gesehen. Auf Reifegradstufe 1 finden deskriptive Analyse in einzelnen Systemen statt (z.B. Maschinendatenerfassung). Auf Reifegradstufe 2 finden zusätzlich in einzelnen Systemen diagnostische Analysen statt, z.B. bzgl. des Zustands von Maschinen. Auf Reifegradstufe 3 sind die IT-Systeme bereits integriert (vgl. Reifegradmerkmale Horizontale und vertikale Integration der IT-Systeme), so dass auch systemübergreifende Analysen stattfinden. Auf Reifegradstufe 4 kommt die Fähigkeit zu prädiktiven Analysen hinzu. Präskriptive Analysen sind auf Reifegradstufe 5 möglich.

Big Data Analyse (MT)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Manuelle Datenanalyse (z.B. mit Office Software).	Deskriptive Analysen in einzelnen Systemen.	Deskriptive und diagnostische Analysen in einzelnen Systemen.	Deskriptive und diagnostische systemübergreifende Analysen.	Deskriptive, diagnostische, und prädiktive Analysen (überwiegend systemübergreifend).	Deskriptive, diagnostische, prädiktive und präskriptive Analysen (überwiegend systemübergreifend).

Tabelle 4.11 Reifegradmerkmale Big Data Analyse

4.2.2. Entwicklung

Der Betrachtungsbereich *Entwicklung* dient dazu, den Reifegrad der Entwicklungsabteilung zu bewerten. Dies erfolgt anhand der folgenden, aus dem Modell der Smart Factory (vgl. Abbildung 2.22) abgeleiteten Bewertungskriterien:

1. Qualifikation der Beschäftigten in der Entwicklung
2. IT-Landschaft in der Entwicklung
3. Integration der IT in der Entwicklung
4. Assistenz für die Konstruktion
5. Assistenz für die Fertigungsplanung
6. Assistenz für die Arbeitsvorbereitung

Qualifikation der Beschäftigten in der Entwicklung

Die Bedeutung der Mitarbeiterqualifizierung sowie des Wissens- und Kompetenzmanagements wurden ausführlich in Abschnitt 2.2.3.9 dargestellt. Demnach benötigen die Beschäftigten zur aktiven Begleitung des Transformationsprozesses insbesondere Fach- und Methodenkompetenzen mit einem breiten interdisziplinären Fachwissen, personale Kompetenzen hinsichtlich Eigenverantwortung und ganzheitlichem Denken sowie sozial-kommunikative Kompetenzen hinsichtlich ihrer Kommunikationsfähigkeit, der Kooperation in interdisziplinären Teams und ihrer Anpassungsfähigkeit (vgl. Tabelle 2.7). Tabelle 4.12 zeigt die Reifegradmerkmale einer zunehmenden Qualifikation der Beschäftigten. Spezielle für das Tagesgeschäft in der Entwicklung erforderlichen Qualifikationen werden bei den Reifegradmerkmalen nicht berücksichtigt. Die Reifegradstufe 0 geht davon aus, dass die Beschäftigten noch kein spezifisches Fachwissen in den Bereichen Prozessoptimierung und Industrie 4.0 haben. Auf Reifegradstufe 1 verfügen

sie über Fach- und Methodenkompetenzen in der Prozessoptimierung, es gibt noch keine Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten. Auf Reifegradstufe 2 verfügen die Beschäftigten bereits über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen. Auf Reifegradstufe 3 verfügen sie zusätzlich über die geforderten personalen und sozial-kommunikativen Kompetenzen. Die Reifegradstufe 4 geht von einer kontinuierlichen Weiterbildung der Beschäftigten und einem laufenden Abgleich der Kompetenzprofile der Beschäftigten mit künftigen Bedarfen aus. Auf Reifegradstufe 5 ist das in Abschnitt 4.2.1 beschriebene autonome, beschäftigtenbezogene Wissens- und Kompetenzmanagement im Unternehmen etabliert.

Qualifikation der Beschäftigten (M)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen in den Bereichen Prozessoptimierung und Industrie 4.0	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen in der Prozessoptimierung. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen, ganzheitliches Denken und sozial-kommunikative Kompetenzen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein autonomes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.

Tabelle 4.12 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten in der Entwicklung

IT-Landschaft in der Entwicklung

Je nach Reifegrad werden in der Entwicklung die verschiedensten IT-Systeme eingesetzt. Dazu gehören CAx Systeme (vgl. Abschnitt 2.2.3), digitale Fabrikmodelle, Digital Mock-Ups (vgl. Abschnitt 2.2.5.2) und Virtual Reality (VR) Lösungen (vgl. Abschnitt 2.2.2.9). Tabelle 4.13 beschreibt die zunehmende Reife der IT-Landschaft. Auf Reifegradstufe 0 wird davon ausgegangen, dass das Unternehmen über keine speziellen IT-Systeme in der Entwicklung verfügt. Auf Reifegradstufe 1 werden ein CAD System (2D bzw. 3D) zur Konstruktion von Bauteilen eingesetzt sowie ein CAM-System zur Erzeugung von NC-Daten für die Produktion. Auf Reifegradstufe 2 wird zusätzlich CAPP Software zur Planung von Prozessen eingesetzt. CAD Konstruktionen werden in 3 D angefertigt, um die Voraussetzungen für digitale Zwillinge (Digital Mock-Up) und eine CAM-Kopplung zu schaffen. Auf Reifegradstufe 3 werden Digital Mock-Ups (digitale Zwillinge der Produkte) eingesetzt sowie Software zur digitalen Layoutplanung, digitale Fabrikmodelle und Virtual Reality (VR). Auf Reifegradstufe 4 ist die Entwicklung in

der Lage, Simulationen und Prognosen durchzuführen. Auf Reifegradstufe 5 ist die IT in der Lage zur autonomen Optimierung von Entwicklungsparametern.

IT-Landschaft in der Entwicklung (T)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es gibt keine speziellen IT-Systeme in der Entwicklung.	2D/3D Computer Aided Design (CAD) und Computer Aided Manufacturing (CAM).	3D Computer Aided Design (CAD) und Computer Aided Manufacturing (CAM), Computer Aided Process Planning (CAPP).	IT für Layoutplanung, digitale Fabrikmodelle, Virtual Reality (VR), Digital Mock-Ups (DMU).	IT zur Simulation (Materialfluss, Ergonomie, Roboter und NC) und Fähigkeit zur Prognose.	IT zur autonomen Optimierung von Entwicklungsdaten.

Tabelle 4.13 Reifegradmerkmale IT-Landschaft in der Entwicklung

Integration der IT in der Entwicklung

Mit diesem Kriterium wird bewertet, wie gut die IT-Systeme der Entwicklung miteinander vernetzt sind. Zentrale Themen sind dabei die Vernetzung der Prozesse der digitalen Fabrik („CAD-CAM-NC-Kette“) von der Produktentwicklung im CAD-Programm bis zum einsatzbereiten NC-Programm sowie die Vernetzung von ERP-System, PLM-System und MES zu einer durchgängigen Lösung (vgl. Abschnitt 2.2.3.1). Die in Tabelle 4.14 beschriebenen Reifegradmerkmale gehen auf Reifegradstufe 1 davon aus, dass es in der Entwicklung keine zu integrierenden Systeme gibt. Auf der Reifegradstufe 1 sind die vorhandenen Systeme (z.B. CAD und CAM) noch nicht miteinander vernetzt. Auf Reifegradstufe 2 sind CAD und CAM über die 3D Modelle miteinander gekoppelt, so dass direkt aus dem 3D Modell heraus NC-Daten erzeugt werden können. Auf Reifegradstufe 3 ist die „CAD-CAM-NC-Kette“ vollständig integriert, d.h. die im CAM-System erzeugten NC-Programme werden digital in die NC-Verwaltung bzw. Maschinensteuerungen übertragen. Auf Reifegradstufe 4 wird Integration teilweise auf den Datenaustausch mit Kunden und Wertschöpfungspartnern erweitert. Auf Reifegradstufe 5 ist die vollständige Integration von Kunden und Wertschöpfungspartnern erfolgt, so dass Entwicklungsdaten mit diesen rein digital ausgetauscht werden.

Integration der IT in der Entwicklung (TO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es gibt keine speziellen IT-Systeme in der Entwicklung.	Bei den vorhandenen Systemen handelt es sich um nicht vernetzte Insellösungen.	CAD und CAM sind gekoppelt.	CAD-CAM-NC Kopplung und bereichsübergreifende Integration (ERP, MES, CAQ, PLM).	Teilweise Integration in der Supply Chain und Datenaustausch mit Kunden und Wertschöpfungspartnern.	Vollständige Integration in der Supply Chain und Datenaustausch mit Kunden und Wertschöpfungspartnern.

Tabelle 4.14 Reifegradmerkmale Integration der IT in der Entwicklung

Assistenz für die Konstruktion

Mit diesem Bewertungskriterium wird geprüft, inwieweit die Beschäftigten in der Konstruktion durch IT-Systeme unterstützt werden. Tabelle 4.15 beschreibt die entsprechenden Reifegradmerkmale der Assistenz für die Konstruktion. Auf Reifegradstufe 0 wird davon ausgegangen, dass die Konstruktion über keine speziellen Systeme verfügt. Auf Reifegradstufe 1 nutzt die Konstruktion ein CAD System (vgl. Abschnitt 2.2.3), welches auf Reifegradstufe 2 in der Lage ist, 3D Modelle zu erzeugen. Auf Reifegradstufe 3 sind weitere für die Konstruktion wichtigen Daten aus ERP, MES, CAQ und PLM-System digital verfügbar. Zusätzlich wird ein digitales Modell des Produkts (Digital-Mock-Up, vgl. Abschnitt 2.2.5.2) eingesetzt. Auf Reifegradstufe 4 stehen den Beschäftigten Funktionalitäten zur Simulation und Prognose zur Verfügung. Auf Reifegradstufe 5 werden Entwicklungsparameter durch ein autonomes System optimiert.

Assistenz für die Konstruktion (MT)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Manuelle Konstruktion (z.B. mit Office Software).	Einsatz von Computer Aided Design (CAD).	Einsatz von 3D Modellen.	Verfügbarkeit weiterer Daten aus ERP, MES, CAQ, PLM, etc. Einsatz eines digitalen Modells des Produkts (Digital Mock-Up).	Einsatz von Simulationen und Prognosen sowie weitere Daten aus ERP, MES, CAQ, PLM, etc.	Autonome Optimierung von Entwicklungsdaten.

Tabelle 4.15 Reifegradmerkmale Assistenz für die Konstruktion

Assistenz für die Fertigungsplanung

Nach der Konstruktion neuer Produkte ist die Fertigungsplanung zuständig für die Planung der entsprechenden Fertigungsprozesse (vgl. Abschnitt 2.2.3). Tabelle 4.16 zeigt die entsprechenden Reifegradmerkmale ausgehend von Reifegradstufe 0, auf der die Fertigungsplanung über keine spezielle Software zur Unterstützung verfügt. Auf Reifegradstufe 1 nutzt die Fertigungsplanung ein CAD System zur Layoutplanung. Auf Reifegradstufe 2 wird ein Computer Aided Process Planning (CAPP) System zur Planung der Fertigungsprozesse, Verfahren und Betriebsmittel eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.2.3). Auf Reifegradstufe 3 steht den Beschäftigten ein digitales Fabrikmodell (digitaler Zwilling der realen Fabrik) zur Verfügung sowie Assistenzfunktionen durch Virtual Reality (VR), so dass geplante Anlagen geprüft werden können, bevor sie gebaut werden (vgl. Abschnitt 2.2.2.9). Auf Reifegradstufe 4 stehen den Beschäftigten Funktionalitäten zur Simulation und Prognose zur Verfügung. Auf Reifegradstufe 5 werden Layouts und Prozesse durch ein autonomes System optimiert.

Assistenz für die Fertigungsplanung (MT)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Manuelle Fertigungsplanung (z.B. mit Office Software).	Einsatz von Computer Aided Design (CAD) bei der Layoutplanung.	Einsatz von Computer Aided Process Planning (CAPP) bei der Planung von Fertigungsprozessen, Verfahren und Betriebsmitteln.	Einsatz von Layoutplanungssoftware bei der Layoutplanung. Einsatz eines digitalen Fabrikmodells und Virtual Reality (VR).	Einsatz von Simulationen und Prognosen.	Autonome Optimierung von Layouts und Prozessen.

Tabelle 4.16 Reifegradmerkmale Assistenz für die Fertigungsplanung

Assistenz für die Arbeitsvorbereitung

Nach der Konstruktion neuer Produkte sowie der Planung der Fertigungsprozesse erstellt die Arbeitsvorbereitung die für die Produktion wichtigen Stammdaten, wie Arbeitspläne und Stücklisten und legt diese im ERP-System an. Die in Tabelle 4.17 dargestellten Reifegradmerkmale beginnen auf Reifegradstufe 0 mit einer manuellen Arbeitsvorbereitung im ERP-System. Auf Reifegradstufe 1 sind Zeichnungen digital verfügbar (statt Printversion). Auf Reifegradstufe 2 werden Stammdaten (Arbeitspläne, Stücklisten, etc.) und NC-Daten automatisiert generiert. Durch die Vernetzung der Systeme ist auf Reifegradstufe 0 die digitale Übertragung der Fertigungsunterlagen, wie Fertigungsauftrag, Arbeitsanweisungen, Zeichnungen, NC-Daten,

etc. an das MES bzw. direkt an die Arbeitsplätze und Maschinen möglich und erspart der Arbeitsvorbereitung den sonst üblichen Verteilungsaufwand. Auf Reifegradstufe 4 stehen den Beschäftigten Funktionalitäten zur Simulation und Prognose zur Verfügung. Auf Reifegradstufe 5 werden Stammdaten durch ein autonomes System optimiert.

Assistenz für die Arbeitsvorbereitung (MT)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Manuelle Arbeitsvorbereitung (z.B. im ERP-System).	Einsatz digitaler Zeichnungen.	Automatisierte Generierung von Stammdaten (Arbeitspläne, Stücklisten, etc.) und NC-Daten.	Automatisierte Stammdatenanlage im ERP-System und digitale Übertragung von Arbeitsanweisungen, Zeichnungen, NC-Daten, etc. an MES bzw. Maschinen.	Einsatz von Simulationen und Prognosen.	Autonome Optimierung von Stammdaten.

Tabelle 4.17 Reifegradmerkmale Assistenz für die Arbeitsvorbereitung

4.2.3. Produktion

Der Betrachtungsbereich *Produktion* dient dazu, den Reifegrad der Produktion mit ihren Beschäftigten, Betriebsmitteln, IT-Systemen und Prozessen zu bewerten. Dies erfolgt anhand der folgenden, aus den Abschnitten 2.2.2 und 2.2.3 abgeleiteten Bewertungskriterien:

1. Qualifikation der Beschäftigten
2. Maschinen und Anlagen
3. Intelligente Sensoren und Aktoren
4. Roboter
5. Produktionsprozess
6. Assistenz bei Datenerfassung und -analyse
7. Kognitive Assistenz
8. Physische Assistenz durch Roboter
9. Aufgabenspektrum der Beschäftigten auf der operativen Ebene

Qualifikation der Beschäftigten

Die in Tabelle 4.18 dargestellten Reifegradmerkmale einer zunehmenden interdisziplinären Qualifikation der Beschäftigten wurde bereits in Abschnitt 4.2.2 ausführlich vorgestellt. Die Qualifikation der Beschäftigten ist auch ein wichtiges Bewertungskriterium im Bereich Produktion.

Qualifikation der Beschäftigten (M)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen in den Bereichen Prozessoptimierung und Industrie 4.0.	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen in der Prozessoptimierung. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen, ganzheitliches Denken und sozial-kommunikative Kompetenzen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein automatisiertes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.

Tabelle 4.18 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten in der Produktion

Maschinen und Anlagen

Für die Vernetzung und den Datenaustausch zwischen Maschinen und Anlagen benötigen diese geeignete Schnittstellen und Kommunikationsstandards (vgl. Abschnitt 2.2.2.8). Tabelle 4.19 zeigt den zunehmenden Reifegrad von Maschinen und Anlagen. Auf Reifegradstufe 0 wird davon ausgegangen, dass die Maschinen und Anlagen noch keine Kommunikationsschnittstellen haben. Auf Reifegradstufe 1 verfügen sie über unidirektionale Schnittstellen zur Datenerfassung (z.B. Taktsignale). Auf Reifegradstufe 2 verfügen sie über bidirektionale Schnittstellen zur Datenerfassung und Steuerung (z.B. NC-Daten). Auf Reifegradstufe 3 verfügen die Maschinen und Anlagen über standardisierte Schnittstellen (z.B. OPC-UA) zur Maschine-zu-Maschine (M2M) Kommunikation untereinander (vgl. Abschnitt 2.2.2.8). Reifegradstufe 4 geht davon aus, dass alle Maschinen und Anlagen untereinander vernetzt sind und durch IT gesteuert werden können. Auf Reifegradstufe 5 erfolgt eine autonome Kommunikation und Steuerung der Maschinen und Anlagen.

Maschinen und Anlagen (T)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Maschinen und Anlagen haben keine Schnittstellen für die Kommunikation.	Maschinen und Anlagen bieten unidirektionale Schnittstellen zur Datenerfassung.	Maschinen und Anlagen bieten Schnittstellen zur Datenerfassung und Steuerung (bidirektional).	Maschinen und Anlagen bieten standardisierte Schnittstellen zur Kommunikation untereinander (M2M).	Maschinen und Anlagen sind untereinander vernetzt und können durch IT gesteuert werden.	Autonome Kommunikation und Steuerung der Maschinen und Anlagen.

Tabelle 4.19 Reifegradmerkmale Maschinen und Anlagen

Intelligente Sensoren und Aktoren

Mit Hilfe intelligenter, cyber-physischer Sensoren und Aktoren lassen sich Abläufe optimieren und autonom steuern (vgl. Abschnitt 2.2.2.5). Mit diesem Bewertungskriterium wird geprüft, inwieweit intelligente Sensoren und Aktoren bereits in der Produktion genutzt werden. Tabelle 4.20 zeigt den zunehmenden Reifegrad von Sensoren und Aktoren. Auf Reifegradstufe 0 wird davon ausgegangen, dass keine Sensoren und Aktoren in der Produktion eingesetzt werden. Auf Reifegradstufe 1 sind einzelne Sensoren und Aktoren an der Automatisierungstechnik der Maschinen und Anlagen angebunden, um Zustände zu erfassen und Abläufe zu steuern. Auf Reifegradstufe 2 erweitern Sensoren und Aktoren physische Systeme, wie Maschinen, Werkzeuge oder Fördermittel zu Embedded Systems mit einem erweiterten Funktionsumfang (vgl. Abschnitt 2.2.2.5 und Abbildung 2.17). Auf Reifegradstufe 3 kommunizieren und interagieren vernetzte, intelligente Sensoren und Aktoren als Cyber-Physische Systeme (CPS) mit der Umgebung. Auf Reifegradstufe 4 werden die intelligente, cyber-physische Sensoren und Aktoren zur Optimierung von Abläufen eingesetzt. Auf Reifegradstufe 5 kommunizieren und interagieren sie untereinander, um Abläufe autonom zu steuern.

Intelligente Sensoren und Aktoren (T)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es werden keine Sensoren und Aktoren eingesetzt.	Einzelne Sensoren und Aktoren sind an die Automatisierungstechnik angebunden.	Sensoren und Aktoren erweitern physische Systeme (Maschine, Werkzeug, Fördermittel, etc.) zu Embedded Systems.	Vernetzte, intelligente Sensoren und Aktoren kommunizieren und interagieren als Cyber-Physische Systeme mit der Umgebung.	Intelligente Sensoren und Aktoren kommunizieren untereinander, um Abläufe zu optimieren.	Intelligente Sensoren und Aktoren kommunizieren untereinander, um Abläufe autonom zu steuern.

Tabelle 4.20 Reifegradmerkmale Intelligente Sensoren und Aktoren

Roboter

Roboter zählen zu den physischen Assistenzsystemen des Menschen. Die Bandbreite reicht von Industrierobotern, die aus Sicherheitsgründen vom Menschen entfernt arbeiten bis hin zu kollaborativen Robotern, mit denen der Mensch Hand in Hand arbeitet (vgl. Abschnitt 2.2.2.9). Tabelle 4.21 zeigt die Merkmale der zunehmenden Reife des Robotereinsatzes in der Produktion. Während auf Reifegradstufe 0 keine Roboter vorhanden sind, gibt es auf Reifegradstufe 1 koexistierende Industrieroboter, die üblicherweise mechanisch oder optisch vom Menschen getrennt sind. Auf Reifegradstufe 2 sind miteinander kooperierende Roboter vorhanden, die zusammen Arbeitsvorgänge ausführen können. Auf Reifegradstufe 3 gibt es einzelne kollaborative Roboter (Cobots), die Hand in Hand mit dem Menschen zusammenarbeiten können. Auf Reifegradstufe 4 sind zahlreiche kollaborative Roboter vorhanden, die auf Reifegradstufe 5 in der Lage sind, autonom zu arbeiten.

Roboter (T)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Keine Roboter vorhanden.	Koexistierende Roboter vorhanden.	Kooperierende Roboter vorhanden.	Einzelne kollaborative Roboter (Cobots) vorhanden.	Zahlreiche kollaborative Roboter (Cobots) vorhanden.	Autonom arbeitende kollaborative Roboter (Cobots) vorhanden.

Tabelle 4.21 Reifegradmerkmale Roboter

Produktionsprozess

Mit diesem Bewertungskriterium wird der Reifegrad der Produktionsprozesse hinsichtlich der Organisation und Wertstromoptimierung (vgl. Abschnitte 2.1.2 und 2.1.4.1) sowie der geforderten Wandlungsfähigkeit (vgl. Abschnitt 2.1.4) bewertet. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Marktstudie zur Nutzung von Industrie 4.0 Modellen (vgl. Abschnitt 2.4.2) hatte ergeben, dass erst 55 Prozent der befragten Unternehmen bei der Gestaltung ihrer Produktionsprozesse Fließprinzipien anwenden. Selbstregelnde Prozesse (z.B. durch Kanban) wurden erst von 44 Prozent der Unternehmen umgesetzt. Die erfolgreiche Umsetzung von Lean Production Prinzipien wird jedoch als wichtige Voraussetzung für Industrie 4.0 gesehen. Deuse et al. (2015, S. 103) sehen strukturierte Wertströme mit standardisierten Prozessen und Strukturen als Grundlage für einen erfolgreichen Technologieeinsatz sowie für die dezentrale Selbstorganisation und Autonomie in der Produktion (vgl. Abschnitt 2.1.4.1). Tabelle 4.22 zeigt den zunehmenden Reifegrad von Produktionsprozessen. Auf Reifegradstufe 0 sind die Produktionsprozesse und der Materialfluss noch wenig organisiert. Die Produktion ist geprägt von hohen Verschwendungen (vgl. Abschnitt 2.1.2). Auf Reifegradstufe 1 ist die Produktion nach dem Werkstattprinzip organisiert, erste Lean Prinzipien sind umgesetzt. Auf Reifegradstufe 2 wurden Lean Prinzipien überwiegend umgesetzt, die Produktion erfolgt in flexiblen, segmentierten Einheiten. Auf Reifegradstufe 3 ist die Produktion wertstromoptimiert und erfolgt weitestgehend nach dem Fließprinzip. Auf Reifegradstufe 4 ist die wertstromoptimierte Produktion zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit modularisiert, d.h. in möglichst kleine, in sich abgeschlossene Funktionseinheiten aufgeteilt (vgl. Abschnitt 2.2.3.2). Auf Reifegradstufe 5 hat die modularisierte Produktion die Fähigkeit zur Umkonfiguration der Module sowie des gesamten Produktionssystems (vgl. Abschnitt 2.2.3.2).

Produktionsprozess (O)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Wenig organisierte Produktionsprozesse. Lean Prinzipien sind nicht umgesetzt.	Die Produktion erfolgt nach dem Werkstattprinzip. Erste Lean Prinzipien wurden umgesetzt.	Die Produktion erfolgt in flexiblen, segmentierten Einheiten. Lean Prinzipien sind überwiegend umgesetzt.	Die Produktion erfolgt wertstromoptimiert nach dem Fließprinzip.	Die wertstromoptimierte Produktion ist modularisiert.	Die modularisierte Produktion hat die Fähigkeit zur Umkonfiguration der Module sowie des gesamten modularen Produktionssystems.

Tabelle 4.22 Reifegradmerkmale Produktionsprozess

Assistenz bei Datenerfassung und -analyse

Mit diesem Bewertungskriterium wird geprüft, inwieweit die Beschäftigten in der Produktion bei der Datenerfassung und -analyse unterstützt werden. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Marktstudie zur Nutzung von Industrie 4.0 Modellen (vgl. Abschnitt 2.4.2) hatte ergeben, dass 67 Prozent der befragten Unternehmen über eine Datenerfassung in der Produktion verfügen, weitere 27 Prozent gaben an, größtenteils Daten zu erfassen. Es muss daher beim Reifegrad davon ausgegangen werden, dass die digitale Datenerfassung noch nicht in allen Unternehmen umgesetzt ist. Tabelle 4.23 zeigt die Reifegradmerkmale der Assistenz bei der Datenerfassung und -analyse, beginnend auf Reifegradstufe 0 mit einer manuellen, papiergestützten Datenerfassung (z.B. Rückmeldescheine). Auf Reifegradstufe 1 werden Mengen, Zeiten und Maschinenstatus automatisiert in Echtzeit erfasst und an das ERP-System zurückgemeldet. Auf Reifegradstufe 2 werden weitere Daten (z.B. Qualität, Chargen, etc.) automatisiert erfasst, zudem werden die Beschäftigten durch reaktive Funktionalitäten, wie z.B. Signalisierung von Auftragsfortschritt, Abweichungen, Störungen und Kennzahlen. Auf Reifegradstufe 3 werden alle relevanten Daten automatisiert erfasst, insbesondere auch Daten der auf Reifegradstufe 3 eingesetzten intelligenten Sensoren und sonstiger cyber-physischer Systeme (vgl. Abschnitt 2.2.2.5). Auf Reifegradstufe 4 werden die Beschäftigten in der Produktion durch Prognosen und Trends (Predictive Analytics) unterstützt (vgl. Abschnitt 2.2.3.10). Auf Reifegradstufe 5 erhalten sie zusätzlich autonome Handlungsempfehlungen (Prescriptive Analytics) zur Zielerreichung oder Problemvermeidung (vgl. Abschnitt 2.2.3.10).

Assistenz bei Datenerfassung und -analyse (MT)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Keine bzw. manuelle Datenerfassung auf Papier.	Automatisierte Erfassung von Mengen, Zeiten und Maschinenstatus in Echtzeit und automatisierte Rückmeldung der Daten an das ERP-System.	Reaktive Funktionalitäten zur Unterstützung der Beschäftigten, z.B. Signalisierung von Auftragsfortschritt, Abweichungen, Störungen, Kennzahlen. Automatisierte Erfassung weiterer Daten (Qualität, Chargen, etc.).	Automatisierte Erfassung und Analyse aller relevanten Daten aus der Produktion (Prozessdaten, Drehmomente, etc.).	Prognose von zu erwartenden Ereignissen oder Trends (Predictive Analytics).	Autonome Handlungsempfehlungen zur Zielerreichung oder Problemvermeidung (Prescriptive Analytics).

Tabelle 4.23 Reifegradmerkmale Assistenz bei Datenerfassung und -analyse

Kognitive Assistenz

Kognitive Assistenzsysteme können den Menschen bei der Wahrnehmung seiner Arbeitsaufgabe sowie bei der Entscheidung über eine Arbeitsaufgabe unterstützen (vgl. Abschnitt 2.2.2.9). Tabelle 2.23 zeigt die Reifegradmerkmale der in der Produktion einsetzbaren kognitiven Assistenzfunktionen. Auf Reifegradstufe 0 wird davon ausgegangen, dass kein Assistenzsystem im Einsatz ist. Auf Reifegradstufe 1 stehen den Beschäftigten die benötigten Fertigungsaufträge, Arbeitsanweisungen, Zeichnungen, etc. digital am Arbeitsplatz zur Verfügung. Auf Reifegradstufe 2 werden ihnen kontextsensitive Informationen bereitgestellt, z.B. Informationen zum aktuellen Arbeitsgang. Auf Reifegradstufe 3 erhalten die Beschäftigten nicht nur kontextsensitive Informationen, sondern zusätzlich auch Handlungsanweisungen durch mobile Geräte, Augmented Reality (AR), Pick-by-Light, Pick-by-Voice, etc. Auf Reifegradstufe 4 sind diese Informationen und Handlungsanweisungen nicht nur kontextsensitiv, sondern auch nutzersensitiv, z.B. entsprechend ihrer Erfahrung oder Qualifikation. Auf Reifegradstufe 5 werden die Beschäftigten durch ein autonomes, selbstlernendes System für die Bereitstellung nutzer- und kontextsensitiver Informationen unterstützt.

Kognitive Assistenz (MT)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Keine kognitiven Assistenzsysteme im Einsatz.	Digitale Bereitstellung der Fertigungsaufträge, Arbeitsanweisungen, Zeichnungen, etc. am Arbeitsplatz.	Digitale Bereitstellung kontextsensitiver Informationen am Arbeitsplatz.	Digitale Bereitstellung kontextsensitiver Informationen und Handlungsanweisungen über mobile Geräte, Augmented Reality oder Pick-by-Light bzw. Pick-by-Voice.	Digitale Bereitstellung nutzer- und kontextsensitiver Informationen und Handlungsanweisungen über mobile Geräte, Augmented Reality oder Pick-by-Light bzw. Pick-by-Voice.	Autonome, lernende Bereitstellung nutzer- und kontextsensitiver Informationen und Handlungsanweisungen.

Tabelle 4.24 Reifegradmerkmale Kognitive Assistenz

Physische Assistenz

Physische Assistenzsysteme, insbesondere Roboter, unterstützen den Menschen bei der Ausführung seiner Arbeitsaufgabe (vgl. Abschnitt 2.2.2.9). Tabelle 4.25 zeigt die Reifegradmerkmale der in der Produktion einsetzbaren physischen Assistenz. Auf Reifegradstufe 0 sind keine

Assistenzfunktionen vorhanden. Auf Reifegradstufe 1 werden koexistierende Roboter zur Ausführung schwerer oder monotoner Arbeit eingesetzt. Auf Reifegradstufe 2 werden kooperierende Roboter eingesetzt. Auf Reifegradstufe 3 werden an einzelnen Pilotarbeitsplätzen kollaborative Roboter (Cobots) eingesetzt. Auf Reifegradstufe 4 werden durchgängig Cobots eingesetzt. Auf Reifegradstufe 5 steuern sich diese autonom.

Physische Assistenz (MT)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Keine Roboter im Einsatz.	Einsatz koexistierender Roboter.	Einsatz kooperierender Roboter.	Einsatz kollaborativer Roboter (Cobots) an einzelnen Pilotarbeitsplätzen.	Durchgängiger Einsatz kollaborativer Roboter (Cobots).	Einsatz autonom arbeitender kollaborativer Roboter (Cobots).

Tabelle 4.25 Reifegradmerkmale Physische Assistenz

Aufgabenspektrum der Beschäftigten auf der operativen Ebene

Es ist zu erwarten, dass einfache, sich wiederholende Arbeiten mit niedrigen Qualifikationsanforderungen durch die Technik abgelöst werden. Dazu gehören auch die Maschinenbedienung und -einstellung, die weitestgehend automatisiert werden können (vgl. Abschnitt 2.2.3.8). Durch die Dezentralisierung der überwachenden und steuernden Aufgaben der indirekten Bereiche ergeben sich auf der operativen Ebene jedoch erweiterte Aufgaben mit höheren Qualifikationsanforderungen (vgl. Abschnitt 2.2.3.8). Die in Tabelle 4.26 dargestellten Reifegradmerkmale basieren auf den in Abschnitt 2.2.3.8 zusammengefassten Ausführungen von (Hirsch-Kreinsen, 2015, S. 91f.). Während sich das Aufgabenspektrum der Beschäftigten der operativen Ebene auf Reifegradstufe 0 noch auf die bisherigen wertschöpfenden Tätigkeiten beschränkt, gehört zu den Aufgaben auf Reifegradstufe 1 auch die Überwachung einzelner Maschinen und Anlagen anhand der auf Reifegradstufe 1 erfassten Daten. Auf Reifegradstufe 2 überwachen die Beschäftigten nicht nur die Maschinen und Anlagen, sondern treffen auch Entscheidungen. Auf Reifegradstufe 3 erweitert sich die Überwachung und Entscheidungsfindung auf das gesamte vernetzte System (z.B. Maschinenstatus, Materialverfügbarkeit, Werkzeugverfügbarkeit, Auftragsvorrat, Personalverfügbarkeiten, etc.) während wertschöpfende Tätigkeiten reduziert werden. Auf Reifegradstufe 4 liegt der Schwerpunkt der Aufgaben bei der Überwachung und Koordination des gesamten vernetzten Systems. Auf Reifegradstufe 5 beschränkt

sich das Aufgabenspektrum auf die Festlegung, Überwachung und Umsetzung von Smart Factory Strategien. Der Mensch wird zum „Dirigenten der Wertschöpfung“ (BITKOM e.V., et al., 2015, S. 48).

Aufgabenspektrum der Beschäftigten auf der operativen Ebene (MO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Das Aufgabenspektrum beschränkt sich auf die wertschöpfenden Tätigkeiten.	Wertschöpfende Tätigkeiten sowie Überwachung einzelner Maschinen und Anlagen.	Wertschöpfende Tätigkeiten. Überwachung einzelner Maschinen und Anlagen und Entscheidungsfindung.	Reduzierte wertschöpfende Tätigkeiten. Überwachung des vernetzten Systems und Entscheidungsfindung.	Reduzierte wertschöpfende Tätigkeiten. Überwachung und Koordination des vernetzten Systems.	Rolle als "Dirigenten der Wertschöpfung". Festlegung, Überwachung und Umsetzung von Produktionsstrategien.

Tabelle 4.26 Reifegradmerkmale Aufgabenspektrum der Beschäftigten auf der operativen Ebene

4.2.4. Produktionsplanung und -steuerung

Die Bewertung des Reifegrads des Betrachtungsbereichs *Produktionsplanung und -steuerung* erfolgt anhand der folgenden, aus den Abschnitten 2.1.3, 2.2.3.3, 2.2.3.9 und 2.2.3.11 abgeleiteten Bewertungskriterien:

1. Qualifikation der Beschäftigten
2. Steuerungsprinzip
3. Assistenz für die Produktionsplanung und -steuerung

Qualifikation der Beschäftigten

Die in Tabelle 4.27 dargestellten Reifegradmerkmale einer zunehmenden interdisziplinären Qualifikation der Beschäftigten wurde bereits in Abschnitt 4.2.2 ausführlich vorgestellt. Die Qualifikation der Beschäftigten ist auch ein wichtiges Bewertungskriterium im Bereich Produktionsplanung und -steuerung.

Qualifikation der Beschäftigten (M)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen in den Bereichen Prozessoptimierung und Industrie 4.0.	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen in der Prozessoptimierung. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen, ganzheitliches Denken und sozial-kommunikative Kompetenzen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein automatisiertes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.

Tabelle 4.27 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten in der Produktionsplanung und -steuerung

Steuerungsprinzip

Mit diesem Bewertungskriterium wird der Grad der Dezentralisierung der Produktionsplanung und -steuerung bewertet. Dezentrale Steuerungsprinzipien steigern die Autonomie der Produktionsbereiche, reduzieren dadurch den Koordinationsaufwand und ermöglichen gegenüber zentralen Steuerungsprinzipien schnellere Reaktionen auf Veränderungen (vgl. Abschnitt 2.2.3.3). Dennoch planen der Marktstudie zur Nutzung von Industrie 4.0 Modellen (vgl. Abschnitt 2.4.2) zufolge erst 41 Prozent der befragten Unternehmen die Produktion dezentral. Die in Tabelle 4.28 dargestellten Reifegradmerkmale des Steuerungsprinzips beginnen daher auf Reifegradstufe 0 mit einer zentralen Planung, zunächst noch ohne Systemunterstützung. Auf Reifegradstufe 1 erfolgt eine zentrale Produktionsplanung und -steuerung (meist eine Grobplanung auf Kalenderwochen) im ERP-System. Auf Reifegradstufe 2 erfolgt eine zentrale Grobplanung im ERP-System in Kombination mit einer zentralen Feinplanung in Echtzeit im MES (vgl. Abschnitte 2.1.3 und 2.2.2.3). Auf Reifegradstufe 3 erfolgt eine zentrale Grobplanung im ERP-System in Kombination mit einer dezentralen Feinplanung in Echtzeit im MES. Auf Reifegradstufe 4 erhöht sich die Dezentralisierung durch die Steuerung von Abläufen mit Hilfe von Cyber-Physischen Systemen bzw. Smart Products (vgl. Abschnitte 2.2.2.5 und 2.2.5.1). Auf Reifegradstufe 5 steuern sich die modularen Produktionseinheiten überwiegend autonom.

Steuerungsprinzip (TO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Zentrale Produktionsplanung und -steuerung ohne Systemunterstützung.	Zentrale Produktionsplanung und -steuerung im ERP-System (Grobplanung).	Zentrale Produktionsplanung und -steuerung im ERP-System (Grobplanung). Zentrale Feinplanung in Echtzeit im MES.	Zentrale Produktionsplanung und -steuerung im ERP-System (Grobplanung). Dezentrale Feinplanung in Echtzeit im MES.	Weitere Dezentralisierung der Steuerung modularer Produktionseinheiten mit Hilfe von Cyber-Physischen Systemen bzw. Smart Products.	Dezentrale Selbststeuerung und Autonomie der modularen Produktionseinheiten.

Tabelle 4.28 Reifegradmerkmale Steuerungsprinzip

Assistenz für die Produktionsplanung und -steuerung

Mit diesem Bewertungskriterium wird bewertet, inwieweit die Beschäftigten in der Produktionsplanung und -steuerung durch die Technik bei ihrer Aufgabe unterstützt werden. Tabelle 4.29 zeigt die entsprechenden Reifegradmerkmale, beginnend auf der Reifegradstufe 0 mit einer manuellen Produktionsplanung und -steuerung mit Office Software (z.B. Excel), jedoch ohne sonstige Systemunterstützung. Auf Reifegradstufe 1 werden die Grobplanungsfunktionalitäten eines ERP-System eingesetzt. Auf Reifegradstufe 2 werden diese durch die echtzeitbasierten, reaktiven Feinplanungsfunktionalitäten eines MES (vgl. Abschnitte 2.1.3 und 2.2.2.3) sowie durch kontextsensitive Informationen (vgl. Abschnitt 2.2.3.11) ergänzt. Auf Reifegradstufe 3 werden die Beschäftigten in der Produktionsplanung und -steuerung durch die Dezentralisierung und Verlagerung der Feinplanung in die Produktionsbereiche entlastet. Sie erhalten Prognosen sowie kontextsensitive Informationen und Handlungsanweisungen, z.B. zum Störungsmanagement. Auf Reifegradstufe 4 werden die Beschäftigten durch die zunehmende Selbststeuerung der modularen Produktionseinheiten weiter von ihren Steuerungsaufgaben entlastet. Sie erhalten nutzer- und kontextbasierte Informationen und Handlungsanweisungen z.B. zum Störungsmanagement. Auf Reifegradstufe 5 sind die Beschäftigten durch die Autonomie der modularen Produktionseinheiten weitestgehend von den Planungs- und Steuerungsaufgaben entlastet. Sie erhalten aus einem lernenden System nutzer- und kontextsensitive Informationen und Handlungsanweisungen.

Assistenz für die Produktionsplanung und -steuerung (MT)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Manuelle Produktionsplanung und -steuerung (z.B. mit Office Software).	Einsatz der Grobplanungsfunktionalitäten eines ERP-Systems.	Einsatz der Grobplanungsfunktionalitäten eines ERP-Systems und zusätzliche echtzeitbasierte, reaktive Feinplanungsfunktionalitäten eines MES. Kontextsensitive Informationen z.B. zum Störungsmanagement.	Entlastung der Produktionsplanung und -steuerung durch Dezentralisierung der Feinplanung z.B. in einzelne Produktionsbereiche. Kontextsensitive Informationen und Handlungsanweisungen z.B. zum Störungsmanagement.	Weitere Entlastung von der Produktionsplanung und -steuerung durch eine zunehmende Selbststeuerung der modularen Produktionseinheiten sowie durch die Prognosefähigkeit der Systeme. Nutzer- und kontextsensitive Informationen und Handlungsanweisungen z.B. zum Störungsmanagement.	Weitestgehende Entlastung von Planungs- und Steuerungsaufgaben. Autonome, lernende Bereitstellung nutzer- und kontextsensitiver Informationen und Handlungsanweisungen.

Tabelle 4.29 Reifegradmerkmale Assistenz für die Produktionsplanung und -steuerung

4.2.5. Intralogistik

Die Bewertung des Reifegrads des Betrachtungsbereichs *Intralogistik* erfolgt anhand der folgenden, aus den Abschnitten 2.2.2.11, 2.2.3.9 und 2.2.3.4 abgeleiteten Bewertungskriterien:

1. Qualifikation der Beschäftigten
2. Intralogistik (Technik)
3. Materialversorgungsprinzip
4. Assistenz für die Intralogistik (Kommissionierung)
5. Assistenz für die Intralogistik (Materialtransport)

Qualifikation der Beschäftigten

Die in Tabelle 4.30 dargestellten Reifegradmerkmale einer zunehmenden interdisziplinären Qualifikation der Beschäftigten wurde bereits in Abschnitt 4.2.2 ausführlich vorgestellt. Die Qualifikation der Beschäftigten ist auch ein wichtiges Bewertungskriterium im Bereich Intralogistik.

Qualifikation der Beschäftigten (M)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen in den Bereichen Prozessoptimierung und Industrie 4.0.	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen in der Prozessoptimierung. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen, ganzheitliches Denken und sozial-kommunikative Kompetenzen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein automatisiertes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.

Tabelle 4.30 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten in der Intralogistik

Intralogistik (Technik)

Mit dem Bewertungskriterium Intralogistik (Technik) wird die Reife der technischen Ausrüstung für den innerbetrieblichen Materialtransport bewertet. Das Ziel sind „intelligente Transportsysteme“, die selbsttätig Entscheidungen treffen (vgl. Abschnitt 2.2.3.4). Tabelle 4.31 zeigt den zunehmenden Reifegrad, beginnend auf Reifegradstufe 0 mit manuell, „auf Zuruf“ gesteuerten Fördermitteln, z.B. Gabelstaplern. Auf Reifegradstufe 1 sind die Gabelstapler mit mobilen Geräten ausgestattet, auf denen die anstehenden Transportaufträge visualisiert werden (vgl. Abschnitt 2.1.3). Auf Reifegradstufe 2 werden die Transportaufträge routenoptimiert dargestellt, um Umwege oder Leerfahrten zu vermeiden. Fahrerlose Transportsysteme (FTS), die zunächst nur in der Lage sind, auf festen Routen zu verkehren (z.B. durch Schleifen im Boden), stehen ab Reifegradstufe 3 zur Verfügung. Die auf Reifegradstufe 4 verfügbaren FTS sind in der Lage, flexible Routen zu fahren (z.B. durch Einlernen neuer Routen). Auf Reifegradstufe 5 stehen FTS zur Verfügung, die in der Lage sind, sich auf Basis der verfügbaren Daten autonom zu steuern.

Intralogistik (Technik) (T)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Manuell gesteuerte Transportmittel (z.B. Gabelstapler) ohne IT-Unterstützung.	Manuell gesteuerte Transportmittel (z.B. Gabelstapler) mit IT-gestützter Anzeige von Transportaufträgen.	Manuell gesteuerte Transportmittel (z.B. Gabelstapler) mit IT-gestützter Anzeige routenoptimierter Transportaufträge.	Fahrerlose Transportsysteme (FTS) auf festen Routen.	Fahrerlose Transportsysteme (FTS) auf flexiblen Routen.	Autonom gesteuerte Fahrerlose Transportsysteme (FTS).

Tabelle 4.31 Reifegradmerkmale Intralogistik (Technik)

Materialversorgungsprinzip

Die Materialversorgung in der Produktion muss mindestens die gleiche Flexibilität und Wandelbarkeit aufweisen, wie die einzelnen Produktionseinheiten selbst (vgl. Abschnitt 2.2.3.4). Mit diesem Bewertungskriterium wird daher geprüft, inwieweit die Materialversorgung bereits dezentralisiert und systemgestützt erfolgt. Tabelle 2.31 zeigt den zunehmenden Reifegrad, beginnend auf der Reifegradstufe 0 mit zentral gesteuerten Materialtransporten (z.B. über Materialanforderungsscheine). Auf Reifegradstufe 1 erfolgt die zentrale Steuerung der Materialtransporte mit Hilfe des ERP-Systems. Reifegradstufe 2 geht von einer zentralen Steuerung der Materialtransporte in Echtzeit mit Hilfe eines MES aus (vgl. Abschnitte 2.1.3 und 2.2.2.3). Teilweise werden Materialien dezentral durch Kanban gesteuert (vgl. Abschnitt 2.2.3.3). Auf Reifegradstufe 3 erfolgt die Steuerung der Materialtransporte dezentral und routenoptimiert durch ein MES (z.B. auch e-Kanban). Fahrerlose Transportsysteme (FTS) sind in Pilotbereichen im Einsatz. Auf Reifegradstufe 4 ist die Steuerung der Materialtransporte weiter dezentralisiert. Zwischen den modularen Produktionseinheiten verkehren FTS (vgl. Abschnitte 2.2.2.11 und 2.2.3.4). Bei der Steuerung werden Prognosen der zu erwartenden Materialverbräuche und Transporte berücksichtigt. Auf Reifegradstufe 5 ist zwischen den modularen Produktionseinheiten eine sich autonom steuernde Materialversorgung mit FTS installiert.

Materialversorgungsprinzip (TO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Zentral gesteuerte Materialtransporte bzw. Materialbereitstellung "auf Zuruf" ohne Systemunterstützung.	Zentrale Steuerung von Materialtransporten im ERP-System.	Zentrale Steuerung von Materialtransporten in Echtzeit im MES. Dezentrale Steuerung durch Kanban.	Dezentrale, routenoptimierte Steuerung von Materialtransporten in Echtzeit im MES (z.B. e-Kanban). Fahrerlose Transportsysteme (FTS) in Pilotbereichen.	Weitere Dezentralisierung von Materialtransporten zwischen modularen Produktionseinheiten durch Fahrerlose Transportsysteme (FTS). Berücksichtigung von Prognosen der zu erwartenden Transporte.	Autonome Steuerung der Materialtransporte zwischen modularen Produktionseinheiten durch Fahrerlose Transportsysteme (FTS).

Tabelle 4.32 Reifegradmerkmale Materialversorgungsprinzip

Assistenz für die Intralogistik (Kommissionierung)

Mit diesem Bewertungskriterium wird bewertet, inwieweit die Beschäftigten in der Kommissionierung durch die Technik bei ihrer Aufgabe unterstützt werden. Tabelle 4.33 zeigt den zunehmenden Reifegrad, beginnend mit der Reifegradstufe 0, auf der mit Kommissionierlisten in Papierform gearbeitet wird. Auf Reifegradstufe 1 werden digitale Kommissionierlisten aus dem ERP-System eingesetzt. Auf Reifegradstufe 2 können die Beschäftigten die Kommissionierlisten jederzeit auf mobilen Geräten abrufen und abarbeiten. Auf Reifegradstufe 3 werden kognitive Assistenzsysteme, wie Pick-by-Light und Pick-by-Voice eingesetzt (vgl. Abschnitte 2.2.2.9 und 2.2.3.4). Auf Reifegradstufe 4 werden Augmented Reality (AR) Lösungen bei der Kommissionierung eingesetzt (vgl. Abschnitte 2.2.2.9 und 2.2.3.4). Auf Reifegradstufe 5 werden zusätzlich kollaborative, autonom arbeitende Roboter (Cobots) in der Kommissionierung eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.2.2.9).

Assistenz für die Intralogistik (Kommissionierung) (MT)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Kommissionierlisten in Papierform.	Einsatz digitaler Kommissionierlisten aus ERP-System.	Einsatz digitaler Kommissionierlisten auf mobilen Geräten.	Einsatz von Pick-by-Light, Pick-by-Voice.	Einsatz von Augmented Reality (AR) (Pick-by-Vision).	Einsatz autonom arbeitender (kollaborativer) Kommissionierroboter.

Tabelle 4.33 Reifegradmerkmale Assistenz für die Intralogistik (Kommissionierung)

Assistenz für die Intralogistik (Materialtransport)

Mit diesem Bewertungskriterium wird bewertet, inwieweit die Beschäftigten im innerbetrieblichen Materialtransport durch die Technik bei ihrer Aufgabe unterstützt werden. Tabelle 4.34 zeigt den zunehmenden Reifegrad, beginnend mit der Reifegradstufe 0, auf der das Material „auf Zuruf“ bzw. durch Materialbedarfslisten in Papierform angefordert wird. Auf Reifegradstufe 1 werden digitale Materialbedarfslisten aus dem ERP-System eingesetzt. Auf Reifegradstufe 2 erhalten die Beschäftigten Transportaufträge auf mobilen Geräten. Auf Reifegradstufe 3 werden diese Transportaufträge routenoptimiert angezeigt. Zudem werden die Beschäftigten in der Intralogistik durch erste fahrerlose Transportsysteme (FTS) entlastet (vgl. Abschnitte 2.2.2.11 und 2.2.3.4). Auf Reifegradstufe 4 werden die Beschäftigten zunehmend durch FTS beim Materialtransport entlastet. Sie übernehmen zunehmend überwachende und koordinierende Aufgaben in der Intralogistik. Auf Reifegradstufe 5 sind die Beschäftigten weitestgehend vom Materialtransport entlastet. Der Fokus ihrer Tätigkeit liegt mehr in der Festlegung, Überwachung und Umsetzung von Intralogistikstrategien (vgl. Abschnitt 2.2.3.8).

Assistenz für die Intralogistik (Materialtransport) (MT)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Papiergestützte Materialbedarfslisten bzw. Transport "auf Zuruf".	Einsatz digitaler Materialbedarfslisten aus ERP-System.	Einsatz digitaler Transportaufträge z.B. auf mobilem Gerät des Intralogistikers.	Vernetzung aller Transportbedarfe und automatisierte Routenoptimierung. Entlastung durch erste Fahrerlose Transportsysteme (FTS).	Weitere Entlastung der Intralogistik durch den zunehmenden Einsatz von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS). Überwachung und Koordination des vernetzten Systems.	Weitestgehende Entlastung der Intralogistik durch den Einsatz von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS). Festlegung, Überwachung und Umsetzung von Intralogistikstrategien.

Tabelle 4.34 Reifegradmerkmale Assistenz für die Intralogistik (Materialtransport)

4.2.6. Instandhaltungsmanagement

Die Bewertung des Reifegrads des Betrachtungsbereichs *Instandhaltungsmanagement* erfolgt anhand der folgenden, aus den Abschnitten 2.1.3, 2.2.3.5 und 2.2.3.9 abgeleiteten Bewertungskriterien:

1. Qualifikation der Beschäftigten
2. Instandhaltungsprinzip
3. Assistenz für die Instandhaltung

Qualifikation der Beschäftigten

Die in Tabelle 4.35 dargestellten Reifegradmerkmale einer zunehmenden interdisziplinären Qualifikation der Beschäftigten wurde bereits in Abschnitt 4.2.2 ausführlich vorgestellt. Die Qualifikation der Beschäftigten ist auch ein wichtiges Bewertungskriterium im Bereich Instandhaltung.

Qualifikation der Beschäftigten (M)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen in den Bereichen Prozessoptimierung und Industrie 4.0.	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen in der Prozessoptimierung. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen, ganzheitliches Denken und sozial-kommunikative Kompetenzen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein automatisiertes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.

Tabelle 4.35 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten in der Instandhaltung

Instandhaltungsprinzip

Mit dem Bewertungskriterium Instandhaltungsprinzip wird bewertet, inwieweit technische Möglichkeiten zur Verbesserung der Instandhaltungsorganisation eingesetzt werden. Tabelle 4.36 zeigt den zunehmenden Reifegrad, beginnend mit Reifegradstufe 0, auf der lediglich eine zentral organisierte, periodisch vorbeugende bzw. reaktive Instandhaltung existiert. Auf Reifegradstufe 1 werden die Betriebsmittel im Rahmen eines zentralen, echtzeitbasierten Condition Monitorings (CM) im MES überwacht (vgl. Abschnitt 2.2.3.5). Auf Reifegradstufe 2 ist darauf aufbauend eine zentrale, vorbeugende Instandhaltung im MES auf Basis von Maschinentakten

oder Einsatzzeiten installiert (vgl. Abschnitt 2.1.3). Auf Reifegradstufe 3 ist die Instandhaltung in dezentrale Organisationseinheiten organisiert. Durch den Einsatz von cyber-physischen Systemen (CPS) stehen weitere instandhaltungsrelevante Daten (z.B. Schwingungen, Temperaturen) zur Verfügung (vgl. Abschnitt 2.2.3.5). Auf Reifegradstufe 4 ergibt sich eine weitere Verbesserung durch eine vorausschauende (prädiktive) Instandhaltung, die in der Lage ist, sich anbahnende Störungen zu signalisieren (vgl. Abschnitt 2.2.3.5). Auf Reifegradstufe 5 ist die präskriptive Instandhaltung zusätzlich in der Lage, auf Basis der Datenanalyse mögliche Lösungswege zur Störungsvermeidung vorherzusagen (vgl. Abschnitt 2.2.3.5).

Instandhaltungsprinzip (TO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Zentrale, periodisch vorbeugende bzw. reaktive Instandhaltung.	Zentrale Überwachung von Betriebsmitteln durch Condition Monitoring im MES.	Zentrale, vorbeugende Instandhaltung nach vorgegebenen Einsatzzeiten oder Takten im MES.	Dezentrale, vorbeugende Instandhaltung nach vorgegebenen Einsatzzeiten oder Takten im MES. Verfügbarkeit aller instandhaltungsrelevanter Informationen, z.B. aus cyber-physischen Systemen (CPS).	Predictive Maintenance zur Erkennung sich anbahnender Störungen.	Prescriptive Maintenance mit Vorhersage möglicher Lösungswege zur Störungsvermeidung.

Tabelle 4.36 Reifegradmerkmale Instandhaltungsprinzip

Assistenz für die Instandhaltung

Mit diesem Bewertungskriterium wird bewertet, inwieweit die Beschäftigten in der Instandhaltung durch die Technik bei ihrer Aufgabe unterstützt werden. Tabelle 4.37 zeigt den zunehmenden Reifegrad, beginnend mit der Reifegradstufe 0, auf der die Beschäftigten keine Systemunterstützung haben. Die Instandhaltungsplanung erfolgt manuell z.B. in Excel. Auf Reifegradstufe 1 sind maschinenbezogene Echtzeitinformationen und Auswertungen verfügbar, wie z.B. die Maschinenstatus, Stillstandsanalysen und Kennzahlen, wie Nutzungsgrad, Verfügbarkeitsgrad oder Overall Equipment Effectiveness (OEE). Auf Reifegradstufe 2 wird zur vorbeugenden Instandhaltung ein digitaler Wartungskalender (häufig im MES) eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.1.3). Auf Reifegradstufe 3 werden mobile Geräte zur dezentralen Instandhaltung eingesetzt.

Darüber hinaus werden Augmented Reality (AR) bzw. Virtual Reality (VR) Funktionalitäten zur Fehleridentifikation und -behebung eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.2.2.9) sowie integrierte, kontextsensitive Funktionalitäten z.B. für die Ersatzteilbestellung. Auf Reifegradstufe 4 stehen den Beschäftigten frühzeitige Informationen über sich anbahnende Störungen zur Verfügung (vgl. Abschnitt 2.2.3.5). Auf Reifegradstufe 5 werden zudem mögliche Lösungswege zur Vermeidung von Störungen aufgezeigt (vgl. Abschnitt 2.2.3.5).

Assistenz für die Instandhaltung (MT)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Manuelle Instandhaltungsplanung (z.B. mit Office Software).	Maschinenbezogene Auswertungen, wie Maschinenstatus in Echtzeit, Stillstandsanalysen und Kennzahlen (z.B. OEE) im MES.	Einsatz eines digitalen Wartungskalenders im MES zur vorbeugenden Instandhaltung	Dezentralen, vorbeugenden Instandhaltung durch Instandhaltungsmeldungen auf mobilen Geräten. AR/VR Funktionalitäten zur Fehleridentifikation und -behebung. Funktionalitäten zur Ersatzteilbestellung.	Frühzeitige Informationen über sich anbahnende Störungen.	Frühzeitige Informationen über sich anbahnende Störungen und Vorhersage möglicher Lösungswege zur Störungsvermeidung.

Tabelle 4.37 Reifegradmerkmale Assistenz für die Instandhaltung

4.2.7. Werkzeugmanagement

Die Bewertung des Reifegrads des Betrachtungsbereichs *Werkzeugmanagement* erfolgt anhand der folgenden, aus den Abschnitten 2.2.3.6 und 2.2.3.9 abgeleiteten Bewertungskriterien:

1. Qualifikation der Beschäftigten
2. Assistenz für das Werkzeugmanagement

Qualifikation der Beschäftigten

Die in Tabelle 4.38 dargestellten Reifegradmerkmale einer zunehmenden interdisziplinären Qualifikation der Beschäftigten wurde bereits in Abschnitt 4.2.2 ausführlich vorgestellt. Die Qualifikation der Beschäftigten ist auch ein wichtiges Bewertungskriterium im Bereich Werkzeugmanagement.

Qualifikation der Beschäftigten (M)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen in den Bereichen Prozessoptimierung und Industrie 4.0.	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen in der Prozessoptimierung. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen, ganzheitliches Denken und sozial-kommunikative Kompetenzen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein automatisiertes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.

Tabelle 4.38 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten im Werkzeugbau

Assistenz für das Werkzeugmanagement

Durch kundenindividuellere Produkte und kürzere Produktlebenszyklen erhöhen sich die Werkzeugvielfalt und die Häufigkeit von Werkzeugwechseln (vgl. Abschnitt 2.2.3.6). Mit diesem Bewertungskriterium wird daher bewertet, inwieweit die Beschäftigten im Werkzeugbau durch die Technik bei ihrer Aufgabe unterstützt werden. Tabelle 4.39 zeigt den zunehmenden Reifegrad, beginnend mit der Reifegradstufe 0, auf der die Beschäftigten die Werkzeugverwaltung und Werkzeugeinsatzplanung noch manuell und ohne Systemunterstützung durchführen. Auf Reifegradstufe 1 wird eine Werkzeugverwaltung und grobe Werkzeugeinsatzplanung im ERP-System eingesetzt. Auf Reifegradstufe 2 wird eine Werkzeugverwaltung im ERP-System oder MES (Spritzgusswerkzeuge, Stanzwerkzeuge, etc.) eingesetzt, bzw. in einem Tool Management System (Zerspanungswerkzeuge). Zur echtzeitbasierten Werkzeugeinsatzplanung wird ein MES eingesetzt (vgl. Abschnitte 2.1.3 und 2.2.3.6). Auf Reifegradstufe 3 wird zur digitalen Abbildung des in Abschnitt 2.2.3.6 beschriebene Werkzeugkreislaufs (Lagerung, Identifizierung, Montage, Einstellung, Bereitstellung, Nutzung, Demontage, Aufbereitung) ein MES (Spritzgusswerkzeuge, Stanzwerkzeuge, etc.) bzw. ein Tool Management System (Zerspanungswerkzeuge) eingesetzt. Auf Reifegradstufe 4 erhalten sie im Rahmen der prädikativen Instandhaltung der Werkzeuge Hinweise zu sich anbahnenden werkzeugbedingten Störungen. Auf Reifegradstufe 5 erhalten sie zusätzlich präskriptive Handlungsempfehlungen zur Vermeidung werkzeugbedingter Störungen (vgl. Abschnitt 2.2.3.5).

Assistenz für das Werkzeugmanagement (MT)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Manuelle Werkzeugverwaltung und -einsatzplanung (z.B. mit Office Software).	Einsatz einer Werkzeugverwaltung und -einsatzplanung im ERP-System.	Werkzeugverwaltung im ERP, MES bzw. Tool Management System und echtzeitbasierte Werkzeugeinsatzplanung im MES. Erfassung und Bereitstellung relevanter Daten (z.B. Status, Stückzahl, Einsatzzeit, Temperatur, Druck).	Digitale Abbildung des gesamten Werkzeugkreislaufs (Lagerung, Identifizierung, Montage, Einstellung, Bereitstellung, Nutzung, Demontage, Aufbereitung).	Predictive Maintenance zur Erkennung sich anbahnender werkzeugbedingter Störungen.	Prescriptive Maintenance mit Vorhersage möglicher Lösungswege zur Vermeidung werkzeugbedingter Störungen.

Tabelle 4.39 Reifegradmerkmale Assistenz für das Werkzeugmanagement

4.2.8. Qualitätsmanagement

Die Bewertung des Reifegrads des Betrachtungsbereichs *Qualitätsmanagement* erfolgt anhand der folgenden, aus den Abschnitten 2.2.3.7 und 2.2.3.9 abgeleiteten Bewertungskriterien:

1. Qualifikation der Beschäftigten
2. Assistenz für das Werkzeugmanagement

Qualifikation der Beschäftigten

Die in Tabelle 4.40 dargestellten Reifegradmerkmale einer zunehmenden interdisziplinären Qualifikation der Beschäftigten wurde bereits in Abschnitt 4.2.2 ausführlich vorgestellt. Die Qualifikation der Beschäftigten ist auch ein wichtiges Bewertungskriterium im Bereich Qualitätsmanagement.

Qualifikation der Beschäftigten (M)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen in den Bereichen Prozessoptimierung und Industrie 4.0.	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen in der Prozessoptimierung. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen, ganzheitliches Denken und sozial-kommunikative Kompetenzen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein automatisiertes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.

Tabelle 4.40 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten im Qualitätsmanagement

Assistenz für das Qualitätsmanagement

Die Individualisierung von Produkten erzeugt eine höhere Komplexität im Qualitätsmanagement, da nicht Produktserien überwacht werden müssen, sondern einzelne Produkte mit ihren individuellen Produktionsabläufen (vgl. Abschnitt 2.2.3.7). Mit diesem Bewertungskriterium wird daher bewertet, inwieweit die Beschäftigten im Qualitätsmanagement durch die Technik bei ihrer Aufgabe unterstützt werden. Tabelle 4.41 zeigt den zunehmenden Reifegrad, beginnend mit der Reifegradstufe 0, auf der die Beschäftigten die Qualitätsdaten manuell und ohne Systemunterstützung erfassen und auswerten müssen. Auf Reifegradstufe 1 wird ein Computer Aided Quality (CAQ) System zur Prüfplanung und Prüfdatenerfassung eingesetzt. Auf Reifegradstufe 2 wird ein integriertes CAQ-System (z.B. Modul eines MES, vgl. Abschnitt 2.1.3) mit weiteren, reaktiven Funktionalitäten eingesetzt, wie beispielsweise die Visualisierung von Qualitätsabweichungen, Ursachenanalyse, Eskalations- und Workflowmanagement. Auf Reifegradstufe 3 erhalten die Beschäftigten kontextsensitive Hinweise. Es erfolgt zudem eine umfassende, produktbezogene Überwachung von Qualitätsdaten, Prozessdaten und Produktdaten. Auf Reifegradstufe 4 stehen den Beschäftigten frühzeitige Informationen über sich anbahnende Qualitätsabweichungen zur Verfügung (Predictive Quality). Auf Reifegradstufe 5 werden den Beschäftigten mögliche Lösungswege zur Vermeidung von Qualitätsabweichungen vorhergesagt (Prescriptive Quality, vgl. Abschnitt 2.2.3.7).

Assistenz für das Qualitätsmanagement (MT)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Manuelle Qualitätsdatenerfassung und -auswertung (z.B. mit Office Software).	Einsatz eines CAQ-System (In-sellösung) zur Prüfplanung und Prüfdatenerfassung.	Reaktive Funktionalitäten, (z.B. Visualisierung von Qualitätsabweichungen, Ursachenanalyse, Eskalations- und Workflowmanagement) eines integrierten CAQ-Systems (z.B. MES).	Umfassende, produktbezogene Überwachung von Qualitätsdaten, Auftragsdaten, Prozessdaten und Produktdaten sowie kontextsensitive Hinweise.	Predictive Quality zur Erkennung sich anbahnender Qualitätsabweichungen.	Prescriptive Quality mit Vorhersage möglicher Lösungswege zur Vermeidung von Qualitätsabweichungen.

Tabelle 4.41 Reifegradmerkmale Assistenz für das Qualitätsmanagement

4.3. Der Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI)

Der Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI) ist ein Maß für die Industrie 4.0 Reife der Supply Chain. Auf Basis der Handlungsbereiche der Smart Supply Chain (vgl. Abbildung 2.26), der detaillierten Ausführungen zur Smart Supply Chain in Abschnitt 2.2.4 sowie der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Anforderungen wurden die in Tabelle 4.42 dargestellten drei Betrachtungsbereiche und sieben Bewertungskriterien des Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI) als Gliederung für die Reifegradbewertung der Supply Chain definiert.

Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI)	
Betrachtungsbereiche	Bewertungskriterien
Unternehmen	<ul style="list-style-type: none"> • Smart Supply Chain Strategie • Qualifikation der Beschäftigten • Horizontale Integration in der Supply Chain
Echtzeitstatus und Tracking	<ul style="list-style-type: none"> • Identifikation, Lokalisierung und Status • Kognitive Assistenz
Planung, Steuerung und Überwachung	<ul style="list-style-type: none"> • Assistenz bei der Planung, Steuerung und Überwachung • Assistenz beim Transportmanagement

Tabelle 4.42 Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI) - Betrachtungsbereiche und Bewertungskriterien

In den folgenden Abschnitten werden die jeweiligen Bewertungskriterien und Reifegradmerkmale zu jedem dieser Betrachtungsbereiche näher beschrieben. Die Bewertungskriterien und Reifegradmerkmale wurden im Wesentlichen aus den Ausführungen zur Smart Supply Chain in Abschnitt 2.2.4 sowie aus den Ausführungen zur Ausgangssituation der Unternehmen in Abschnitt 2.1 abgeleitet.

4.3.1. Unternehmen

Der Betrachtungsbereich *Unternehmen* dient dazu, den Reifegrad wichtiger Rahmenbedingungen auf dem Weg zur Smart Supply Chain zu bewerten. Dies erfolgt anhand der folgenden Bewertungskriterien:

1. Smart Supply Chain Strategie
2. Qualifikation der Beschäftigten
3. Horizontale Integration in der Supply Chain

Smart Supply Chain Strategie

Das Vorhandensein einer Strategie gehört zu den wesentlichen Erfolgsfaktoren bei der Umsetzung von Transformationsschritten in Richtung Industrie 4.0 (vgl. Abschnitt 2.2.3.12). Tabelle 4.43 zeigt die entsprechenden Reifegradmerkmale. Als Ausgangsbasis wird das Fehlen einer Smart Supply Chain Strategie gesehen. Auf Reifegradstufen 1 gibt es Pilotprojekte, in denen erste „Use Cases“ umgesetzt werden. Auf Reifegradstufe 2 gibt es in einzelnen Bereichen (z.B. Beschaffung) eine Smart Supply Chain Strategie, die umgesetzt wird. Auf Reifegradstufe 3 gibt es eine klar dokumentierte Supply Chain Strategie für das gesamte Unternehmen, die in der Unternehmensstrategie verankert ist und im Rahmen des Change Managements auch kommuniziert wird (vgl. Abschnitt 2.2.3.12). Auf Reifegradstufe 4 wird die Umsetzung der unternehmensweiten Smart Supply Chain Strategie durch ein Management Team überwacht. Auf Reifegradstufe 5 wird die Strategie kontinuierlich weiterentwickelt und an sich verändernde Rahmenbedingungen angepasst.

Smart Supply Chain Strategie (MTO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es gibt noch keine Smart Supply Chain Strategie zur Neuausrichtung der eigenen Rolle in der Wertschöpfungskette sowie zum Aufbau eines agilen Supply Chain Netzwerks.	Es gibt noch keine Strategie, jedoch erste Projekte ("Use Cases") in Pilotbereichen.	Es gibt in einzelnen Bereichen eine Smart Supply Chain Strategie, die umgesetzt wird.	Es gibt eine klar dokumentierte Supply Chain Strategie für das gesamte Unternehmen, die in der Unternehmensstrategie verankert ist.	Die Umsetzung der unternehmensweiten Supply Chain Strategie wird durch ein Management Team überwacht.	Die Smart Supply Chain Strategie wird kontinuierlich weiterentwickelt und an sich verändernde Rahmenbedingungen angepasst.

Tabelle 4.43 Reifegradmerkmale Smart Supply Chain Strategie

Qualifikation der Beschäftigten

Die in Tabelle 4.44 dargestellten Reifegradmerkmale einer zunehmenden interdisziplinären Qualifikation der Beschäftigten wurde bereits in Abschnitt 4.2.2 ausführlich vorgestellt. Die Qualifikation der Beschäftigten ist auch ein wichtiges Bewertungskriterium für die Beschäftigten im Bereich Supply Chain Management.

Qualifikation der Beschäftigten (M)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen in den Bereichen Supply Chain Management und Industrie 4.0.	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen im Bereich Supply Chain Management. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen, ganzheitliches Denken und sozial-kommunikative Kompetenzen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein automatisiertes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.

Tabelle 4.44 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten im Supply Chain Management

Horizontale Integration in der Supply Chain

Mit diesem Bewertungskriterium wird bewertet, inwieweit der unternehmensübergreifende digitale Datenaustausch bereits umgesetzt wurde. Tabelle 4.45 zeigt den zunehmenden Reifegrad der horizontalen Integration in der Supply Chain. Auf Reifegradstufe 0 verfügt das Unternehmen lediglich über ein ERP-System zur Abwicklung der Interaktionen mit Kunden, Lieferanten

und Wertschöpfungspartnern. Der Datenaustausch erfolgt in der Regel durch Telefon, Fax oder Email. Auf Reifegradstufe 1 erfolgt der Datenaustausch digital über Electronic Data Interchange (EDI). Das ERP-System und das Lagerverwaltungssystem (LVS) bzw. Warehouse Management System (WMS) sind miteinander vernetzt (vgl. Abschnitt 2.2.4.6). Auf Reifegradstufe 2 integriert ein Supply Chain Management (SCM) System die Prozesse entlang der Supply Chain. Auf Reifegradstufe 3 erfolgt die Vernetzung in der Supply Chain erfolgt über Plattformen in der Cloud (vgl. Abschnitte 2.2.2.4 und 2.2.4.6), auf denen Angebote und Nachfragen zu Produkten und Services ausgetauscht werden. Auf Reifegradstufe 4 wird die Integration durch serviceorientierte Architekturen (vgl. Abschnitt 2.2.2.4), entsprechende Platform as a Service (PaaS) Lösungen (vgl. Abschnitt 2.2.4.6) und Standardisierung der Industrie 4.0 Komponenten (vgl. Abschnitt 2.2.2.8) erweitert. Die Systeme erhalten die Fähigkeit zur Prognose von Supply Chain Parametern (z.B. Bedarfe). Auf Reifegradstufe 5 wird durch die hohe Integration in der Supply Chain die Fähigkeit zur Selbststeuerung und Autonomie erreicht.

Horizontale Integration in der Supply Chain (TO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es gibt neben dem ERP-System keine speziellen IT-Systeme für das Supply Chain Management. Der Datenaustausch mit Kunden, Lieferanten und Wertschöpfungspartnern erfolgt durch Telefon, Fax und Email.	Der Datenaustausch erfolgt über Electronic Data Interchange (EDI). Das ERP-System und das Lagerverwaltungssystem (LVS) bzw. Warehouse Management System (WMS) sind miteinander vernetzt.	Ein Supply Chain Management (SCM) System integriert die Prozesse in der Supply Chain.	Die Vernetzung in der Supply Chain erfolgt über Plattformen in der Cloud, auf denen Angebote und Nachfragen zu Produkten und Services ausgetauscht werden.	(Cloudbasierte) Webservices und Anwendungen (Apps) mit Fähigkeit zur Prognose. Einsatz standardisierter Industrie 4.0 Komponenten (Verwaltungsschale).	(Cloudbasierte) Webservices und Anwendungen (Apps) mit Fähigkeit zur Selbststeuerung und Autonomie. Einsatz standardisierter Industrie 4.0 Komponenten (Verwaltungsschale).

Tabelle 4.45 Reifegradmerkmale Horizontale Integration in der Supply Chain

4.3.2. Echtzeitstatus und Tracking

Der Betrachtungsbereich *Echtzeitstatus und Tracking* dient dazu, den Reifegrad der unternehmensübergreifenden Lieferketten hinsichtlich der Identifikation und Lokalisierung logistischer Objekte sowie der Assistenz für die Beschäftigten auf der operativen Ebene zu bewerten. Dies erfolgt anhand der folgenden, aus den Abschnitten 2.2.4.2 und 2.2.4.4 abgeleiteten Bewertungskriterien:

1. Identifikation, Lokalisierung und Status
2. Kognitive Assistenz

Identifikation, Lokalisierung und Status

Mit diesem Bewertungskriterium wird bewertet, inwieweit die Identität, der Ort sowie der Status logistischer Objekte im unternehmensübergreifenden Materialfluss ermittelt werden können. Tabelle 4.46 zeigt die entsprechenden Reifegradmerkmale, beginnend mit der Reifegradstufe 0, auf der logistische Objekte (Produkte, Behälter, Transportmittel) nicht verfolgt werden. Auf Reifegradstufe 1 erfolgen die Identifikation und Ortung durch Scannen eindimensionaler Barcodes (Strichcode) oder zweidimensionaler QR- bzw. Datamatrix Codes an festen Orten (z.B. Wareneingang). Auf Reifegradstufe 2 erfolgen die Identifikation und Ortung an RFID-Gates durch das automatische Auslesen von RFID-Tags (vgl. Abschnitt 2.2.2.10), die an den logistischen Objekten angebracht sind. Auf Reifegradstufe 3 werden mit Sensoren ausgestattete "intelligente" Ladungsträger (Smart Logistics Objects, vgl. Abschnitt 2.2.4.2) eingesetzt, die den Status der Ware (z.B. Temperatur, Druck, Füllstand) erfassen. Auf Reifegradstufe 4 stellen Smart Logistics Objects als cyber-physische Systeme ihre erfassten Daten zur Prozesssteuerung über das Internet zur Verfügung (vgl. Abschnitt 2.2.4.2). Auf Reifegradstufe 5 kommunizieren Smart Logistics Objects als Industrie 4.0 Komponente zur autonomen Steuerung mit anderen Industrie 4.0 Komponenten (vgl. Abbildung 2.18).

Identifikation, Lokalisierung und Status (TO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Logistische Objekte (Produkte, Behälter, Transportmittel) werden nicht verfolgt.	Die Identifikation und Ortung erfolgt durch Scan eindimensionaler Barcodes (Strichcode) oder zweidimensionaler QR- bzw. Datamatrix Codes an festen Orten (z.B. Wareneingang).	Die Identifikation und Ortung erfolgt an RFID-Gates durch das automatische Auslesen von RFID-Tags, die an den logistischen Objekten angebracht sind.	Mit Sensoren ausgestattete "intelligente" Ladungsträger (Smart Logistics Objects) erfassen den Status der Ware (z.B. Temperatur, Druck, Füllstand).	Smart Logistics Objects stellen als cyber-physische Systeme ihre erfassten Daten zur Prozesssteuerung über das Internet zur Verfügung.	Smart Logistics Objects kommunizieren als Industrie 4.0 Komponente zur autonomen Steuerung mit anderen Industrie 4.0 Komponenten.

Tabelle 4.46 Reifegradmerkmale Identifikation, Lokalisierung und Status

Kognitive Assistenz

Kognitive Assistenzsysteme können den Menschen bei der Wahrnehmung seiner Arbeitsaufgabe sowie bei der Entscheidung über eine Arbeitsaufgabe unterstützen (vgl. Abschnitt 2.2.2.9). Tabelle 4.47 zeigt die Reifegradmerkmale der in der Logistik auf der operativen Ebene einsetzbaren kognitiven Assistenzfunktionen. Auf Reifegradstufe 0 wird davon ausgegangen, dass kein Assistenzsystem im Einsatz ist. Auf Reifegradstufe 1 sind mobile Endgeräte (z.B. Barcode Scanner) zur Identifizierung logistischer Objekte im Einsatz. Auf Reifegradstufe 2 erhalten die Beschäftigten zusätzliche, kontextsensitive Informationen (vgl. Abschnitt 2.2.4.4). Auf Reifegradstufe 3 erhalten sie neben kontextsensitiven Informationen auch Handlungsanweisungen auf mobilen Geräten oder Augmented Reality (AR) Lösungen (z.B. beim Warenumschlag, vgl. Abschnitt 2.2.4.4). Auf Reifegradstufe 4 sind diese Informationen und Handlungsanweisungen nutzersensitiv, d.h. die Erfahrung und das Wissen der Beschäftigten wird bei der Informationsbereitstellung berücksichtigt (vgl. Abschnitt 2.2.2.9). Auf Reifegradstufe 5 erhalten die Beschäftigten von einem autonomen, lernenden System nutzer- und kontextsensitive Handlungsanweisungen.

Kognitive Assistenz (MT)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Für die Beschäftigten im Außendienst gibt es keine kognitiven Assistenzsysteme.	Einsatz mobiler Endgeräte (z.B. Barcode Scanner).	Einsatz mobiler Endgeräte mit kontextsensitiven Informationen.	Kontextsensitive Informationen und Handlungsanweisungen auf mobilen Geräten oder Augmented Reality (AR) Lösungen.	Nutzer- und kontextsensitive Informationen und Handlungsanweisungen auf mobilen Geräten oder Augmented Reality (AR) Lösungen.	Autonome, lernende Bereitstellung nutzer- und kontextsensitiver Informationen und Handlungsanweisungen.

Tabelle 4.47 Reifegradmerkmale Kognitive Assistenz

4.3.3. Planung, Steuerung und Überwachung

Der Betrachtungsbereich *Planung, Steuerung und Überwachung* dient der Bewertung des Reifegrads der technischen Unterstützung der Beschäftigten auf der dispositiven Ebene. Dies erfolgt anhand der folgenden, aus den Abschnitten 2.2.4.3 und 2.2.4.5 abgeleiteten Bewertungskriterien:

1. Assistenz bei der Planung, Steuerung und Überwachung
2. Assistenz beim Transportmanagement

Assistenz bei der Planung, Steuerung und Überwachung

Dieses Bewertungskriterium bewertet den Reifegrad der Unterstützung von Beschäftigten im Supply Chain Management durch technische Lösungen. Tabelle 4.48 zeigt die entsprechenden Reifegradmerkmale, beginnend mit Reifegradstufe 0, auf der die Beschäftigten lediglich durch das ERP-System bei der Kunden- und Lieferantenverwaltung, bei der Bedarfsplanung sowie bei der kaufmännischen Abwicklung von Bestellungen unterstützt werden. Auf Reifegradstufe 1 werden sie durch einen automatisierten und digitalen Datenaustausch mit Kunden und Lieferanten entlastet. Auf Reifegradstufe 2 wird eine integrierten Supply Chain Management Lösung zur Planung, Steuerung und Überwachung der Supply Chain eingesetzt. Sie erhalten Unterstützung bei Entscheidungen (z.B. optimale Bestellmengen) und Problemlösungen durch kontextsensitive Informationen und Datenanalysen. Auf Reifegradstufe 3 werden die Beschäftigten durch die direkte und digitale Vernetzung des Unternehmens mit Kunden, Lieferanten und Wertschöpfungspartnern über eine oder mehrere Cloud-Plattformen von Teilen ihrer bisherigen Tätigkeiten entlastet. Auf Reifegradstufe 4 werden sie durch eine zunehmende Selbststeuerung der Prozesse auf den Plattformen weiter von ihren bisherigen Tätigkeiten entlastet. Sie erhalten nutzer- und kontextsensitive Informationen und Handlungsanweisungen sowie Prognosen von Bedarfen und Lieferengpässen. Auf Reifegradstufe 5 erfolgt die Planung, Steuerung und Überwachung der Supply Chain weitestgehend autonom. Die Tätigkeiten der Beschäftigten verändern sich in Richtung Festlegung, Überwachung und Umsetzung von Smart Supply Chain Strategien (vgl. Abschnitt 2.2.3.8).

Assistenz bei der Planung, Steuerung und Überwachung (MT)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Unterstützung durch das ERP-System bei der Kunden- und Lieferantenverwaltung, bei der Bedarfsplanung sowie bei der kaufmännischen Abwicklung von Bestellungen.	Entlastung durch den automatisierten und digitalen Datenaustausch mit Kunden und Lieferanten.	Einsatz einer integrierten Supply Chain Management Lösung. Unterstützung bei Entscheidungen (z.B. optimale Bestellmengen) und Problemlösungen durch kontextsensitive	Entlastung durch die direkte, digitale Vernetzung mit Kunden, Lieferanten und Wertschöpfungspartnern über eine oder mehrere Cloud-Plattformen.	Weitere Entlastung von der Planung, Steuerung und Überwachung durch eine zunehmende Selbststeuerung der Prozesse in der Supply Chain. Nutzer- und kontextsensitive Informationen und	Weitestgehende Entlastung von der Planung, Steuerung und Überwachung. Autonome, lernende Bereitstellung nutzer- und kontextsensitiver Informationen und

		sitive Informationen und Datenanalysen.		Handlungsanweisungen. Prognose von Bedarfen, Lieferengpässen, etc.	Handlungsanweisungen.
--	--	---	--	--	-----------------------

Tabelle 4.48 Reifegradmerkmale Assistenz bei der Planung, Steuerung und Überwachung

Assistenz beim Transportmanagement

Dieses Bewertungskriterium bewertet den Reifegrad der im Bereich Transportmanagement eingesetzten Techniken zur Unterstützung der Beschäftigten. Das Kriterium ist sowohl bei Unternehmen mit eigenem Fuhrpark anwendbar, als auch bei Unternehmen, die Speditionsaufträge an externe Dienstleister vergeben. Tabelle 4.49 zeigt die entsprechenden Reifegradmerkmale, beginnend mit Reifegradstufe 0, auf der es neben dem ERP-System keine weitere IT-Unterstützung für das Transportmanagement gibt. Auf Reifegradstufe 1 wird in Ergänzung zum ERP-System ein Transport Management System (TMS) eingesetzt. Im Fall eines eigenen Fuhrparks unterstützen Telematiklösungen in den Fahrzeugen die Beschäftigten im Transportmanagement bei der Lokalisierung und Instandhaltungsplanung der Fahrzeuge (vgl. Abschnitt 2.2.4.5). Auf Reifegradstufe 2 werden die Beschäftigten durch kontextsensitive Informationen und Datenanalysen zur Optimierung von Transportmitteln, Lägern und Übergabepunkten zur Reduzierung von Transportzeiten, Kosten und Emissionen unterstützt. Auf Reifegradstufe 3 erfolgt die Vernetzung mit anderen Unternehmen durch Transport- und Frachtenbörsen (vgl. Abschnitt 2.2.4.5). Sie unterstützen die Beschäftigten bei der Vergabe von Transportaufträgen sowie gegebenenfalls auch bei der Annahme von Transportaufträgen (zur Vermeidung leerer Rückfahrten bei eigenem Fuhrpark). Auf Reifegradstufe 4 werden die Beschäftigten durch nutzer- und kontextsensitive Informationen und Handlungsanweisungen sowie Prognosen künftiger Transportbedarfe bei ihrer Arbeit unterstützt. Auf Reifegradstufe 5 sind sie durch den Einsatz selbststeuernder Transportsysteme weitestgehend vom täglichen Transportmanagement entlastet. Die Tätigkeiten der Beschäftigten verändern sich in Richtung Festlegung, Überwachung und Umsetzung von Smart Supply Chain Strategien (vgl. Abschnitt 2.2.3.8).

Assistenz beim Transportmanagement (MT)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es gibt neben dem ERP-System keine speziellen IT-Systeme zur Unterstützung des Transportmanagements.	Einsatz eines Transport Management System (TMS). Bei eigenen Fahrzeugen werden Telematiklösungen (Position und Zustand der Fahrzeuge) eingesetzt.	Kontextsensitive Informationen und Datenanalysen zur Optimierung von Transportmitteln, Lagern und Übergabepunkten zur Reduzierung von Transportzeiten, Kosten und Emissionen.	Einsatz von Transport- und Frachtenbörsen zur Vergabe von Transportaufträgen sowie gegebenenfalls auch zur Annahme von Transportaufträgen (zur Vermeidung leerer Rückfahrten bei eigenem Fuhrpark).	Nutzer- und kontextsensitive Informationen und Handlungsanweisungen sowie Prognosen künftiger Transportbedarfe.	Weitestgehende Entlastung vom Transportmanagement durch den Einsatz autonomer Transportsysteme.

Tabelle 4.49 Reifegradmerkmale Assistenz beim Transportmanagement

4.4. Der Smart Product & Life Cycle Maturity Index (PLCMI)

Der Smart Product & Life Cycle Maturity Index (PLCMI) ist ein Maß zur Bewertung der Reife von Smart Products sowie der digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus. Auf Basis der detaillierten Ausführungen zu dem Themenbereich in Abschnitt 2.2.5 sowie der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Anforderungen wurden die in Tabelle 4.50 dargestellten drei Betrachtungsbereiche und sieben Bewertungskriterien des Smart Product & Life Cycle Maturity Index (PLCMI) definiert.

Smart Product & Life Cycle Maturity Index (PLCMI)	
Betrachtungsbereiche	Bewertungskriterien
Unternehmen	<ul style="list-style-type: none"> Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus Qualifikation der Beschäftigten
Smart Products	<ul style="list-style-type: none"> Smart Product Intelligenz Smart Product Einsatz (Produktion) Smart Product Einsatz (Nutzungsphase)
Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	<ul style="list-style-type: none"> Digital Mock-Up Product-Life-Cycle-Management (PLM)

Tabelle 4.50 Smart Product & Life Cycle Maturity Index (PLCMI) - Betrachtungsbereiche und Bewertungskriterien

In den folgenden Abschnitten werden die jeweiligen Bewertungskriterien und Reifegradmerkmale zu jedem dieser Betrachtungsbereiche näher beschrieben. Die Bewertungskriterien und Reifegradmerkmale wurden im Wesentlichen aus den Ausführungen zu Smart Products und der digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus in Abschnitt 2.2.5 abgeleitet.

4.4.1. Unternehmen

Der Betrachtungsbereich *Unternehmen* dient dazu, den Reifegrad wichtiger Rahmenbedingungen auf dem Weg zu Smart Products und einer digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus zu bewerten. Dies erfolgt anhand der folgenden Bewertungskriterien:

1. Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus
2. Qualifikation der Beschäftigten

Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus

Das Vorhandensein einer Strategie gehört zu den wesentlichen Erfolgsfaktoren bei der Umsetzung von Transformationsschritten in Richtung Industrie 4.0 (vgl. Abschnitt 2.2.3.12). Tabelle 4.51 zeigt die entsprechenden Reifegradmerkmale. Als Ausgangsbasis wird das Fehlen einer Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus gesehen. Auf Reifegradstufen 1 gibt es Pilotprojekte, in denen erste „Use Cases“ umgesetzt werden. Auf Reifegradstufe 2 gibt es in einzelnen Bereichen (z.B. Entwicklung) eine Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus, die umgesetzt wird. Auf Reifegradstufe 3 gibt es eine klar dokumentierte Strategie für das gesamte Unternehmen, die in der Unternehmensstrategie verankert ist und im Rahmen des Change Managements auch kommuniziert wird (vgl. Abschnitt 2.2.3.12). Auf Reifegradstufe 4 wird die Umsetzung der unternehmensweiten Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus durch ein Management Team überwacht. Auf Reifegradstufe 5 wird die Strategie kontinuierlich weiterentwickelt und an sich verändernde Rahmenbedingungen angepasst.

Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus (MTO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es gibt noch keine Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus.	Es gibt noch keine Strategie, jedoch erste Projekte ("Use Cases") in Pilotbereichen.	Es gibt in einzelnen Bereichen eine Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus, die umgesetzt wird.	Es gibt eine klar dokumentierte Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus für das gesamte Unternehmen, die in der Unternehmensstrategie verankert ist.	Die Umsetzung der unternehmensweiten Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus wird durch ein Management Team überwacht.	Die Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus wird kontinuierlich weiterentwickelt und an sich verändernde Rahmenbedingungen angepasst.

Tabelle 4.51 Reifegradmerkmale Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus

Qualifikation der Beschäftigten

Die in Tabelle 4.52 dargestellten Reifegradmerkmale einer zunehmenden interdisziplinären Qualifikation der Beschäftigten wurde bereits in Abschnitt 4.2.2 ausführlich vorgestellt. Die Qualifikation der Beschäftigten ist auch ein wichtiges Bewertungskriterium für alle während des Produktlebenszyklus eingebundenen Beschäftigten, wie z.B. Entwicklung/Konstruktion, Produktpflege, Produktion und Service (vgl. Abbildung 2.27).

Qualifikation der Beschäftigten (M)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen im Bereich der digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus.	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen im Bereich der digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen, ganzheitliches Denken und sozial-kommunikative Kompetenzen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein automatisiertes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.

Tabelle 4.52 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten im Product Life Cycle Management

4.4.2. Smart Products (Produktlebenszyklus)

Der Betrachtungsbereich *Smart Products (Produktlebenszyklus)* dient dazu, den Reifegrad von Smart Products zu bewerten. Dies erfolgt anhand der folgenden Bewertungskriterien:

1. Smart Product Intelligenz
2. Smart Product Einsatz (Produktion)
3. Smart Product Einsatz (Nutzungsphase)

Smart Product Intelligenz

Smart Products können verschiedene Ausprägungen der Intelligenz haben (vgl. Abschnitt 2.2.5.1). Mit diesem Bewertungskriterium wird der Grad der Intelligenz und damit die Reife von Smart Products bewertet. Tabelle 4.54 zeigt die entsprechenden Reifegradmerkmale in Anlehnung an Abschnitt 2.2.5.1, beginnend mit der Reifegradstufe 0, auf der die Produkte noch nicht über cyber-physische Komponenten und Intelligenz verfügen. Auf Reifegradstufe 1 sind Smart Products in der Lage, Informationen zu sammeln und zu speichern. Auf Reifegradstufe 2 sind sie in der Lage, auf Basis der erfassten Daten Probleme zu erkennen. Auf Reifegradstufe 3 sind Smart Products in der Lage mit der Außenwelt zu kommunizieren und die erfassten Daten für übergeordnete Services bereitzustellen (z.B. als Industrie 4.0 Komponente über die Verwaltungsschale, vgl. Abschnitt 2.2.2.8). Auf Reifegradstufe 4 sind Smart Products in der Lage, einfache Entscheidungen zu treffen. Auf Reifegradstufe 5 sind sie in der Lage, auch komplexere Entscheidungen autonom zu treffen.

Smart Product Intelligenz (T)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Die Produkte haben keine cyber-physische Komponente.	Die Smart Products sind in der Lage, Informationen zu sammeln und zu speichern.	Die Smart Products sind in der Lage, Probleme zu erkennen.	Die Smart Products sind in der Lage, die erfassten Daten für übergeordnete Services bereitzustellen (z.B. als Industrie 4.0 Komponente über die Verwaltungsschale).	Die Smart Products sind in der Lage, einfache Entscheidungen zu treffen.	Die Smart Products sind in der Lage, komplexere, autonome Entscheidungen zu treffen.

Tabelle 4.53 Reifegradmerkmale Smart Product Intelligenz

Smart Product Einsatz (Produktion)

Mit diesem Bewertungskriterium wird bewertet, inwieweit Smart Products während der Lebenszyklusphase „Produktion“ (vgl. Abbildung 2.27) Daten erfassen, Daten weitergeben oder Prozesse steuern (vgl. Abschnitt 2.2.5.1). Tabelle 4.54 zeigt die entsprechenden Reifegradmerkmale in Anlehnung an Abschnitt 2.2.5.1, beginnend mit der Reifegradstufe 0, auf der die Produkte noch nicht über cyber-physische Komponenten und Intelligenz verfügen. Auf Reifegradstufe 1 sammeln Smart Products in der Produktion Daten über ihren Herstellungsprozess (z.B. Bearbeitungsparameter, Materialchargen, Prüfergebnisse). Auf Reifegradstufe 2 erkennen Smart Products Probleme im Herstellungsprozess (z.B. Qualitätsabweichungen). Auf Reifegradstufe 3 liefern Smart Products Informationen über ihren aktuellen Bearbeitungsstand an übergeordnete Services bzw. an ein dynamisches Produktmodell (ihren digitalen Schatten, vgl. Abschnitt 2.2.2.7). Auf Reifegradstufe 4 treffen Smart Products Entscheidungen auf Basis der in der Produktion erfassten oder erhaltenen Informationen. Auf Reifegradstufe 5 steuern Smart Products ihre Produktionsprozesse autonom.

Smart Product Einsatz (Produktion) (TO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Die Produkte haben keine cyber-physische Komponente.	Während der Produktion sammeln die Smart Products Daten über ihren Herstellungsprozess.	Smart Products erkennen Probleme im Herstellungsprozess (z.B. Qualitätsabweichungen).	Smart Products liefern Informationen über ihren Bearbeitungsstand an übergeordnete Services bzw. an ein dynamisches Produktmodell (ihren digitalen Schatten).	Smart Products treffen in der Produktion auf Basis der erfassten oder erhaltenen Informationen Entscheidungen.	Smart Products steuern Produktionsprozesse autonom.

Tabelle 4.54 Reifegradmerkmale Smart Product Einsatz in der Produktion

Smart Product Einsatz (Nutzungsphase)

Mit diesem Bewertungskriterium wird bewertet, inwieweit Smart Products während der Nutzungsphase (vgl. Abbildung 2.27) Daten erfassen, Daten weitergeben oder Prozesse steuern (vgl. Abschnitt 2.2.5.1). Tabelle 4.55 zeigt die entsprechenden Reifegradmerkmale in Anlehnung an Abschnitt 2.2.5.1, beginnend mit der Reifegradstufe 0, auf der die Produkte noch nicht über cyber-physische Komponenten und Intelligenz verfügen. Auf Reifegradstufe 1 sammeln Smart Products Daten über ihre Nutzung (z.B. Nutzungsparameter, Umgebungsparameter, Verschleiß). Auf Reifegradstufe 2 erkennen Smart Products Probleme während der Nutzung (z.B.

Verschleiß). Auf Reifegradstufe 3 liefern Smart Products Informationen über ihre Nutzung an übergeordnete datenbasierte Services (z.B. Instandhaltung, vgl. Abschnitt 2.2.5.1). Auf Reifegradstufe 4 treffen Smart Products Entscheidungen auf Basis der in der Nutzungsphase erfassten oder erhaltenen Informationen. Auf Reifegradstufe 5 steuern Smart Products Funktionen bzw. Services während der Nutzungsphase autonom.

Smart Product Einsatz (Nutzungsphase) (TO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Die Produkte haben keine cyberphysische Komponente.	Während der Nutzungsphase sammeln die Smart Products Daten über ihre Nutzung.	Smart Products erkennen Probleme während der Nutzung (z.B. Verschleiß).	Smart Products liefern Informationen über ihre Nutzung an übergeordnete datenbasierte Services (z.B. Maintenance).	Smart Products treffen in der Nutzungsphase auf Basis der erfassten oder erhaltenen Informationen Entscheidungen.	Smart Products steuern Funktionen bzw. Services während der Nutzung autonom.

Tabelle 4.55 Reifegradmerkmale Smart Product Einsatz während der Nutzungsphase

4.4.3. Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus

Der Betrachtungsbereich *Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus* dient dazu, die Ausprägungen der digitalen Abbildung des Lebenszyklus von Produkten zu bewerten. Dies erfolgt anhand der folgenden Bewertungskriterien:

1. Digital Mock-Up (DMU)
2. Product-Life-Cycle-Management (PLM)

Digital Mock-Up (DMU)

Digitale 3D-Modelle von Produkten, sogenannte Digital Mock-Ups (DMU), sind ein weiterer Ansatz zur Nutzung und Pflege von Produktdaten über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg (vgl. Abschnitt 2.2.5.2). Mit diesem Bewertungskriterium wird bewertet, inwieweit diese bereits zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus eingesetzt werden. Tabelle 4.56 zeigt die entsprechenden Reifegradmerkmale, beginnend mit Reifegradstufe 0, auf der noch kein DMU im Einsatz ist. Auf Reifegradstufe 1 erfassen DMU produktbezogene Daten während der ersten Phase Entwicklung/Konstruktion des Produktlebenszyklus (vgl. Abbildung 2.27). Auf Reifegradstufe 2 erfassen DMU zusätzlich produktbezogene Daten in der Phase der Produkt-

pflege. Auf Reifegradstufe 3 werden auch produktbezogene Daten während der Produktion erfasst, auf Reifegradstufe 4 auch während der Nutzungsphase. Auf Reifegradstufe 5 sind die DMU vollständig in die IT-Landschaft des Unternehmens (ERP-System, PLM, MES, etc.) integriert.

Digital Mock-Up (DMU) (TO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es ist kein Digital Mock-Up im Einsatz.	Ein Digital Mock-Up erfasst produktbezogene Daten während der Entwicklung/Konstruktion.	Ein Digital Mock-Up erfasst produktbezogene Daten zusätzlich in der Phase der Produktpflege.	Ein Digital Mock-Up erfasst produktbezogene Daten zusätzlich während der Produktion.	Ein Digital Mock-Up erfasst produktbezogene Daten zusätzlich in der Nutzungsphase.	Der Digital Mock-Up ist vollständig in die IT-Landschaft (ERP, MES, etc.) des Unternehmens integriert.

Tabelle 4.56 Reifegradmerkmale Digital Mock-Up

Product-Life-Cycle-Management (PLM)

Product-Lifecycle-Management (PLM) Systeme unterstützen Unternehmen bei der Speicherung, Verwaltung und Bereitstellung aller Daten, die entlang des Produktlebenszyklus anfallen, Daten aus den Systemen der Entwicklung (CAD, CAE, CAM), der Produktion (ERP, MES, IOT) bis hin zu Daten aus Vertrieb, Service und Controlling (vgl. Abschnitt 2.2.5.2). Mit diesem Bewertungskriterium wird bewertet, inwieweit ein PLM-System zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus eingesetzt wird. Tabelle 4.57 zeigt die entsprechenden Reifegradmerkmale, beginnend mit Reifegradstufe 0, auf der noch kein PLM-System im Einsatz ist. Auf Reifegradstufe 1 erfasst ein PLM-System produktbezogene Daten während der ersten Phase Entwicklung/Konstruktion des Produktlebenszyklus (vgl. Abbildung 2.27). Auf Reifegradstufe 2 erfasst das PLM-System zusätzlich produktbezogene Daten in der Phase der Produktpflege. Auf Reifegradstufe 3 werden auch produktbezogene Daten während der Produktion erfasst, auf Reifegradstufe 4 auch während der Nutzungsphase. Auf Reifegradstufe 5 ist das PLM-System vollständig in die IT-Landschaft des Unternehmens (ERP-System, MES, etc.) integriert (vgl. Abbildung 2.14).

Product-Life-Cycle-Management (PLM) (TO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es ist kein PLM System im Einsatz.	Ein PLM-System erfasst produktbezogene Daten während der Entwicklung/Konstruktion.	Ein PLM-System erfasst produktbezogene Daten zusätzlich in der Phase der Produktpflege.	Ein PLM-System erfasst produktbezogene Daten zusätzlich während der Produktion.	Ein PLM-System erfasst produktbezogene Daten zusätzlich in der Nutzungsphase.	Das PLM-System ist vollständig in die IT-Landschaft (ERP, MES, etc.) des Unternehmens integriert.

Tabelle 4.57 Reifegradmerkmale Product-Life-Cycle-Management (PLM)

4.5. Der New Business Maturity Index (NBMI)

Der New Business Maturity Index (NBMI) ist ein Maß zur Bewertung der Reife neuer datenbasierter Geschäftsmodelle. Auf Basis der detaillierten Ausführungen zu dem Themenbereich in Abschnitt 2.2.6 sowie der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Anforderungen wurden die in Tabelle 4.58 dargestellten fünf Betrachtungsbereiche und sieben Bewertungskriterien des New Business Maturity Index (NBMI) definiert.

New Business Maturity Index (NBMI)	
Betrachtungsbereiche	Bewertungskriterien
Unternehmen	<ul style="list-style-type: none"> • Strategie für neue Geschäftsmodelle • Qualifikation der Beschäftigten
Smart Products	<ul style="list-style-type: none"> • Status von Smart Products
Smart Services	<ul style="list-style-type: none"> • Status von Smart Services
Digitale Geschäftsmodelle	<ul style="list-style-type: none"> • Status von digitalen Geschäftsmodellen
Digitale Plattformen	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung fremder Plattformen • Bereitstellung einer eigenen Plattform

Tabelle 4.58 New Business Maturity Index (NBMI) - Betrachtungsbereiche und Bewertungskriterien

In den folgenden Abschnitten werden die jeweiligen Bewertungskriterien und Reifegradmerkmale zu jedem dieser Betrachtungsbereiche näher beschrieben. Die Bewertungskriterien und Reifegradmerkmale wurden im Wesentlichen aus den Ausführungen zu neuen datenbasierten Geschäftsmodellen in Abschnitt 2.2.6 abgeleitet.

4.5.1. Unternehmen

Der Betrachtungsbereich *Unternehmen* dient dazu, den Reifegrad wichtiger Rahmenbedingungen auf dem Weg zu neuen Geschäftsmodellen zu bewerten. Dies erfolgt anhand der folgenden Bewertungskriterien:

1. Strategie für neue Geschäftsmodelle
2. Qualifikation der Beschäftigten

Strategie für neue Geschäftsmodelle

Das Vorhandensein einer Strategie gehört zu den wesentlichen Erfolgsfaktoren bei der Umsetzung von Transformationsschritten in Richtung Industrie 4.0 (vgl. Abschnitt 2.2.3.12). Tabelle 4.59 zeigt die entsprechenden Reifegradmerkmale. Als Ausgangsbasis wird das Fehlen einer Strategie für neue Geschäftsmodelle gesehen. Auf Reifegradstufen 1 gibt es Pilotprojekte, in denen erste „Use Cases“ umgesetzt werden. Auf Reifegradstufe 2 gibt es in einzelnen Bereichen (z.B. Service) eine Strategie für neue Geschäftsmodelle, die umgesetzt wird. Auf Reifegradstufe 3 gibt es eine klar dokumentierte Strategie für das gesamte Unternehmen, die in der Unternehmensstrategie verankert ist und im Rahmen des Change Managements auch kommuniziert wird (vgl. Abschnitt 2.2.3.12). Auf Reifegradstufe 4 wird die Umsetzung der unternehmensweiten Strategie für neue Geschäftsmodelle durch ein Management Team überwacht. Auf Reifegradstufe 5 wird die Strategie kontinuierlich weiterentwickelt und an sich verändernde Rahmenbedingungen angepasst.

Strategie für neue Geschäftsmodelle (MTO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es gibt noch keine Strategie für neue Geschäftsmodelle.	Es gibt noch keine Strategie, jedoch erste Projekte ("Use Cases") in Pilotbereichen.	Es gibt in einzelnen Bereichen eine Strategie für neue Geschäftsmodelle, die umgesetzt wird.	Es gibt eine klar dokumentierte Strategie für neue Geschäftsmodelle für das gesamte Unternehmen, die in der Unternehmensstrategie verankert ist.	Die Umsetzung der unternehmensweiten Strategie für neue Geschäftsmodelle wird durch ein Management Team überwacht.	Die Strategie für neue Geschäftsmodelle wird kontinuierlich weiterentwickelt und an sich verändernde Rahmenbedingungen angepasst.

Tabelle 4.59 Reifegradmerkmale Strategie für neue Geschäftsmodelle

Qualifikation der Beschäftigten

Die in Tabelle 4.60 dargestellten Reifegradmerkmale einer zunehmenden interdisziplinären Qualifikation der Beschäftigten wurde bereits in Abschnitt 4.2.2 ausführlich vorgestellt. Die Qualifikation der Beschäftigten ist auch ein wichtiges Bewertungskriterium für alle in die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle eingebundenen Beschäftigten.

Qualifikation der Beschäftigten (M)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen im Bereich neuer, datenbasierter Geschäftsmodelle.	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen im Bereich neuer, datenbasierter Geschäftsmodelle. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen, ganzheitliches Denken und sozial-kommunikative Kompetenzen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein automatisiertes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.

Tabelle 4.60 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten im Bereich neuer Geschäftsmodelle

4.5.2. Smart Products (Geschäftsmodell)

Der Betrachtungsbereich *Smart Products* dient dazu, den Reifegrad von Smart Products (vgl. Abschnitt 2.2.6.1) anhand ihres Anteils am Gesamtumsatz des Unternehmens zu bewerten. Die Bewertung hinsichtlich ihrer Intelligenz und ihrer Fähigkeiten wurde bereits in Abschnitt 4.4.2 beschrieben. Tabelle 4.61 zeigt die entsprechenden Reifegradmerkmale, beginnend mit Reifegradstufe 0, auf der es noch keine Smart Products gibt. Auf Reifegradstufe 1 werden Smart Products in einem ersten Pilotprojekt getestet. Auf Reifegradstufe 2 werden bei einzelnen Kunden Smart Products zur Erprobung eingesetzt. Auf Reifegradstufe 3 gehören Smart Products zum festen Produktangebot des Unternehmens. Auf Reifegradstufe 4 werden mit ihnen bereits über 25 Prozent des Gesamtumsatzes erzielt, auf Reifegradstufe 5 über 50 Prozent.

Status von Smart Products (TO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es gibt keine Smart Products.	Smart Products werden in einem ersten Pilotprojekt getestet.	Smart Products werden bei einzelnen Kunden zur Erprobung eingesetzt.	Smart Products gehören zum festen Produktangebot des Unternehmens.	Mit Smart Products wird mehr als 25% des Gesamtumsatzes erzielt.	Mit Smart Products wird mehr als 50% des Gesamtumsatzes erzielt.

Tabelle 4.61 Reifegradmerkmale Smart Products (Geschäftsmodell)

4.5.3. Smart Services

Der Betrachtungsbereich *Smart Services* dient dazu, den Reifegrad von Smart Services (vgl. Abschnitt 2.2.6.1) anhand ihres Anteils am Gesamtumsatz des Unternehmens zu bewerten. Tabelle 4.62 zeigt die entsprechenden Reifegradmerkmale, beginnend mit Reifegradstufe 0, auf der es noch keine Smart Services gibt. Auf Reifegradstufe 1 werden Smart Services in einem ersten Pilotprojekt getestet. Auf Reifegradstufe 2 werden bei einzelnen Kunden Smart Services zur Erprobung eingesetzt. Auf Reifegradstufe 3 gehören Smart Services zum festen Serviceangebot des Unternehmens. Auf Reifegradstufe 4 werden mit ihnen bereits über 25 Prozent des Gesamtumsatzes erzielt, auf Reifegradstufe 5 über 50 Prozent.

Status von Smart Services (TO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es gibt keine Smart Services.	Smart Services werden in einem ersten Pilotprojekt getestet.	Smart Services werden bei einzelnen Kunden erprobt.	Smart Services gehören zum festen Serviceangebot des Unternehmens.	Mit Smart Services wird mehr als 25% des Gesamtumsatzes erzielt.	Mit Smart Services wird mehr als 50% des Gesamtumsatzes erzielt.

Tabelle 4.62 Reifegradmerkmale Smart Services

4.5.4. Digitale Geschäftsmodelle

Digitale Geschäftsmodelle zeichnen sich durch die vollständige Digitalisierung des Kundenangebots, als auch der Prozesse zur Erbringung des Kundenangebots, aus (vgl. Abschnitt 2.2.6.2). Der Betrachtungsbereich *Digitale Geschäftsmodelle* dient dazu, den Reifegrad der digitaler Geschäftsmodelle anhand ihres Anteils am Gesamtumsatz des Unternehmens zu bewerten. Tabelle 4.63 zeigt die entsprechenden Reifegradmerkmale, beginnend mit Reifegradstufe 0, auf der es noch keine digitalen Geschäftsmodelle gibt. Auf Reifegradstufe 1 werden digitale Geschäftsmodelle in einem ersten Pilotprojekt getestet. Auf Reifegradstufe 2 werden bei einzelnen Kunden digitale Geschäftsmodelle zur Erprobung eingesetzt. Auf Reifegradstufe 3 gehören digitale Geschäftsmodelle zum festen Leistungsangebot des Unternehmens. Auf Reifegradstufe 4 werden mit ihnen bereits über 25 Prozent des Gesamtumsatzes erzielt, auf Reifegradstufe 5 über 50 Prozent.

Status von digitalen Geschäftsmodellen (TO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es gibt kein digitales Geschäftsmodell.	Ein digitales Geschäftsmodell wird in einem ersten Pilotprojekt getestet.	Ein digitales Geschäftsmodell wird bei einzelnen Kunden erprobt.	Ein oder mehrere digitale Geschäftsmodelle gehören zum festen Leistungsangebot des Unternehmens.	Mit digitalen Geschäftsmodellen wird mehr als 25% des Gesamtumsatzes erzielt.	Mit digitalen Geschäftsmodellen wird mehr als 50% des Gesamtumsatzes erzielt.

Tabelle 4.63 Reifegradmerkmale Status digitaler Geschäftsmodelle

4.5.5. Digitale Plattformen

Die Nutzung digitaler Plattformen bietet den teilnehmenden Unternehmen die Möglichkeit, Produkte bzw. Services anzubieten beziehungsweise nachzufragen und dabei Potenziale, wie Effizienzsteigerungen durch reduzierte Transaktionskosten und Netzwerk- bzw. Skaleneffekte durch mehr Nutzen für den Einzelnen bei vielen Nutzern insgesamt, zu erzielen (vgl. Abschnitt 2.2.6.3). Der Betrachtungsbereich *Digitale Plattformen* dient dazu, den Reifegrad digitaler Plattformen anhand ihres Anteils am Gesamtumsatz des Unternehmens zu bewerten. Dies erfolgt anhand der folgenden Bewertungskriterien:

1. Nutzung fremder Plattformen
2. Bereitstellung einer eigenen Plattform

Nutzung fremder Plattformen

Fremde Plattformen sind Plattformen eines anderen Plattformbetreibers (vgl. Abschnitt 2.2.6.3). Tabelle 4.64 zeigt die Reifegradmerkmale der Nutzung fremder Plattformen, beginnend mit Reifegradstufe 0, auf der noch keine Plattformen genutzt werden. Auf Reifegradstufe 1 werden fremde Plattformen in einem ersten Pilotprojekt getestet. Auf Reifegradstufe 2 werden eine oder mehrere fremde Plattformen zur Erprobung eingesetzt. Auf Reifegradstufe 3 gehören die über digitale Plattformen bereitgestellten Produkte und Services zum festen Leistungsangebot des Unternehmens. Auf Reifegradstufe 4 werden mit ihnen bereits über 25 Prozent des Gesamtumsatzes erzielt, auf Reifegradstufe 5 über 50 Prozent.

Nutzung fremder Plattformen (TO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es werden keine digitalen Plattformen genutzt.	Eine oder mehrere digitale Plattformen werden in einem ersten Pilotprojekt getestet.	Eine oder mehrere digitale Plattformen werden zur Erprobung eingesetzt.	Über digitale Plattformen bereitgestellte Produkte und Services gehören zum festen Leistungsangebot des Unternehmens.	Auf digitalen Plattformen wird mehr als 25% des Gesamtumsatzes erzielt.	Auf digitalen Plattformen wird mehr als 50% des Gesamtumsatzes erzielt.

Tabelle 4.64 Reifegradmerkmale der Nutzung fremder Plattformen

Bereitstellung einer eigenen Plattform

Alternativ zur Nutzung fremder Plattformen bietet sich auch die Bereitstellung einer eigenen Plattform an (vgl. Abschnitt 2.2.6.3). Tabelle 4.65 zeigt die Reifegradmerkmale der Bereitstellung einer eigenen Plattform, beginnend mit Reifegradstufe 0, auf der noch keine Plattform bereitgestellt wird. Auf Reifegradstufe 1 wird eine eigene Plattform entwickelt bzw. auf Basis von Technologiebausteinen oder einer Whitelabel-Plattform bereitgestellt. Auf Reifegradstufe 2 wird die eigene Plattform erprobt. Auf Reifegradstufe 3 gehören die über eine eigene Plattform bereitgestellten Produkte und Services zum festen Leistungsangebot des Unternehmens. Auf Reifegradstufe 4 werden mit der eigenen Plattform bereits über 25 Prozent des Gesamtumsatzes erzielt, auf Reifegradstufe 5 über 50 Prozent.

Bereitstellung einer eigenen Plattform (TO)					
Reifegradstufe 0 Ausgangsbasis	Reifegradstufe 1 Transparenz	Reifegradstufe 2 Reaktionsfähigkeit / Assistenz	Reifegradstufe 3 Vernetzung / Dezentralisierung	Reifegradstufe 4 Prognosefähigkeit	Reifegradstufe 5 Selbstorganisation / Autonomie
Es wird keine eigene digitale Plattform bereitgestellt.	Eine eigene Plattform wird entwickelt bzw. auf Basis von Technologiebausteinen oder Whitelabel-Plattformen bereitgestellt.	Die eigene Plattform wird erprobt.	Über die eigene Plattform bereitgestellten Produkte und Services gehören zum festen Leistungsangebot des Unternehmens.	Auf der eigenen digitalen Plattform wird mehr als 25% des Gesamtumsatzes erzielt.	Auf der eigenen digitalen Plattform wird mehr als 50% des Gesamtumsatzes erzielt.

Tabelle 4.65 Reifegradmerkmale der Bereitstellung einer eigenen Plattform

4.6. Der Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)

Der Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI) aggregiert die vier Einzelindizes

- Smart Factory Maturity Index (SFMI)
- Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI)
- Smart Products & Life Cycle Maturity Index (PLCMI)
- New Business Maturity Index (NBMI)

zu einem Gesamtindex, wie in Tabelle 4.66 und in Abschnitt 4.1 dargestellt. Damit ist der OI4MI ein Maß für die Gesamt-Industrie 4.0-Reife des Unternehmens entsprechend der in den Umsetzungsempfehlungen für Industrie 4.0 beschriebenen vier Handlungsbereiche (vgl. Abschnitt 1.1). Durch die gleichzeitige Aggregation der Soll-Indizes und Prioritäten aus den darunterliegenden Betrachtungsbereichen der vier Einzelindizes erlaubt die Systematik des OI4MI-Kennzahlensystems eine einfache Status Quo Bewertung, Zieldefinition, Priorisierung und Zielverfolgung (vgl. Abbildung 4.4).

Industrie 4.0 Reifegrad	IST	SOLL	Priorität
Smart Factory Maturity Index (SFMI)	33%	51%	2,3
Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI),	23%	46%	2,5
Smart Products & Life Cycle Maturity Index (PLCMI)	17%	36%	2,1
New Business Maturity Index (NBMI)	16%	34%	1,8
Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)	22%	42%	2,2

Tabelle 4.66 Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)

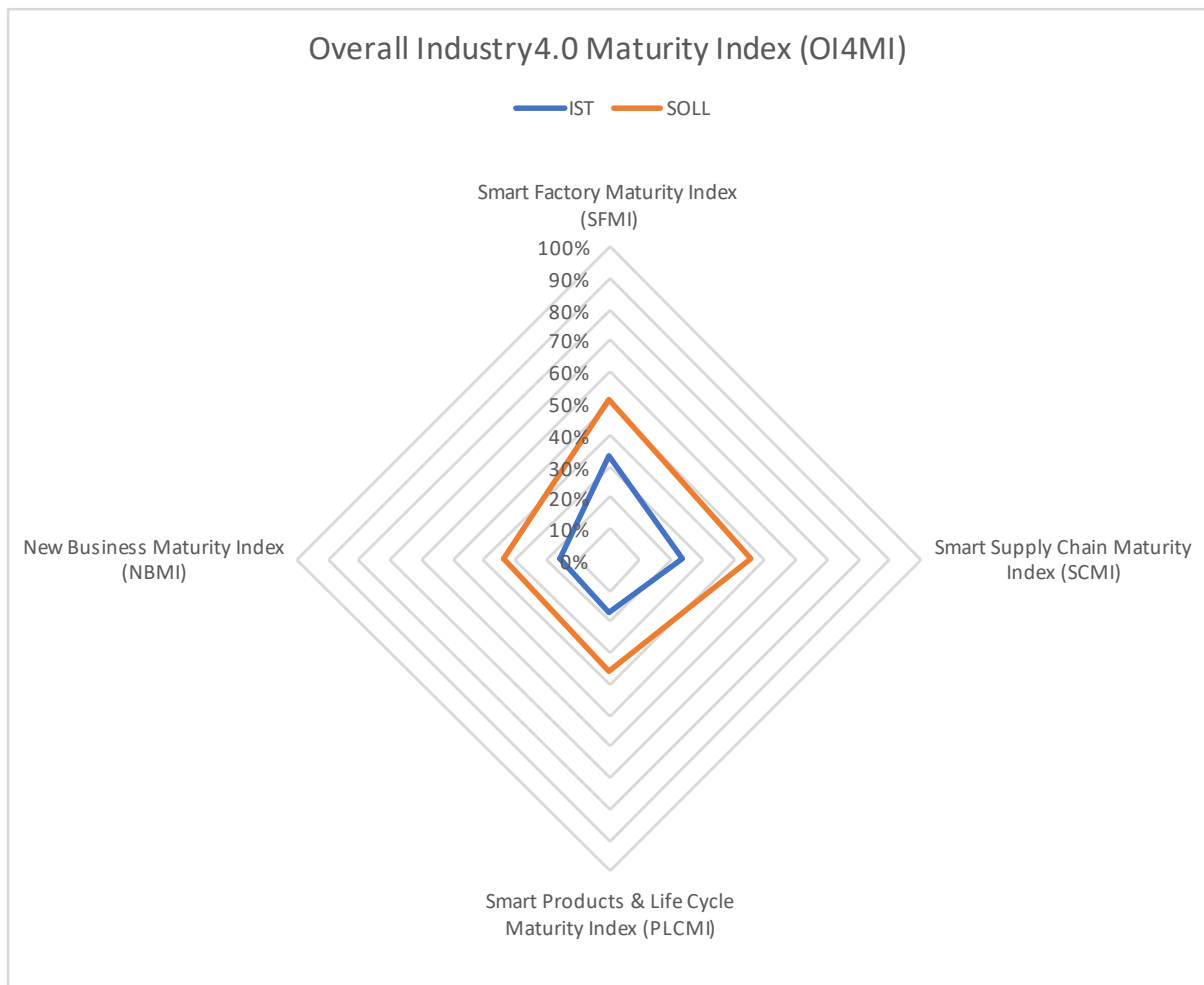


Abbildung 4.4 Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI) - grafische Zielverfolgung

4.7. Praktische Anwendung des Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)

Der OI4MI kann grundsätzlich im Rahmen eines Self-Assessment Workshops durch ein KMU oder einen mittelständischen Betrieb ermittelt werden. In diesem Abschnitt werden einige wichtige Hinweise zur Vorbereitung und Durchführung eines solchen Assessments sowie zur praktischen Anwendung des OI4MI gegeben.

Vorbereitung des Assessments

Zur Vorbereitung des Assessments sollten alle Teilnehmer im Rahmen eines Kick-Off Meetings auf ein einheitliches Grundverständnis bezüglich Industrie 4.0 gebracht werden. Ideal ist eine inhouse Schulung durch einen erfahrenen Trainer. Teilnehmen sollten an dem Kick-Off

Termin sowie an dem Assessment Vertreter aus allen relevanten Abteilungen (vgl. Betrachtungsbereiche des OI4MI), die Fragen zu Unternehmensstrategie, Organisation, Prozessen, eingesetzten IT-Systemen und Fragen der Mitarbeiterqualifikation beantworten können.

Durchführung des Assessments

Die Durchführung der Reifegradbewertung sollte in einem oder mehreren Terminen im oben beschriebenen interdisziplinären Team erfolgen, da viele Fragen nur gemeinsam beantwortet werden können und da die Beschäftigung mit den Fragen auch eine gute Weiterbildung darstellt. Es wird empfohlen, direkt nach der Ermittlung der IST-Reife eines Bewertungskriteriums auch eine für das Unternehmen erstrebenswerte SOLL-Reife auszuwählen und die jeweilige Priorität festzulegen (vgl. Abbildung 4.2). Daraus resultiert eine deutlich bessere Verwertbarkeit der Ergebnisse im Anschluss an das Assessment.

Vorstellung der Ergebnisse und Ableitung von Maßnahmen

Im Nachgang zum Assessment sollten die wesentlichen Erkenntnisse noch einmal im gesamten Team und der Geschäftsführung diskutiert werden und erste Maßnahmen abgeleitet werden. Eine wesentliche Maßnahme im Rahmen eines erfolgreichen Change Managements ist die Ableitung einer geeigneten Transformationsstrategie für das Unternehmen (vgl. Abschnitt 2.2.3.12).

Umsetzung der Maßnahmen

Die eigentliche Umsetzung der Maßnahmen ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Diese erfolgt entsprechend der Systematik von Vorgehensmodellen (vgl. Tabelle 1.4). Ein regelmäßig aktualisierter OI4MI kann den Transformationsprozess des Unternehmens als zentrale Kennzahl begleiten und damit den Plan-Do-Check-Act (PDCA) Regelkreis als Kennzahl unterstützen.

5. Anwendung und Validierung des Industrie 4.0 Reifegradindex

Nach dem Design und der Entwicklung eines Artefakts eines neuen Industrie 4.0 Reifegradindex und -modells in Kapitel 4 folgen nun in Kapitel 5 die Prozessschritte „Demonstration“ und „Evaluation“ des DSRM Prozessmodells (vgl. Abschnitt 1.4). Das DSRM Modell sieht in diesen beiden Prozessschritten eine prototypische Anwendung des Artefakts vor. Dabei ist das Artefakt hinsichtlich der Lösung bisheriger Probleme („Use artifact to solve problem“) sowie hinsichtlich der Effektivität und Effizienz („Observe how effective, efficient“) der Anwendung zu überprüfen (vgl. Abbildung 1.1). Hierzu werden zunächst in Abschnitt 5.1 die Ziele und der Ablauf der Validierung beschrieben, bevor der neue Reifegradindex in Abschnitt 5.3 prototypisch angewendet und überprüft wird. Kapitel 5 schließt mit einer Zusammenfassung der Validierungsergebnisse in Abschnitt 5.4.

5.1. Zielsetzung und Vorgehensweise

In der Evaluierungsphase von Reifegradmodellen unterscheidet Mettler (2011, S. 92) zwischen der *Verifizierung* und der *Validierung*. Die *Verifizierung* eines Reifegradmodells definiert er als einen Prozess, in dem geprüft wird, ob das Modell die Anforderungen des Entwicklers erfüllt (ebd.). Als *Validierung* definiert er die Genauigkeit, mit der ein Reifegradmodell die reale Welt repräsentiert (ebd.).

Beim Design und der Entwicklung des neuen Reifegradindex und -modells wurde bereits verifiziert, dass die in Abschnitt 3.1 beschriebenen allgemeinen Anforderungen an Reifegradmodelle sowie die Abdeckung der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Handlungsbereiche von Industrie 4.0 erfüllt sind. Das Ziel der in Kapitel 5 beschriebenen Validierung besteht daher in der Überprüfung, wie gut der entwickelte Reifegradindex und das zugrunde liegende Reifegradmodell die reale Welt repräsentieren (s.o.) und wie gut damit der für die Zielgruppe angestrebte Nutzen bewirkt wird (Knackstedt, et al., 2009, S. 543).

Als Zielgruppen wurden in den Abschnitten 1.3 und 3.2 produzierende KMU und Mittelstand aller Branchen mit einer mehrstufigen diskreten Fertigung und die Wissenschaft definiert. Der angestrebte Nutzen für die Zielgruppe KMU und Mittelstand wurde in den Abschnitten 1.3 und 3.2 wie folgt beschrieben:

- Bewertung des Status Quo auf dem Weg zu Industrie 4.0 in einem Self-Assessment
- Definition von Zielen und Ableitung von Maßnahmen für einen höheren Grad der Reife
- Fortschrittskontrolle der Transformation in Richtung Industrie 4.0

- Schulung von Beschäftigten

Als Nutzen für die Zielgruppe Wissenschaft wurde in den Abschnitten 1.3 und 3.2 die Verfügbarkeit einer umfassenden Systematik für ein Industrie 4.0 Reifegradmodell als wissenschaftliches Framework für darauf aufbauende Folgearbeiten beschrieben. Dieser Punkt wird im Rahmen dieser Arbeit nicht explizit validiert. Im Fall einer positiven Validierung des Reifegradmodells bei der Zielgruppe KMU und Mittelstand wären Folgearbeiten jedoch wünschenswert (vgl. Abschnitt 6.3).

Zur Validierung bei der Zielgruppe KMU und Mittelstand wurden folgende Kriterien formuliert, anhand derer jeder Betrachtungsbereich (z.B. Produktion, Intralogistik) der vier Teilmodelle Smart Factory Maturity Index (SFMI), Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI), Smart Products & Life Cycle Maturity Index (PLCMI) und New Business Maturity Index (NBMI) untersucht wird :

1. Verständlichkeit und Anwendbarkeit

Mit diesem Kriterium wird geprüft, wie gut es der Zielgruppe gelingt, ihren Status Quo anhand der Bewertungskriterien und Reifegradmerkmale selbst zu bestimmen. Rückfragen würden darauf schließen lassen, dass die reale Welt nicht klar repräsentiert wird und dass das Modell weder effektiv noch effizient ist.

2. Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen

Mit diesem Kriterium wird geprüft, ob die Zielgruppe in höheren Reifegradstufen einen erstrebenswerten Nutzen erkennt und wie hoch dieser priorisiert wird.

3. Bandbreite der Reifegradskala

Mit diesem Kriterium wird geprüft, ob die gewählte Bandbreite der Reifegradskala der realen Welt entspricht. Hierzu wird geprüft, wie gut sich die IST- und SOLL-Reifegradstufen des Unternehmens auf der Reifegradskala verteilen. Eine Konzentration der Bewertung auf nur ein oder zwei Reifegradstufen würde eventuell auf eine zu geringe Differenzierung zwischen den Reifegradstufen hinweisen.

Zur Validierung wurde zunächst ein prototypischer Demonstrator des Reifegradmodells entwickelt. Er besteht aus den o.g. vier Teilbereichen Smart Factory Maturity Index (SFMI), Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI), Smart Products & Life Cycle Maturity Index (PLCMI) und New Business Maturity Index (NBMI) sowie einem Bereich zur Berechnung des Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI). Der Demonstrator wurde dem Unternehmen zur Anwendung überlassen. Die Details des Ablaufs sowie die jeweiligen Ergebnisse sind in Abschnitt 5.3 beschrieben.

5.2. Das betrachtete Unternehmen

Das zur Validierung ausgewählte Unternehmen möchte aus Wettbewerbsgründen anonym bleiben. Die Beschreibung des Unternehmens erfolgt daher ohne Details, die Rückschlüsse auf das Unternehmen zulassen würden. Auf diese Weise konnte auf einen Sperrvermerk für diese Arbeit verzichtet werden. Das in Deutschland ansässige Unternehmen ist Hersteller von Hydraulikhämmern. Diese werden zum Abriss von Gebäuden als hydraulisches Werkzeug an Baggern betrieben. Im Unternehmen arbeiten insgesamt etwa 200 Beschäftigte, davon etwa 140 in der Produktion. Die Produktion ist nach dem Werkstattprinzip organisiert. Abbildung 5.1 zeigt den schematischen Produktionsprozess.



Abbildung 5.1 Schematischer Produktionsprozess für Hydraulikhämmer

In der Zerspanung werden zunächst die Rohgehäuse bearbeitet und andere Bauteile hergestellt. Je nach Bauteil ist im nächsten Schritt eine Warmbehandlung erforderlich. In der Schleiferei werden die Bauteile anschließend weiterbearbeitet, bevor sie in der Montage zusammen mit weiteren Baugruppen (z.B. Hydraulik) montiert werden. Nach einem Testlauf werden die Hydraulikhämmer lackiert und anschließend in der Endmontage fertiggestellt. Die Lagerung und Distribution erfolgen durch einen externen Dienstleister.

Das Unternehmen ist für die Validierung sehr gut geeignet, da es über eine mehrstufige, diskrete Produktion verfügt (vgl. Zielgruppe in den Abschnitten 1.3 und 3.2). Mit den Hydraulikhämmern verfügt das Unternehmen zudem über ein interessantes Produkt, das beim Kunden mehrere Jahre im Einsatz ist und einer regelmäßigen Wartung unterliegt. Insofern eignet sich ein Hydraulikhämmer prinzipiell für eine Weiterentwicklung zum Smart Product, das während seines Lebenszyklus Daten erfasst. Auf Basis dieser Daten könnten dann datenbasierte Geschäftsmodelle angeboten werden. Aufgrund dieses Potenzials war das Unternehmen selbst sehr an der Analyse des Industrie 4.0 Reifegrads in allen vier Bereichen Smart Factory, Smart Supply Chain, Smart Product & Produktlebenszyklus und neue Geschäftsmodelle interessiert.

5.3. Testanwendung: Ermittlung des Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)

Die Ermittlung des Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI) mit Hilfe des Demonstrators erfolgte durch den Geschäftsführer des Unternehmens. Auf die Einbindung weiterer Beschäftigter aus anderen Abteilungen (vgl. Abschnitt 4.7) konnte in diesem Fall verzichtet werden, da

der Geschäftsführer zuvor mehrere Jahre die Produktion und ein umfassendes Effizienzprojekt des gesamten Unternehmens leitete, wodurch er die gesamte Organisation, Prozesse und IT-Landschaft sehr gut kennt. Nach einer kurzen Einweisung in den Demonstrator zu Beginn des Assessments bewertete der Geschäftsführer die Reifegrade der insgesamt 59 Kriterien des Demonstrators. Während der Bewertung der Reifegrade konnten jederzeit Rückfragen an den Autor gestellt werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse je Teilindex kurz vorgestellt und die einzelnen Betrachtungsbereiche hinsichtlich der oben beschriebenen drei Kriterien

1. Verständlichkeit und Anwendbarkeit
2. Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen
3. Bandbreite der Reifegradskala

bewertet. Der Demonstrator mit den vollständigen Reifegradbewertungen und Ergebnissen ist im Anhang abgebildet.

5.3.1. Ermittlung des Smart Factory Maturity Index (SFMI)

Die Bewertung des Reifegrads der insgesamt 38 Bewertungskriterien des SFMI ergab die in Tabelle 5.1 dargestellten Ergebnisse je Betrachtungsbereich.

Betrachtungsbereich	IST	SOLL	Priorität
Unternehmen	27%	56%	2,2
Entwicklung	43%	60%	1,5
Produktion	20%	51%	1,4
Produktionsplanung und -steuerung	33%	60%	3,0
Intralogistik	12%	40%	1,0
Instandhaltungsmanagement	13%	80%	3,0
Werkzeugmanagement	40%	60%	1,0
Qualitätsmanagement	20%	50%	2,0
Smart Factory Maturity Index (SFMI)	26%	57%	1,9

Tabelle 5.1 Ergebnisse des Smart Factory Assessments (Reifegrad IST/SOLL und Priorisierung)

Der aktuelle SFMI beträgt 26 Prozent, der angestrebte Zielreifegrad beträgt 57 Prozent. Die Verbesserung wird mit einer Priorität von 1,9 (wichtig) bewertet. Abbildung 5.2 zeigt das grafische Profil des Smart Factory Reifegrads. Zu den derzeit reifsten Betrachtungsbereichen gehört mit 43 Prozent die „Entwicklung“, gefolgt vom „Werkzeugmanagement“ mit 40 Prozent sowie der „Produktionsplanung und -steuerung“ mit 33 Prozent. Der mit Abstand höchste Zielreifegrad ist beim „Instandhaltungsmanagement“ geplant. Hier wird eine Reife von 80 Prozent mit einer als „sehr wichtig“ bewerteten Priorität angestrebt.

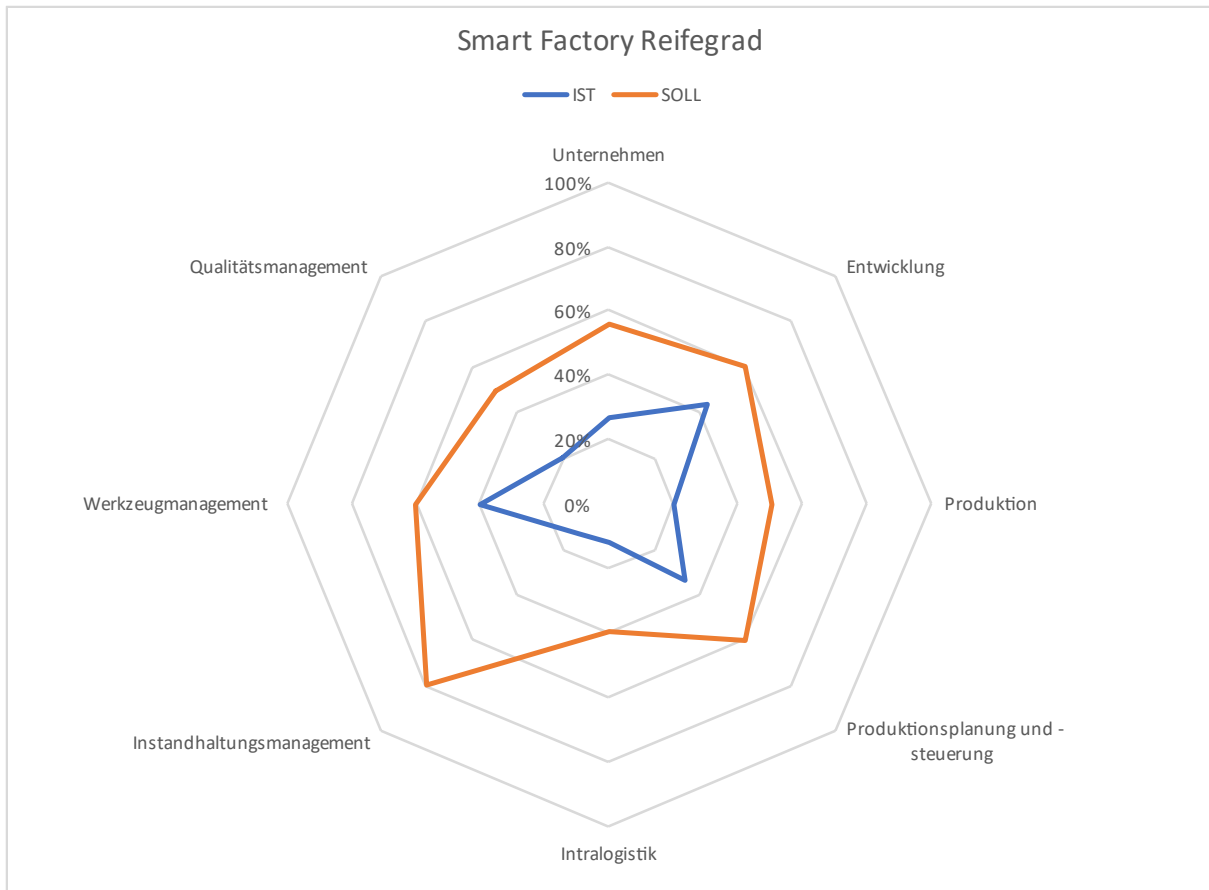


Abbildung 5.2 Grafisches Profil des Smart Factory Reifegrads

Die Ergebnisse zeigen durch die breite durchschnittliche Verteilung der Reifegrade auf der Reifegradskala und durch die durchschnittliche Bewertungsdauer von zwei Minuten je Bewertungskriterium eine prinzipiell gute Anwendbarkeit des Index. Die hohe Differenz zwischen SOLL-Reifegrad (57 Prozent) und IST-Reifegrad (26 Prozent) in Verbindung mit der hohen Priorisierung (wichtig) zeigt einen Nutzen der höheren Reifegradstufen. Im Folgenden werden die Betrachtungsbereiche einzeln hinsichtlich der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Kriterien der Validierung betrachtet.

Unternehmen

Die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Reifegradmodells im Betrachtungsbereich „Unternehmen“ ist gut. Der Status Quo konnte anhand von neun Bewertungskriterien ohne inhaltliche Rückfragen mit Reifegraden zwischen 1 und 3 bewertet und damit ein durchschnittlicher IST-Reifegrad von 27 Prozent ermittelt werden.

Die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Die SOLL-Reifegrade wurden mit Werten zwischen 2 und 4 bewertet, woraus sich ein durchschnittlicher SOLL-Reifegrad von 56 Prozent ergibt. Die Priorisierung der Verbesserungen wurde mit Werten zwischen 1 (weniger wichtig) und 3 (sehr wichtig) bewertet, woraus sich eine durchschnittliche

Priorisierung von 2,2 (wichtig) ergibt. Damit können wichtige Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Die *Bandbreite der Reifegradskala* ist gut dimensioniert. Die Werte liegen zwischen 1 und 4 auf der von 0 bis 5 reichenden Skala.

Entwicklung

Die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Reifegradmodells im Betrachtungsbereich „Entwicklung“ ist gut. Der Status Quo konnte anhand von sechs Bewertungskriterien ohne inhaltliche Rückfragen mit Reifegraden zwischen 1 und 3 bewertet und damit ein durchschnittlicher IST-Reifegrad von 43 Prozent ermittelt werden.

Die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Die SOLL-Reifegrade wurden mit Werten zwischen 2 und 4 bewertet, woraus sich ein durchschnittlicher SOLL-Reifegrad von 60 Prozent ergibt. Die Priorisierung der Verbesserungen wurde mit Werten zwischen 0 (unwichtig) und 3 (sehr wichtig) bewertet, woraus sich eine durchschnittliche Priorisierung von 1,5 (weniger wichtig bis wichtig) ergibt. Damit können wichtige Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden. Lediglich im Bereich der Fertigungsplanung wurde kein Nutzen gegenüber dem aktuellen Reifegrad 2 gesehen. Begründet wurde dies mit den geringen Prozess- und Layoutveränderungen, die es in der Produktion gibt.

Die *Bandbreite der Reifegradskala* ist gut dimensioniert. Die Werte liegen zwischen 1 und 4 auf der von 0 bis 5 reichenden Skala.

Produktion

Die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Reifegradmodells im Betrachtungsbereich „Produktion“ ist gut. Der Status Quo konnte anhand von neun Bewertungskriterien ohne inhaltliche Rückfragen mit Reifegraden zwischen 0 und 2 bewertet und damit ein durchschnittlicher IST-Reifegrad von 20 Prozent ermittelt werden.

Die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Die SOLL-Reifegrade wurden mit Werten zwischen 2 und 4 bewertet, woraus sich ein durchschnittlicher SOLL-Reifegrad von 51 Prozent ergibt. Die Priorisierung der Verbesserungen wurde mit Werten zwischen 0 (unwichtig) und 3 (sehr wichtig) bewertet, woraus sich eine durchschnittliche Priorisierung von 1,4 (weniger wichtig bis wichtig) ergibt. Damit können wichtige Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden. Lediglich im Bereich der Maschinen und Anlagen wurde kein Nutzen gegenüber dem aktuellen Reifegrad 2 gesehen. Begründet wurde dies mit dem nicht klaren Nutzen einer Maschine-zu-Maschine (M2M) Kommunikation.

Die *Bandbreite der Reifegradskala* ist gut dimensioniert. Die Werte liegen zwischen 0 und 4 auf der von 0 bis 5 reichenden Skala.

Produktionsplanung und -steuerung

Die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Reifegradmodells im Betrachtungsbereich „Produktionsplanung und -steuerung“ ist gut. Der Status Quo konnte anhand von drei Bewertungskriterien ohne inhaltliche Rückfragen mit Reifegraden zwischen 1 und 2 bewertet und damit ein durchschnittlicher IST-Reifegrad von 33 Prozent ermittelt werden.

Die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Die SOLL-Reifegrade wurden alle mit 3 bewertet, woraus sich ein durchschnittlicher SOLL-Reifegrad von 60 Prozent ergibt. Die Priorisierung der Verbesserungen wurde überall mit 3 (sehr wichtig) bewertet, woraus sich eine durchschnittliche Priorisierung von 3 (sehr wichtig) ergibt. Damit können sehr wichtige Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Die Bandbreite der Reifegradskala ist gut dimensioniert. Die Werte liegen zwischen 1 und 3 auf der von 0 bis 5 reichenden Skala.

Intralogistik

Die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Reifegradmodells im Betrachtungsbereich „Intralogistik“ ist gut. Der Status Quo konnte anhand von fünf Bewertungskriterien ohne inhaltliche Rückfragen mit Reifegraden zwischen 0 und 1 bewertet und damit ein durchschnittlicher IST-Reifegrad von 12 Prozent ermittelt werden.

Die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Die SOLL-Reifegrade wurden alle mit 2 bewertet, woraus sich ein durchschnittlicher SOLL-Reifegrad von 40 Prozent ergibt. Die Priorisierung der Verbesserungen wurde überall mit 1 (weniger wichtig) bewertet, woraus sich eine durchschnittliche Priorisierung von 1 (weniger wichtig) ergibt. Damit können im Bereich der Intralogistik Verbesserungen aufgezeigt werden, die jedoch nicht als wichtig bewertet wurden. Begründet wurde das mit den lang laufenden Bearbeitungszeiten an den Maschinen und in der Montage, wodurch kurze Intralogistikaktivitäten vergleichsweise weniger bedeutend sind.

Die *Bandbreite der Reifegradskala* ist gut dimensioniert. Die Werte liegen zwischen 0 und 2 auf der von 0 bis 5 reichenden Skala.

Instandhaltungsmanagement

Die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Reifegradmodells im Betrachtungsbereich „Instandhaltungsmanagement“ ist gut. Der Status Quo konnte anhand von drei Bewertungskriterien ohne inhaltliche Rückfragen mit Reifegraden zwischen 0 und 1 bewertet und damit ein durchschnittlicher IST-Reifegrad von 13 Prozent ermittelt werden.

Die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Die SOLL-Reifegrade wurden alle mit 4 bewertet, woraus sich ein durchschnittlicher SOLL-Reifegrad von 80 Prozent ergibt. Die Priorisierung der Verbesserungen wurde überall mit 3 (sehr wichtig) bewertet, woraus sich eine durchschnittliche Priorisierung von 3 (sehr wichtig) ergibt. Damit können sehr wichtige Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Die *Bandbreite der Reifegradskala* ist gut dimensioniert. Die Werte liegen zwischen 0 und 4 auf der von 0 bis 5 reichenden Skala.

Werkzeugmanagement

Die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Reifegradmodells im Betrachtungsbereich „Werkzeugmanagement“ ist gut. Der Status Quo konnte anhand von zwei Bewertungskriterien ohne inhaltliche Rückfragen mit Reifegraden zwischen 1 und 3 bewertet und damit ein durchschnittlicher IST-Reifegrad von 40 Prozent ermittelt werden.

Die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Die SOLL-Reifegrade wurden alle mit 3 bewertet, woraus sich ein durchschnittlicher SOLL-Reifegrad von 60 Prozent ergibt. Die Priorisierung der Verbesserungen wurde mit 0 (unwichtig) bzw. 2 (wichtig) bewertet, woraus sich eine durchschnittliche Priorisierung von 1,0 (weniger wichtig) ergibt. Damit konnte eine wichtige Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden. Im Bereich der Assistenz für das Werkzeugmanagement konnte gegenüber dem aktuellen Reifegrad 3 kein weiterer Nutzen in der nächsten Reifegradstufe gesehen werden. Begründet wurde dies mit den sehr guten Funktionalitäten der aktuell eingesetzten Toolmanagement Software.

Die *Bandbreite der Reifegradskala* ist gut dimensioniert. Die Werte liegen zwischen 1 und 3 auf der von 0 bis 5 reichenden Skala.

Qualitätsmanagement

Die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Reifegradmodells im Betrachtungsbereich „Qualitätsmanagement“ ist gut. Der Status Quo konnte anhand von zwei Bewertungskriterien ohne inhaltliche Rückfragen mit dem Reifegrad 1 bewertet werden und damit ein durchschnittlicher IST-Reifegrad von 20 Prozent ermittelt werden.

Die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Die SOLL-Reifegrade wurden mit Werten zwischen 2 und 3 bewertet, woraus sich ein durchschnittlicher SOLL-Reifegrad von 50 Prozent ergibt. Die Priorisierung der Verbesserungen wurde überall mit 2 (wichtig) bewertet, woraus sich eine durchschnittliche Priorisierung von 2 (wichtig) ergibt. Damit können wichtige Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Die *Bandbreite der Reifegradskala* ist gut dimensioniert. Die Werte liegen zwischen 1 und 3 auf der von 0 bis 5 reichenden Skala.

5.3.2. Ermittlung des Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI)

Die Bewertung des Reifegrads der insgesamt sieben Bewertungskriterien des SCMI ergab die in Tabelle 5.2 dargestellten Ergebnisse je Betrachtungsbereich.

Betrachtungsbereich	IST	SOLL	Priorität
Unternehmen	27%	67%	1,7
Echtzeitstatus und Tracking	n.a.	n.a.	n.a.
Planung, Steuerung und Überwachung	40%	70%	1,5
Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI)	33%	68%	1,6

Tabelle 5.2 Ergebnisse des Smart Supply Chain Assessments (Reifegrad IST/SOLL und Priorisierung)

Der aktuelle SCMI beträgt 33 Prozent, der angestrebte Zielreifegrad beträgt 68 Prozent. Die Verbesserung wird mit einer Priorität von 1,6 (wichtig) bewertet. Abbildung 5.3 zeigt das grafische Profil des Smart Supply Chain Reifegrads. Der derzeit reifste Betrachtungsbereich ist mit 40 Prozent die „Planung, Steuerung und Überwachung“, gefolgt vom „Unternehmen“ mit 27 Prozent. Als Zielreifegrade wird bei beiden Betrachtungsbereichen eine Reife von rund 70 Prozent mit einer als „wichtig“ bewerteten Priorität angestrebt. Der Betrachtungsbereich „Echtzeitstatus und Tracking“ konnte nicht angewendet werden, da das Unternehmen den kompletten Bereich der Logistik an einen externen Dienstleister ausgelagert hat.

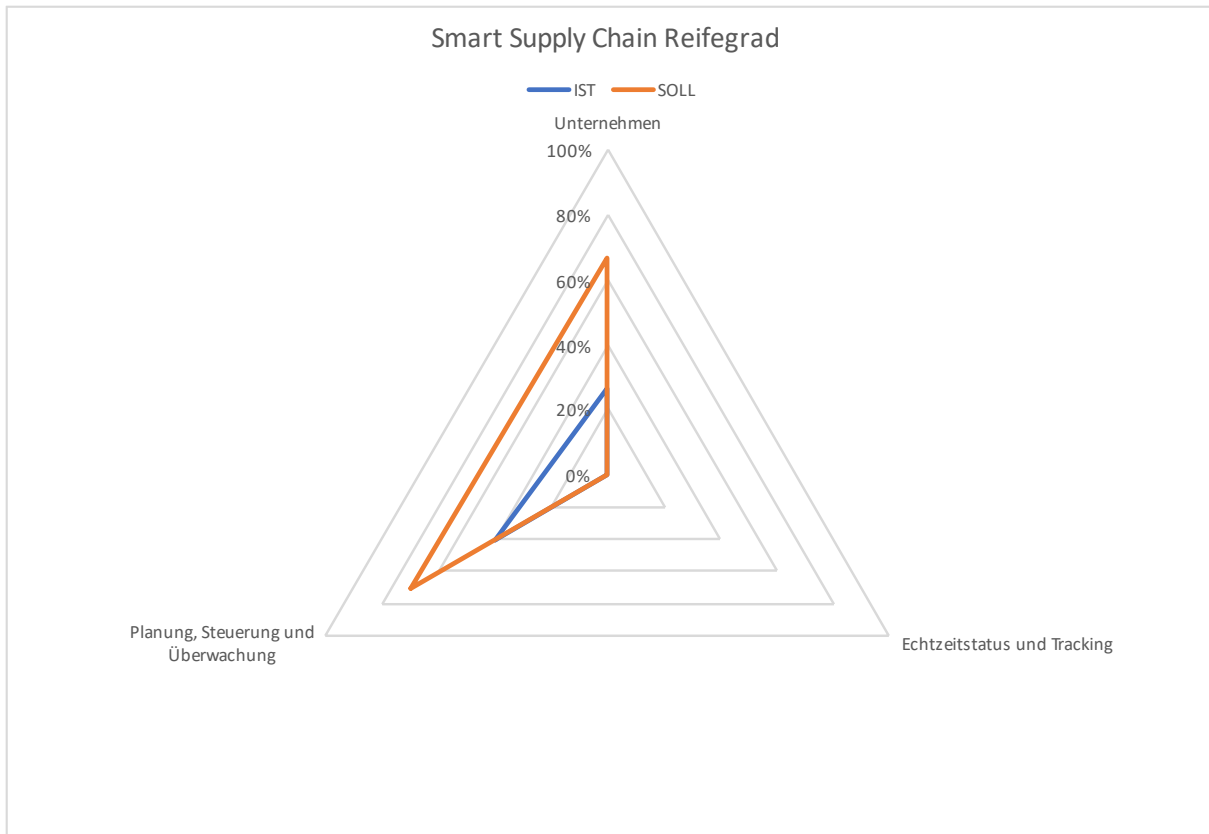


Abbildung 5.3 Grafisches Profil des Smart Supply Chain Reifegrads

Die Ergebnisse zeigen durch die breite durchschnittliche Verteilung der Reifegrade auf der Reifegradskala und durch die durchschnittliche Bewertungsdauer von zwei Minuten je Bewertungskriterium eine prinzipiell gute Anwendbarkeit des Index. Die hohe Differenz zwischen SOLL-Reifegrad (68 Prozent) und IST-Reifegrad (33 Prozent) in Verbindung mit der hohen Priorisierung (wichtig) zeigt einen Nutzen der höheren Reifegradstufen. Im Folgenden werden die Betrachtungsbereiche einzeln hinsichtlich der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Kriterien der Validierung betrachtet.

Unternehmen

Die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Reifegradmodells im Betrachtungsbereich „Unternehmen“ ist gut. Der Status Quo konnte anhand von drei Bewertungskriterien ohne inhaltliche Rückfragen mit Reifegraden zwischen 0 und 3 bewertet und damit ein durchschnittlicher IST-Reifegrad von 27 Prozent ermittelt werden.

Die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Die SOLL-Reifegrade wurden mit Werten zwischen 3 und 4 bewertet, woraus sich ein durchschnittlicher SOLL-

Reifegrad von 67 Prozent ergibt. Die Priorisierung der Verbesserungen wurde mit Werten zwischen 1 (weniger wichtig) und 2 (wichtig) bewertet, woraus sich eine durchschnittliche Priorisierung von 1,7 (wichtig) ergibt. Damit können wichtige Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Die *Bandbreite der Reifegradskala* ist gut dimensioniert. Die Werte liegen zwischen 0 und 4 auf der von 0 bis 5 reichenden Skala.

Echtzeitstatus und Tracking

Der Betrachtungsbereich „Echtzeitstatus und Tracking“ konnte nicht angewendet werden, da das Unternehmen den kompletten Bereich der Logistik an einen externen Dienstleister ausgelagert hat (s.o.).

Planung, Steuerung und Überwachung

Die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Reifegradmodells im Betrachtungsbereich „Planung, Steuerung und Überwachung“ ist gut. Der Status Quo konnte anhand von zwei Bewertungskriterien ohne inhaltliche Rückfragen mit einem Reifegrad von 1 bzw. 3 bewertet und damit ein durchschnittlicher IST-Reifegrad von 40 Prozent ermittelt werden.

Die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Die SOLL-Reifegrade wurden mit 3 bzw. 4 bewertet, woraus sich ein durchschnittlicher SOLL-Reifegrad von 70 Prozent ergibt. Die Priorisierung der Verbesserungen wurde mit Werten zwischen 1 (weniger wichtig) und 2 (wichtig) bewertet, woraus sich eine durchschnittliche Priorisierung von 1,5 (weniger wichtig bis wichtig) ergibt. Damit können wichtige Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Die *Bandbreite der Reifegradskala* ist gut dimensioniert. Die Werte liegen zwischen 1 und 4 auf der von 0 bis 5 reichenden Skala.

5.3.3. Ermittlung des Smart Product & Life Cycle Maturity Index (PLCMI)

Die Bewertung des Reifegrads der insgesamt sieben Bewertungskriterien des PLCMI ergab die in Tabelle 5.3 dargestellten Ergebnisse je Betrachtungsbereich.

Betrachtungsbereich	IST	SOLL	Priorität
Unternehmen	10%	60%	2,0
Smart Products	13%	60%	3,0
Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus	20%	80%	1,0
Smart Product & Life Cycle Maturity Index (PLCMI)	14%	67%	2,0

Tabelle 5.3 Ergebnisse des Smart Product & Life Cycle Assessments (Reifegrad IST/SOLL und Priorisierung)

Der aktuelle PLCMI beträgt 14 Prozent, der angestrebte Zielreifegrad beträgt 67 Prozent. Die Verbesserung wird mit einer Priorität von 2,0 (wichtig) bewertet. Abbildung 5.4 zeigt das grafische Profil des Smart Product & Life Cycle Reifegrads. Der derzeit reifste Betrachtungsbereich ist mit 20 Prozent die „Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus“. Der höchste Zielreifegrad ist ebenfalls im Bereich „Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus“ geplant. Hier wird eine Reife von 80 Prozent mit einer als „wichtig“ bewerteten Priorität angestrebt.

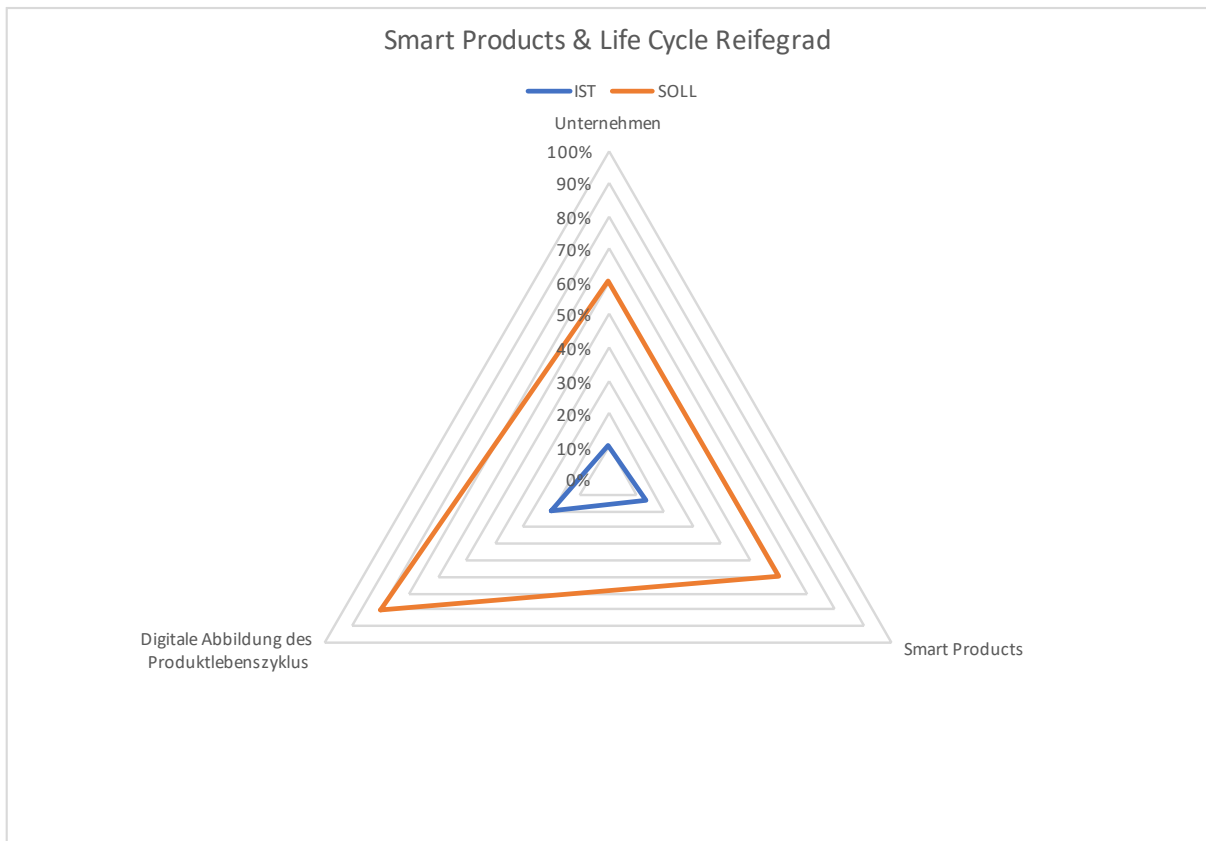


Abbildung 5.4 Grafisches Profil des Smart Product & Life Cycle Reifegrads

Die Ergebnisse zeigen durch die breite durchschnittliche Verteilung der Reifegrade auf der Reifegradskala und durch die durchschnittliche Bewertungsdauer von zwei Minuten je Bewertungskriterium eine prinzipiell gute Anwendbarkeit des Index. Die hohe Differenz zwischen SOLL-Reifegrad (67 Prozent) und IST-Reifegrad (14 Prozent) in Verbindung mit der hohen Priorisierung (wichtig) zeigt einen Nutzen der höheren Reifegradstufen. Im Folgenden werden die Betrachtungsbereiche einzeln hinsichtlich der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Kriterien der Validierung betrachtet.

Unternehmen

Die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Reifegradmodells im Betrachtungsbereich „Unternehmen“ ist gut. Der Status Quo konnte anhand von zwei Bewertungskriterien ohne inhaltliche Rückfragen mit einem Reifegrad von 0 bzw. 1 bewertet und damit ein durchschnittlicher IST-Reifegrad von 10 Prozent ermittelt werden.

Die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Die SOLL-Reifegrade wurden alle mit 3 bewertet, woraus sich ein durchschnittlicher SOLL-Reifegrad von 60 Prozent ergibt. Die Priorisierung der Verbesserungen wurde überall mit 2 (wichtig) bewertet, woraus sich eine durchschnittliche Priorisierung von 2 (wichtig) ergibt. Damit können wichtige Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Die *Bandbreite der Reifegradskala* ist gut dimensioniert. Die Werte liegen zwischen 0 und 3 auf der von 0 bis 5 reichenden Skala.

Smart Products

Die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Reifegradmodells im Betrachtungsbereich „Smart Products“ ist gut. Der Status Quo konnte anhand von drei Bewertungskriterien ohne inhaltliche Rückfragen mit einem Reifegrad von 0 bzw. 1 bewertet und damit ein durchschnittlicher IST-Reifegrad von 13 Prozent ermittelt werden.

Die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Die SOLL-Reifegrade wurden alle mit 3 bewertet, woraus sich ein durchschnittlicher SOLL-Reifegrad von 60 Prozent ergibt. Die Priorisierung der Verbesserungen wurde überall mit 3 (sehr wichtig) bewertet, woraus sich eine durchschnittliche Priorisierung von 3 (sehr wichtig) ergibt. Damit können sehr wichtige Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Die *Bandbreite der Reifegradskala* ist gut dimensioniert. Die Werte liegen zwischen 0 und 3 auf der von 0 bis 5 reichenden Skala.

Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus

Die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Reifegradmodells im Betrachtungsbereich „Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus“ ist gut. Der Status Quo konnte anhand von zwei Bewertungskriterien ohne inhaltliche Rückfragen mit einem Reifegrad von 0 bzw. 2 bewertet und damit ein durchschnittlicher IST-Reifegrad von 20 Prozent ermittelt werden.

Die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Die SOLL-Reifegrade wurden alle mit 4 bewertet, woraus sich ein durchschnittlicher SOLL-Reifegrad von 80

Prozent ergibt. Die Priorisierung der Verbesserungen wurde überall mit 1 (weniger wichtig) bewertet, woraus sich eine durchschnittliche Priorisierung von 1 (weniger wichtig) ergibt. Damit können keine aktuell wichtigen Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden. Begründet wurde dies mit dem Vorrang der Entwicklung von Smart Products (siehe oben). Mittelfristig sei der weitere Ausbau der digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus bis auf Reifegradstufe 4 aber sehr wichtig. Bis dahin würden die bestehenden Funktionalitäten des PLM-Systems ausreichen.

Die *Bandbreite der Reifegradskala* ist gut dimensioniert. Die Werte liegen zwischen 0 und 3 auf der von 0 bis 5 reichenden Skala.

5.3.4. Ermittlung des New Business Maturity Index (NBMI)

Die Bewertung des Reifegrads der insgesamt sieben Bewertungskriterien des NBMI ergab die in Tabelle 5.4 dargestellten Ergebnisse je Betrachtungsbereich.

Betrachtungsbereich	IST	SOLL	Priorität
Unternehmen	10%	60%	2,0
Smart Products	0%	60%	3,0
Smart Services	0%	80%	3,0
Digitale Geschäftsmodelle	0%	60%	1,0
Digitale Plattformen	0%	30%	1,0
New Business Maturity Index (SFMI)	2%	58%	2,0

Tabelle 5.4 Ergebnisse des New Business Assessments (Reifegrad IST/SOLL und Priorisierung)

Der aktuelle NBMI beträgt 2 Prozent, der angestrebte Zielreifegrad beträgt 58 Prozent. Die Verbesserung wird mit einer Priorität von 2,0 (wichtig) bewertet. Abbildung 5.5 zeigt das grafische Profil des New Business Reifegrads. In Bezug auf neue Geschäftsmodelle besteht derzeit lediglich im Bereich des Betrachtungsbereichs „Unternehmen“ eine erste Reife von 10 Prozent. Ansonsten gibt es bisher keine Aktivitäten in den Bereichen Smart Products, Smart Services, digitale Geschäftsmodelle oder digitale Plattformen. Der mit Abstand höchste Zielreifegrad ist bei „Smart Services“ geplant. Hier wird eine Reife von 80 Prozent mit einer als „sehr wichtig“ bewerteten Priorität angestrebt.

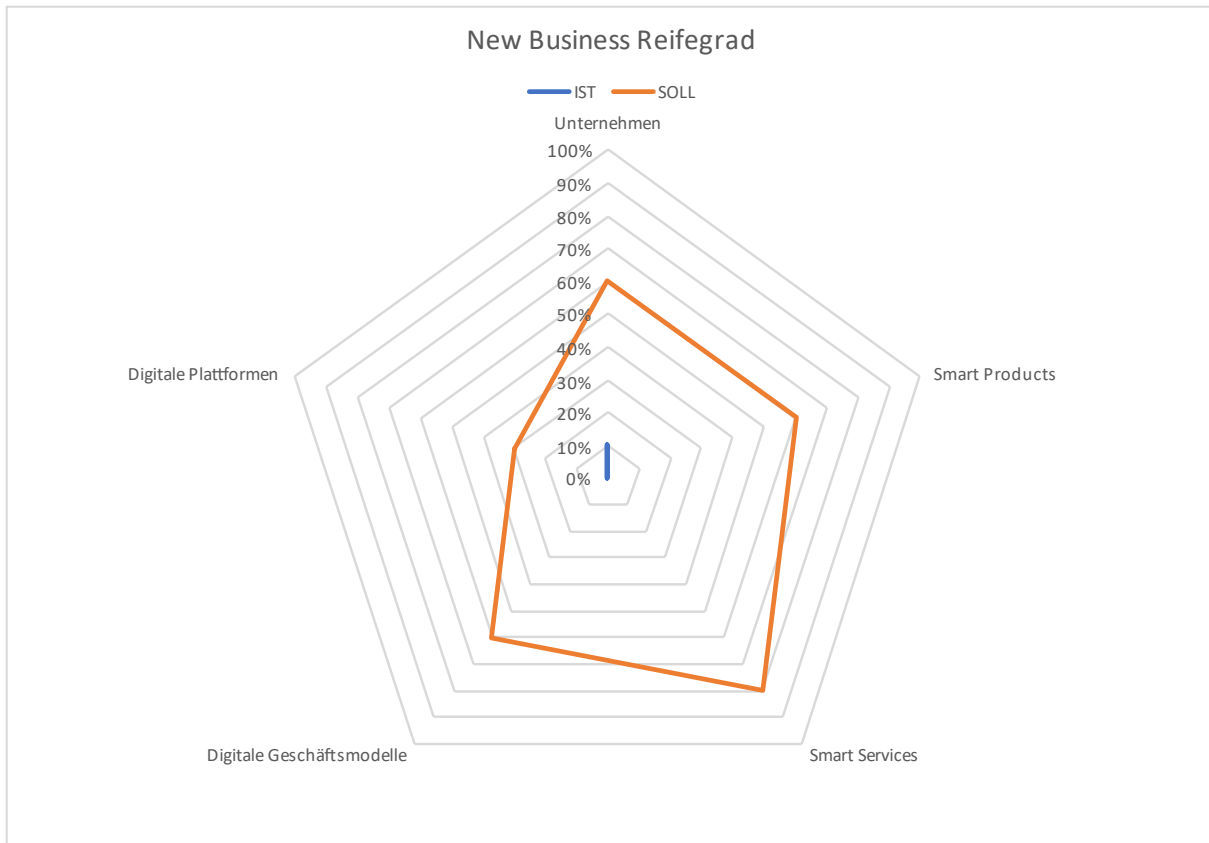


Abbildung 5.5 Grafisches Profil des New Business Reifegrads

Die Ergebnisse zeigen durch die breite durchschnittliche Verteilung der Reifegrade auf der Reifegradskala und durch die durchschnittliche Bewertungsdauer von zwei Minuten je Bewertungskriterium eine prinzipiell gute Anwendbarkeit des Index. Die sehr hohe Differenz zwischen SOLL-Reifegrad (58 Prozent) und IST-Reifegrad (2 Prozent) in Verbindung mit der hohen Priorisierung (wichtig) zeigt einen Nutzen der höheren Reifegradstufen. Im Folgenden werden die Betrachtungsbereiche einzeln hinsichtlich der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Kriterien der Validierung betrachtet.

Unternehmen

Die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Reifegradmodells im Betrachtungsbereich „Unternehmen“ ist gut. Der Status Quo konnte anhand von zwei Bewertungskriterien ohne inhaltliche Rückfragen mit einem Reifegrad von 0 bzw. 1 bewertet und damit ein durchschnittlicher IST-Reifegrad von 10 Prozent ermittelt werden.

Die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Die SOLL-Reifegrade wurden alle mit 3 bewertet, woraus sich ein durchschnittlicher SOLL-Reifegrad von 60 Prozent ergibt. Die Priorisierung der Verbesserungen wurde überall mit 2 (wichtig) bewertet,

woraus sich eine durchschnittliche Priorisierung von 2 (wichtig) ergibt. Damit können wichtige Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Die *Bandbreite der Reifegradskala* ist gut dimensioniert. Die Werte liegen zwischen 0 und 3 auf der von 0 bis 5 reichenden Skala.

Smart Products

Die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Reifegradmodells im Betrachtungsbereich „Smart Products“ ist gut. Der Status Quo konnte anhand von einem Bewertungskriterium ohne inhaltliche Rückfragen mit einem Reifegrad von 0 bewertet und damit ein durchschnittlicher IST-Reifegrad von 0 Prozent ermittelt werden.

Die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Der SOLL-Reifegrad wurde mit 3 bewertet, woraus sich ein durchschnittlicher SOLL-Reifegrad von 60 Prozent ergibt. Die Priorisierung der Verbesserungen wurde mit 3 (sehr wichtig) bewertet. Damit können sehr wichtige Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Die *Bandbreite der Reifegradskala* ist gut dimensioniert. Die Werte liegen zwischen 0 und 3 auf der von 0 bis 5 reichenden Skala.

Smart Services

Die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Reifegradmodells im Betrachtungsbereich „Smart Services“ ist gut. Der Status Quo konnte anhand von einem Bewertungskriterium ohne inhaltliche Rückfragen mit einem Reifegrad von 0 bewertet und damit ein durchschnittlicher IST-Reifegrad von 0 Prozent ermittelt werden.

Die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Der SOLL-Reifegrad wurde mit 4 bewertet, woraus sich ein durchschnittlicher SOLL-Reifegrad von 80 Prozent ergibt. Die Priorisierung der Verbesserungen wurde mit 3 (sehr wichtig) bewertet. Damit können sehr wichtige Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Die *Bandbreite der Reifegradskala* ist gut dimensioniert. Die Werte liegen zwischen 0 und 4 auf der von 0 bis 5 reichenden Skala.

Digitale Geschäftsmodelle

Die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Reifegradmodells im Betrachtungsbereich „Digitale Geschäftsmodelle“ ist gut. Der Status Quo konnte anhand von einem Bewertungskriterium ohne inhaltliche Rückfragen mit einem Reifegrad von 0 bewertet und damit ein durchschnittlicher IST-Reifegrad von 0 Prozent ermittelt werden.

Die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Der SOLL-Reifegrad wurde mit 3 bewertet, woraus sich ein durchschnittlicher SOLL-Reifegrad von 60 Prozent ergibt. Die Priorisierung der Verbesserungen wurde mit 1 (weniger wichtig) bewertet. Damit können keine wichtigen Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden. Begründet wurde dies mit der höheren Priorisierung von Smart Services und Smart Products (s.o.). Digitale Geschäftsmodelle könnten mittelfristig gemäß Reifegradstufe 3 interessant werden.

Die *Bandbreite der Reifegradskala* ist gut dimensioniert. Die Werte liegen zwischen 0 und 3 auf der von 0 bis 5 reichenden Skala.

Digitale Plattformen

Die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Reifegradmodells im Betrachtungsbereich „Digitale Plattformen“ ist gut. Der Status Quo konnte anhand von zwei Bewertungskriterien ohne inhaltliche Rückfragen jeweils mit einem Reifegrad von 0 bewertet und damit ein durchschnittlicher IST-Reifegrad von 0 Prozent ermittelt werden.

Die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Der SOLL-Reifegrad wurde mit 0 bzw. 3 bewertet, woraus sich ein durchschnittlicher SOLL-Reifegrad von 30 Prozent ergibt. Die Priorisierung der Verbesserungen wurde mit 0 (unwichtig) bzw. 2 (wichtig) bewertet. Damit können keine wichtigen Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden. Als unwichtig wurde die Nutzung fremder Plattformen bewertet, da man lieber den Weg einer eigenen Plattform verfolgt.

Die *Bandbreite der Reifegradskala* ist gut dimensioniert. Die Werte liegen zwischen 0 und 3 auf der von 0 bis 5 reichenden Skala.

5.3.5. Darstellung des Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)

Aus den Einzelindizes SFMI, SCMI, PLCMI und NBMI ergibt sich der in Tabelle 5.5 dargestellte Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI).

Industrie 4.0 Reifegradindex	IST	SOLL	Priorität
Smart Factory Maturity Index (SFMI)	26%	57%	1,9
Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI)	33%	68%	1,6
Smart Products & Life Cycle Maturity Index (PLCMI)	14%	67%	2,0
New Business Maturity Index (NBMI)	2%	58%	2,0
Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)	19%	63%	1,9

Tabelle 5.5 Ergebnisse des Overall Industry 4.0 Maturity Assessments (Reifegrad IST/SOLL und Priorisierung)

Der aktuelle OI4MI beträgt 19 Prozent, der angestrebte Zielreifegrad beträgt 63 Prozent. Die Verbesserung wird mit einer Priorität von 1,9 (wichtig) bewertet. Abbildung 5.5 zeigt das grafische Profil des OI4MI. Das zur Zeit reifste Industrie 4.0 Handlungsfeld ist mit einer Reife von 33 Prozent die „Smart Supply Chain“, gefolgt von der „Smart Factory“ mit 26 Prozent. Das Handlungsfeld „Smart Products/Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus“ steht mit 14 Prozent noch am Anfang. Neue datenbasierte Geschäftsmodelle wurden mit einer aktuellen Reife von 2 Prozent noch nicht entwickelt. Es wird angestrebt, alle vier Handlungsfelder mit einer als „wichtig“ eingestuften Priorität auf eine Zielreife von 60 bis 70 Prozent zu entwickeln.

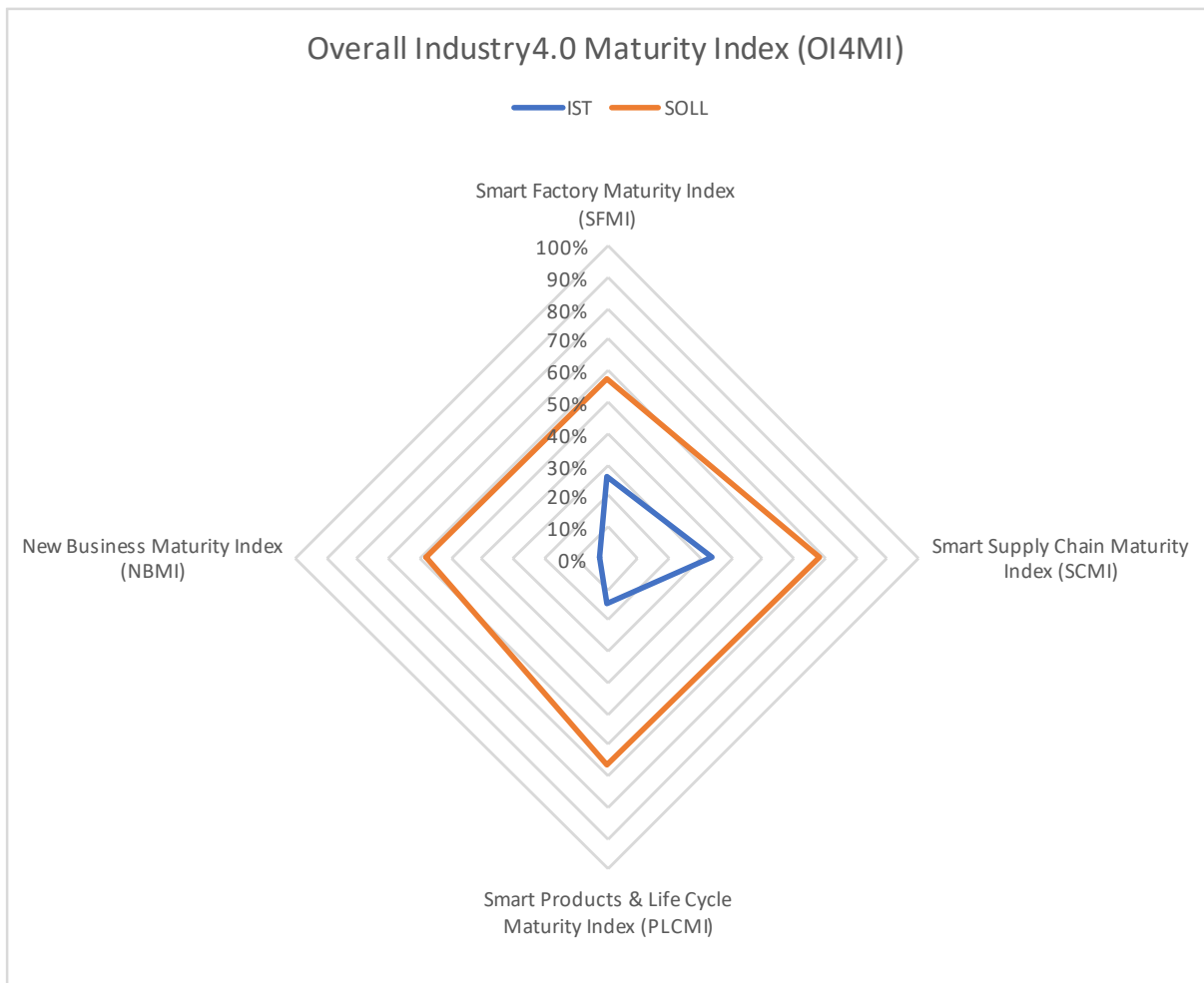


Tabelle 5.6 Grafisches Profil des Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)

Die hohe Differenz zwischen SOLL-Reifegrad (63 Prozent) und IST-Reifegrad (19 Prozent) in Verbindung mit der hohen Priorisierung (wichtig) zeigt einen deutlichen Nutzen der höheren Reifegradstufen.

5.4. Zusammenfassung der Validierungsergebnisse

Die Ergebnisse der Testanwendung zeigen, dass das entwickelte Industrie 4.0 Reifegradmodell prinzipiell geeignet ist die Industrie 4.0 Reife eines KMU oder mittelständischen Unternehmens mit diskreter Produktion anhand von Reifegradindizes in den Bereichen Smart Factory, Smart Supply Chain, Smart Products & Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus sowie neue Geschäftsmodelle zu bewerten.

Es konnte gezeigt werden, dass die *Verständlichkeit und Anwendbarkeit* des Modells gegeben sind. Lediglich der Betrachtungsbereich „Echtzeitstatus und Tracking“ in der Supply Chain konnte nicht angewendet werden, da das Unternehmen den kompletten Bereich der Logistik an einen externen Dienstleister ausgelagert hat. Da es aber andere Unternehmen gibt, die selbst die logistischen Transporte übernehmen, bleibt dieser Punkt valide. Die Anwendung des Reifegradmodells zur Ermittlung des Reifegrads kann insgesamt als effektiv und effizient bewertet werden.

Auch die *Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen* ist gegeben. Insgesamt konnten dem Unternehmen 55 Maßnahmen zur Verbesserung seiner Industrie 4.0 Reife von 19 Prozent auf 63 Prozent aufgezeigt werden, die das Unternehmen selbst mit „wichtig“ bewertete. Lediglich bei vier Bewertungskriterien (Fertigungsplanung, Maschinen und Anlagen, Assistenz für das Werkzeugmanagement und Nutzung fremder Plattformen) konnte das Unternehmen keinen Nutzen in einer Verbesserung des aktuellen Reifegrads sehen. Dies wurde mit Besonderheiten des Unternehmens begründet (siehe Abschnitt 5.3), so dass diese vier Bewertungskriterien allgemeingültig valide bleiben.

Die *Bandbreite der Reifegradskala* wurde nicht ganz ausgenutzt. Von den Reifegradstufen 0 bis 5 wurden die Stufen 0 bis 4 genutzt mit Schwerpunkt bei Werten zwischen 1 und 3. Damit bietet die Reifegradskala eine nicht zu hohe Ausgangsbasis (Reifegradstufe 0) sowie eine noch nicht erreichte hohe Reifegradstufe 5.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass der neue Industrie 4.0 Reifegradindex mit dem zugrunde liegenden Reifegradmodell eine gegenüber bisherigen Modellen verbesserte Lösung zur Bestimmung der Ist-Situation, der Ableitung und Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen sowie der anschließenden Fortschrittskontrolle anhand der Reifegradindizes darstellt. Da die Aussage auf diesem einen Fallbeispiel basiert, könnte das Modell in einer Folgearbeit z.B. in Form eines „webbasierten Self-Assessments“ einem größeren Anwenderkreis zugänglich gemacht werden, wie auch von Knackstedt et al. (2009, S. 543) zur Evaluierung von Reifegradmodellen vorgeschlagen.

6. Ergebnisse und Schlussbetrachtung

Im Folgenden werden zunächst die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und hinsichtlich der eingangs beschriebenen Ziele und Forschungsfragen reflektiert. Im Anschluss erfolgen eine kritische Würdigung der Arbeit sowie ein Ausblick auf weiterführende Forschungsarbeiten.

6.1. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Motivation zu dieser Arbeit entstand aus dem Zögern vieler Unternehmen – insbesondere KMU und Mittelstand – bei der Transformation in Richtung Industrie 4.0. Als die größten Hindernisse wurden in früheren Umfragen das fehlende Wissen des Personals, der unklare Nutzen sowie fehlende Normen und Standards genannt. Gleichzeitig wurde in früheren Arbeiten festgestellt, dass sich die bisherigen Reifegradmodelle mehr auf die technischen Aspekte der Transformation beziehen als auf personelle und organisatorische Aspekte. Daraus resultierte die Vermutung, dass das Fehlen eines für die digitale Transformation geeigneten Industrie 4.0 Reifegradmodells die Ursache für die Hindernisse und das Zögern sein könnten. Zudem gab es bisher aufgrund der Defizite bestehender Reifegradmodelle auch noch keinen aussagefähigen Reifegradindex. Das Ziel dieser Arbeit war daher die Entwicklung eines Industrie 4.0 Reifegradmodells mit Reifegradindex für produzierende Unternehmen (KMU und Mittelstand), das die eventuell erkennbaren Defizite anderer Modelle nach Möglichkeit vermeidet.

Hierzu wurde im Rahmen einer ersten Forschungsfrage untersucht, wie gut sich bestehende Industrie 4.0 Reifegradmodelle als Werkzeug für die digitale Transformation von KMU und Mittelstand eignen und welche Defizite es gibt. Untersucht wurden dabei 10 Reifegradmodelle in Bezug auf ihre inhaltliche Abdeckung von Industrie 4.0, ihren sozio-technischen Fokus sowie die Abdeckung des Bereichs Management und Unternehmenskultur. Die Ergebnisse zeigen, dass es in allen drei Bereichen noch Defizite gibt. Bei der Industrie 4.0 Abdeckung fehlen vielen Modellen entweder ganze Betrachtungsbereiche (Smart Factory, Smart Supply Chain, Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus, Neue Geschäftsmodelle) oder es fehlt an der für KMU und Mittelstand wichtigen inhaltlichen Tiefe. Kaum ein Modell geht auf die für produzierende Unternehmen wichtigen Prozesse in Intralogistik, Instandhaltung, Werkzeugbau und Qualitätsmanagement ein. Die meisten der getesteten Modelle fokussieren auf technische und organisatorische Aspekte, während der im sozio-technischen System Industrie 4.0 wichtige Faktor Mensch nicht in allen Modellen berücksichtigt ist, auch wichtige Themen des Managements sowie der Unternehmenskultur sind nicht in allen Modellen berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Modellbewertung decken sich mit denen einer ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Marktstudie zur Nutzung von Industrie 4.0 Modellen. Demnach hatten 86 Prozent der befragten Unternehmen bisher kein für ihr Unternehmen geeignetes Industrie 4.0 Modell gefunden, das als Vorlage für den Transformationsprozess dienen könnte. Als Hauptdefizite wurde gesehen, dass diese zu abstrakt und nicht praxisnah seien, keine Umsetzungsstufen aufzeigen und zu wenig auf organisatorische Themen sowie den Faktor Mensch eingehen. Die Marktstudie zeigte aber auch auf, dass ca. 50 Prozent der Unternehmen die Lean Production Prinzipien noch nicht vollständig umgesetzt haben, d.h. hier bestehen noch Optimierungspotenziale, die im Transformationsprozess zu Industrie 4.0 zu berücksichtigen sind. Das gleiche gilt für die Nutzung von Manufacturing Execution Systemen (MES). Dieser bisherige „Quasi-Standard“ für die Digitalisierung und Vernetzung in der Produktion wird bisher nur von 51 Prozent der befragten Unternehmen genutzt. Auf Basis der Ergebnisse aus der Modellbewertung und der Marktstudie konnte die Forschungsfrage 1 nach den Defiziten bestehender Industrie 4.0 Modelle ausführlich beantwortet werden und damit die Anforderungen an ein neues Modelldesign abgeleitet werden.

Im Rahmen der zweiten Forschungsfrage nach der Gestaltung eines praxisnahes Industrie 4.0 Reifegradmodells für KMU und Mittelstand sowie der dritten Forschungsfrage nach einem entsprechenden Industrie 4.0 Reifegradindex wurde auf Basis der zuvor definierten Anforderungen ein Artefakt eines neuen Industrie 4.0 Reifegradmodells mit Reifegradindex entwickelt. Das modular aufgebaute Modell ermittelt anhand von insgesamt 59 Bewertungskriterien fünf Indizes zur Bewertung der Industrie 4.0 Reife produzierender Unternehmen:

- Smart Factory Maturity Index (SFMI)
Reifegradindex zur Bestimmung der Industrie 4.0 Reife der Smart Factory.
- Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI)
Reifegradindex zur Bestimmung der Industrie 4.0 Reife der Supply Chain.
- Smart Products & Life Cycle Maturity Index (PLCMI)
Reifegradindex zur Bestimmung der Reife von Smart Products und der digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus.
- New Business Maturity Index (NBMI)
Reifegradindex zur Bestimmung der Reife im Hinblick auf die Nutzung neuer datenbasierter Geschäftsmodelle.
- Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)
Gesamtindex der Industrie 4.0 Reife, basierend auf den vier Einzelindizes.

Damit umfasst das Modell alle wichtigen Handlungsbereiche von Industrie 4.0. Zudem werden anhand der Bewertungskriterien alle sozio-technischen Dimensionen Mensch (M), Technik (T), Organisation (O) sowie deren Schnittstellen Mensch-Technik (MT), Mensch-Organisation (MO), Technik-Organisation (TO) und Mensch-Technik-Organisation (MTO) betrachtet. Auf Basis dieses Artefakts wurde ein Demonstrator des Modells entwickelt und bei einem produzierenden Unternehmen erfolgreich validiert. Das Unternehmen konnte mit Hilfe des Demonstrators im Rahmen eines Self-Assessments seinen aktuellen Industrie 4.0 Reifegrad ermitteln und mehrere Maßnahmen für einen höheren Grad der Reife ableiten, die das Unternehmen selbst als sehr hoch priorisiert hat. Damit leistet diese Arbeit folgenden Beitrag zur Forschung:

- Aktuelle Literaturrecherche zu den Technologien und Handlungsbereichen von Industrie 4.0 in allen sozio-technischen Dimensionen Mensch, Technik und Organisation.
- Defizite bestehender Industrie 4.0 Reifegradmodelle.
- Marktstudie zur Nutzung von Industrie 4.0 Modellen sowie zum Status Quo der Unternehmen.
- Validiertes Industrie 4.0 Reifegradmodell zu allen Industrie 4.0 Handlungsbereichen mit Berücksichtigung aller sozio-technischen Dimensionen Mensch, Technik und Organisation sowie deren Schnittstellen als Template für darauf aufbauende Arbeiten.
- Kennzahlensystem zur Messung der Industrie 4.0 Reife produzierender Unternehmen bestehend aus fünf Indizes.

6.2. Kritische Würdigung

Bei dem entwickelten Industrie 4.0 Reifegradmodell für produzierende Unternehmen (KMU und Mittelstand) und den dazugehörigen fünf Reifegradindizes handelt es sich um ein Artefakt, das alle Handlungsbereiche von Industrie 4.0 sowie alle sozio-technischen Dimensionen Mensch, Technik und Organisation mit deren Schnittstellen umfasst und damit die Defizite bestehender Modelle beseitigt. Das Artefakt konnte bisher einmal erfolgreich bei einem produzierenden Unternehmen validiert werden. Damit ist das Ziel der Arbeit grundsätzlich erreicht.

Aus der ersten Validierung heraus hat sich bisher noch kein Bedarf an einer iterativen Anpassung entsprechend des DSRM Vorgehensmodells dieser Arbeit ergeben. Verbesserungen sind weniger im Bereich der Handlungsfelder (Smart Factory, Smart Supply Chain, Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus, Neue Geschäftsmodelle) und Betrachtungsbereiche (z.B. Produktionsplanung, Intralogistik, Smart Products) zu erwarten, da diese auf breiten wissenschaft-

lichen Grundlagen basieren, als im Bereich der entwickelten Reifegradmerkmale. Bei der Entwicklung der Reifegradmerkmale (6 Stufen) gab es aber nur wenige Fixpunkte, wie die typische Ausgangssituation der Unternehmen, die sich aus der Literatur und der Marktstudie ergeben hatte, sowie die in der Literatur beschriebenen Ausführungen zu Technik, Organisation und Mensch. Die Merkmale nicht abgedeckter Reifegradstufen mussten logisch aus dem Zusammenhang heraus erschlossen werden. Hier könnten weitere Tests aus Sicht des Autors eventuell noch Verbesserungspotenziale aufzeigen oder die aktuelle Lösung bestätigen. Weitere Tests könnten auch dazu dienen, die Anwendbarkeit des Modells durch Beschäftigte eines produzierenden Unternehmens in Form eines Self-Assessments zu prüfen und gegebenenfalls zu bestätigen.

Das Reifegradmodell wurde für produzierende Unternehmen (KMU und Mittelstand) mit diskreter Produktion entwickelt. Aus Sicht des Autors ist es auch ohne Einschränkung bei großen Unternehmen mit diskreter Produktion anwendbar. Zur Anwendung bei Unternehmen der Prozessindustrie müssten Betrachtungsbereiche, Bewertungskriterien und Reifegradmerkmale angepasst werden. Insofern besteht hier noch eine Forschungslücke.

Durch die vollständige Abdeckung der Handlungsbereiche von Industrie 4.0, die vollständige, praxisnahe Abdeckung aller relevanten innerbetrieblichen Abteilungen sowie durch den soziotechnischen Ansatz eignet sich das entstandene Industrie 4.0 Modell aus Sicht des Autors auch als Grundlage zur Schulung des Personals. Damit könnte das fehlende Wissen in den Unternehmen reduziert und damit der wichtigste Hindernisgrund von Industrie 4.0 (s.o.) beseitigt werden. Eine Antwort auf den zweithäufigste Hindernisgrund „Unklarer Nutzen“ kann das Reifegradmodell jedoch nicht direkt liefern. Insofern besteht hier noch eine Forschungslücke. Das Reifegradmodell kann jedoch dazu beitragen, den monetären und nicht monetären Nutzen zu ermitteln, indem es die Maßnahmen für einen höheren Grad der Reife beschreibt. Der dritthäufigste Hindernisgrund „Fehlende Normen und Standards“ konnte im Rahmen der Recherche zu den Industrie 4.0 Technologien nicht betätigt werden. Dieser ist sicher auf fehlendes Wissen zurückzuführen.

6.3. Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden einige Forschungsbedarfe identifiziert, die aus Sicht des Autors in darauf aufbauenden Arbeiten betrachtet werden sollten. Zunächst wird vorgeschlagen, die Validierung des entstandenen Industrie 4.0 Reifegradmodells mit den dazugehörigen Reifegradindizes durch weitere Anwendungsfälle fortzusetzen, um damit Erkenntnisse zur iterativen Weiterentwicklung zu generieren. Dies könnte beispielsweise in Form eines „webbasierten

Self-Assessments“ erfolgen, bei dem das Reifegradmodell einem größeren Anwenderkreis zugänglich gemacht wird, wie auch von Knackstedt et al. (2009, S. 543) zur Evaluierung von Reifegradmodellen vorgeschlagen.

Reifegradmodelle beschreiben was zu tun ist, um auf einen höheren Grad der Reife zu kommen. Sie beschreiben aber nicht wie die entsprechenden Maßnahmen umgesetzt werden sollten. Insofern besteht Forschungsbedarf in Bezug auf Vorgehensmodellen zur Umsetzung der einzelnen Reifegradstufen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht aus Sicht des Autors sowie Leineweber et al. (Leineweber, et al., 2018) auch in der Bewertung des Nutzens der jeweiligen im Reifegradmodell beschriebenen Maßnahmen. Eine Systematik zur Quantifizierung des Nutzens könnte beispielsweise zunächst die Auswirkungen auf Kosten, Qualität und Zeit bewerten und im zweiten Schritt diese bei Bedarf noch vollständig monetär quantifizieren. Damit könnten die Unternehmen die Umsetzung der vom Reifegradmodell vorgeschlagenen Maßnahmen besser hinsichtlich des Aufwands und Nutzens priorisieren.

Generell könnte noch der Aspekt der Nachhaltigkeit in das Modell integriert werden, da aus Sicht des Autors von Wechselwirkungen zwischen der digitalen Transformation und der Nachhaltigkeitstransformation ausgegangen werden kann.

Eine interessante Forschungslücke zeigt sich auch bei der digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus. Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei mögliche Ansätze zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus identifiziert: Product-Life-Cycle Management, digitale Produkte (Digital Mock-Up) und Smart Products. Aus Sicht des Autors ist die Best-Practice-Kommunikation zwischen diesen Objekten und mit den ERP-Systemen und MES noch zu klären.

Abschließend könnten auf Basis des hier entstanden Templates eines Industrie 4.0 Reifegradmodells für die diskrete Produktion auch noch Modelle für anderen Branchen, z.B. für die Prozessindustrie entwickelt werden.

Literaturverzeichnis

- Abel, J. & Wagner, S., 2017. Industrie 4.0: Mitarbeiterqualifizierung in KMU. *wt Werkstattstechnik online*, 107(H. 3), S. 134-140.
- ADAMOS, 2022. ADAMOS. [Online]
Available at: <https://www.adamos.com/ueber-adamos/>
[Zugriff am 20.8.2021].
- Andresen, K., Gronau, N. & Schmid, S., 2005. Ableitung von IT-Strategien durch Bestimmung der notwendigen Wandlungsfähigkeit von Informationssystemarchitekturen. In: O. K. Ferstl, E. J. Sinz, S. Eckert & T. Isselhorst, Hrsg. *Wirtschaftsinformatik 2005*. Heidelberg: Physica-Verlag, S. 63-82.
- Angreani, L. S., Vijaya, A. & Wicaksono, H., 2020. Systematic Literature Review of Industry 4.0 Maturity Model for Manufacturing and Logistics Sectors. *Procedia Manufacturing*, Band 52, S. 337-343.
- Appelfeller, W. & Feldmann, C., 2018. *Die digitale Transformation des Unternehmens. Systematischer Leitfaden mit zehn Elementen zur Strukturierung und Reifegradmessung*. Berlin: Springer Gabler.
- Bauernhansl, T., 2014. Die vierte Industrielle Revolution - Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: T. Bauernhansl, M. ten Hompel & B. Vogel-Heuser, Hrsg. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 5-36.
- Bauernhansl, T., Krüger, J., Reinhart, G. & Schuh, G., 2016. *WGP-Standpunkt Industrie 4.0*. Aachen: Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e.V..
- Bauernhansl, T., ten Hompel, M. & Vogel-Heuser, B. Hrsg., 2014. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik Anwendung Technologien Migration*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Bauer, W., Schlund, S., Marrenbach, D. & Ganschar, O., 2014. *Industrie 4.0 - Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland*. Berlin: BITKOM e.V..
- Baumann, M., Dimitrov, T. & Martinek, R., 2006. Komplexität in der Produktion beherrschen. *PPS Management*, 11(3), S. 17-21.

- Bender, B., Habib, N. & Gronau, N., 2021. Digitale Plattformen: Strategien für KMU. *Wirtschaftsinformatik & Management*, 2, Issue 13, S. 68-75.
- Bender, B., Lass, S., Habib, N. & Scheel, L., 2020. Plattform-Bereitstellungsstrategien im Maschinen- und Anlagenbau: Strategien deutscher Unternehmen im Industrie 4.0-Kontext. *HMD*, Issue 58, S. 645-660.
- Bengler, K., Lock, C. & Reinhart, G., 2017a. Der Mensch in der Produktion von Morgen. In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0 Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser, S. 51-54.
- Bengler, K., Lock, C., Teubner, S. & Reinhart, G., 2017b. Das Konzept Mensch - Technik - Organisation (MTO). In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Carl Hanser Verlag, S. 54-56.
- Berghaus, S. & Back, A., 2016. Gestaltungsbereiche der Digitalen Transformation von Unternehmen: Entwicklung eines Reifegradmodells. *Die Unternehmung*, 2, S. 98-123.
- Berlak, J., 2015. Schlanke Software steuert Geschäftsprozesse und Materialflüsse im Mittelstand. In: P. Dickmann, Hrsg. *Schlanker Materialfluss mit Lean Production, Kanban und Innovationen*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, S. 578-582.
- Berndt, D., 2015. Montage-Arbeitsplatz – Visuelle Assistenz und optische Prüfung. In: M. Schenk, Hrsg. *Produktion und Logistik mit Zukunft Digital Engineering and Operation*. Berlin Heidelberg: Springer, S. 84-108.
- Bernhardt, J. & Steininger, M., 2021. Gaia-X – Wegbereiter einer digitalen und wettbewerbsfähigen Zukunft der EU?. *ifo Schnelldienst*, 05, S. 66-71.
- Bildstein, A. & Seidelmann, J., 2014. Industrie 4.0-Readiness: Migration zur Industrie 4.0-Fertigung. In: T. Bauernhansl, M. ten Hompel & B. Vogel-Heuser, Hrsg. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 581-597.
- Bischoff, J., Hrsg., 2015. *Erschließen der Potenziale der Anwendung von ‚Industrie 4.0‘ im Mittelstand. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)*. Mülheim an der Ruhr: agiplan GmbH.
- BITKOM e.V., VDMA e.V., ZVEI e.V., Hrsg., 2015. *Umsetzungsstrategie Industrie 4.0*. s.l.:Plattform Industrie 4.0.
- Blanchet, M., Rinn, T., von Thaden, G. & de Thieulloy, G., 2014. Industry 4.0 The new industrial revolution, How Europe will succeed. *Think Act*, 3.

- Block, C. et al., 2015. Industrie 4.0 als soziotechnisches Spannungsfeld Ganzheitliche Betrachtung von Technik, Organisation und Personal. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)*, 10, Issue 110, S. 657-660.
- BMBF, 2015. *Zukunftsbild "Industrie 4.0"*. Bonn: BMBF.
- BMBF, 2021. *Hightech Strategie*. [Online]
Available at: <https://www.hightech-strategie.de>
[Zugriff am 7 Februar 2021].
- BME e.V., 2019. *BME-Logistikumfrage Digitalisierung in Supply Chains*, Eschborn: Bundesverband Materialwirtschaft, Einkauf und Logistik e.V..
- BME, 2019. *BME-Logistikumfrage Digitalisierung in Supply Chains*. Eschborn: Bundesverband Materialwirtschaft, Einkauf und Logistik e.V..
- BMWi, 2015. *Industrie 4.0 Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0*, Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).
- BMWi, 2016. *DIN SPEC 91345:2016-04 - Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)*. [Online]
Available at: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/din-spec-rami40.html>
[Zugriff am 18 11 2021].
- BMWi Hrsg., 2020. *Verwaltungsschale in der Praxis*. Berlin: BMWi.
- BMWi, 2021. *Plattform Industrie 4.0*. [Online]
Available at: <https://www.plattform-i40.de>
[Zugriff am 27 02 2021].
- Boos, W. & Zancul, E., 2012. PPS-Systeme als Bestandteil des Product Lifecycle Management. In: G. Schuh & V. Stich, Hrsg. *Produktionsplanung und -steuerung 2 Evolution der PPS*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, S. 336-364.
- Bothof, A. & Hartmann, E. A. Hrsg., 2015. *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Bousonville, T., 2017. *Logistik 4.0 Die digitale Transformation der Wertschöpfungskette*. Wiesbaden: Springer Gabler.

- Bracht, U., Geckler, D. & Wenzel, S., 2011. *Digitale Fabrik Methoden und Praxisbeispiele*. Heidelberg Dordrecht London New York: Springer.
- Brüggemann, H. & Bremer, P., 2015. *Grundlagen Qualitätsmanagement Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM*. 2 Hrsg. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Catena-X, 2021. *Catena-X Automotive Network*. [Online] Available at: https://catena-x.net/fileadmin/user_upload/intro_praesentationen/de_overview_catena-x_v1.00.pdf [Zugriff am 20.8.2021].
- Cuber, S., Schmidt, C. & Brandenburg, U., 2012. Produktionsplanung und -steuerung (PPS) in temporären Produktionsnetzwerken des Maschinen- und Anlagenbaus. In: G. Schuh & V. Stich, Hrsg. *Produktionsplanung und -steuerung 2 Evolution der PPS*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, S. 60-91.
- Curry, E. et al., 2021. A Reference Model for Big Data Technologies. In: E. Curry, et al. Hrsg. *The Elements of Big Data Value Foundations of the Research and Innovation Ecosystem*. Cham: Springer, S. 127-141.
- Dallasega, P. et al., 2019. *Field study to identify requirements for smart logistics of European, US and Asian SMEs*. Bangkok, IEOM Society International, S. 844-855.
- Dalle Mura, M. & Dini, G., 2020. Augmented Reality in Assembly Systems: State of the Art and Future Perspectives. In: S. Ratchev, Hrsg. *Smart Technologies for Precision Assembly 9th IFIP WG 5.5 International Precision Assembly Seminar, IPAS 2020 Virtual Event, December 14–15, 2020 Revised Selected Papers*. Cham: Springer, S. 3-22.
- Denkena, B. et al., 2017. Das getelligente Werkstück. In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0 Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser, S. 295-321.
- Deuse, J., Weisner, K., Hengstebeck, A. & Busch, F., 2015. Gestaltung von Produktionssystemen im Kontext von Industrie 4.0. In: A. Botthof & E. A. Hartmann, Hrsg. *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*. Berlin Heidelberg: Springer, S. 99-109.
- Dickmann, P., Hrsg., 2015. *Schlanker Materialfluss mit Lean Production, Kanban und Innovation*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- Digmayer, C. et al., 2021. Eine nachhaltige Sicherheitskultur als 3 Transformationsansatz für Industrie 4.0 in kleinen und mittleren Unternehmen. *Produktivitätsmanagement 4.0. ifaa-Edition.*, S. 43-80.

- Dombrowski, U., Krenkel, P. & Mielke, T., 2015c. Struktur ganzheitlicher Produktionssysteme. In: U. Dombrowski & T. Mielke, Hrsg. *Ganzheitliche Produktionssysteme Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, S. 26-31.
- Dombrowski, U. & Mielke, T., 2015a. Einleitung und historische Entwicklung. In: U. Dombrowski & T. Mielke, Hrsg. *Ganzheitliche Produktionssysteme Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. 1-24.
- Dombrowski, U. & Mielke, T. Hrsg., 2015b. *Ganzheitliche Produktionssysteme Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- Dombrowski, U., Mielke, T., Schmidt, S. & Schmidtchen, K., 2015d. Ausblick - Lean Enterprise. In: U. Dombrowski & T. Mielke, Hrsg. *Ganzheitliche Produktionssysteme Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen*. Berlin Heidelberg: Springer, S. 299-313.
- Dombrowski, U., Riechel, C. & Evers, M., 2014. *Industrie 4.0 – Die Rolle des Menschen in der vierten industriellen Revolution*. [Online]
Available at:
[https://www.gito.info/homepage/gito/gitoshop.nsf/0/F1EEE80EDB460066C1257DAF00527D27/\\$File/dombrowski_Industrie-4-0_HAB-Tagungsband-2014.pdf](https://www.gito.info/homepage/gito/gitoshop.nsf/0/F1EEE80EDB460066C1257DAF00527D27/$File/dombrowski_Industrie-4-0_HAB-Tagungsband-2014.pdf)
[Zugriff am 5 9 2021].
- Dombrowski, U., Stefanak, T. & Krenkel, P., 2017. Aspekte der Fabrikplanung für die Ausrichtung auf Industrie 4.0. In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0 Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser, S. 169-190.
- Dommermuth, M., 2021. *Entwicklung und Anwendung eines konsekutiven integralen Transformationskonzeptes für Werke von Industrieunternehmen mit variantenreicher Fertigung zur Analyse, Planung, Umsetzung und Kontrolle von Industrie 4.0*. Berlin: Springer.
- Ehemann, T. et al., 2021. Mit dem InAsPro- Transformationskonzept die Digitalisierung planen. In: W. Bauer, et al. Hrsg. *Arbeit in der digitalisierten Welt*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, S. 205-222.
- Elkmann, N., 2015. Mensch-Roboter-Arbeitsplatz. In: M. Schenk, Hrsg. *Produktion und Logistik mit Zukunft Digital Engineering and Operation*. Berlin Heidelberg: Springer, S. 52-83.

- Ellerbrock, K., 2015a. Papierlose Fertigung, visualisierte Montageführung und Qualitätssicherung. In: P. Dickmann, Hrsg. *Schlanker Materialfluss mit Lean Production, Kanban und Innovation*. Berlin Heidelberg: Springer, S. 606-640.
- Ellerbrock, K., 2015b. Visualisierte Informationstechnologie. In: P. Dickmann, Hrsg. *Schlanker Materialfluss mit Lean Production, Kanban und Innovationen*. Berlin Heidelberg: Springer, S. 601-605.
- Erlach, K., 2010. *Wertstromdesign Der Weg zur schlanken Fabrik*. 2 Hrsg. Heidelberg Dordrecht London New York: Springer Verlag.
- European Commission, 2021. *Horizon 2020*. [Online]
Available at: <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/home>
[Zugriff am 2 6 2021].
- EY, 2016. *Industrie 4.0: Status Quo und Perspektiven in Deutschland. Ergebnisse einer repräsentativen Unternehmensbefragung von 705 Unternehmen in Deutschland.*, Mannheim: Ernst & Young GmbH.
- Fraunhofer IAO, 2014. *Industrie 4.0 Ready Services Technologietrends 2020*, Stuttgart: Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation.
- Fraunhofer IPA, 2016. *Industrie 4.0: Entwicklungsfelder für den Mittelstand*, Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA.
- Friedli, T. & Schuh, G., 2012. *Wettbewerbsfähigkeit der Produktion an Hochlohnstandorten*. 2 Hrsg. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- Gaia-X European Association for Data and Cloud AISBL, 2021. *Gaia-X*. [Online]
Available at: <https://www.gaia-x.eu>
[Zugriff am 07 12 2021].
- Gartner, 2021. *Hype Cycle for Emerging Technologies 2021*. [Online]
Available at: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/3-themes-surface-in-the-2021-hype-cycle-for-emerging-technologies>
[Zugriff am 31 1 2022].
- Gassmann, O., Frankenberger, K. & Csik, M., 2013. *Geschäftsmodelle entwickeln 55 innovative Konzepte mit dem St. Galler Business Model Navigator*. München: Hanser.
- Gerben, G. M., Främling, K. & Holmström, J., 2009. Intelligent Products: A survey. *Computers in Industry*, 60(3), S. 137-148.

- Gerhard, D., 2019. Vorwort. In: F. Peschke & C. Eckardt, Hrsg. *Flexible Produktion durch Digitalisierung*. München: Hanser, S. IX-XI.
- Gohla, M., 2015. Digitale Methoden und Werkzeuge im Anlagenlebenszyklus. In: M. Schenk, Hrsg. *Produktion und Logistik mit Zukunft Digital Engineering and Operation*. Berlin Heidelberg: Springer, S. 184-189.
- Google Scholar, 2021. *Beiträge zu Industrie 4.0*. [Online]
Available at: <https://scholar.google.com>
[Zugriff am 2 6 2021].
- Gorecky, D. et al., 2017. Wandelbare modulare Automatisierungssysteme. In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0 Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser, S. 555-583.
- Gorecky, D., Schmitt, M. & Loskyll, M., 2014. Mensch-Maschine-Interaktion im Industrie 4.0-Zeitalter. In: T. Bauernhansl, M. ten Hompel & B. Vogel-Heuser, Hrsg. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 525-542.
- Gronau, N., 2014a. Der Einfluss von Cyber-Physical Systems auf die Gestaltung von Produktionssystemen. In: W. Kersten, H. Koller & H. Lödding, Hrsg. *Industrie 4.0 Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern*. Berlin: GITO, S. 279-295.
- Gronau, N., 2014b. Wandlungsfähigkeit in Produktion und Logistik. *PRODUCTIVITY Management 19*, Issue 2, S. 23-26.
- Gronau, N., 2016. Identifikation von Potenzialen durch Industrie 4.0 in der Fabrik. *Productivity Management*, 3, S. 21-23.
- Gronau, N., 2018. Der angemessene Grad von Autonomie in Cyber-Physischen Produktionssystemen. *Industrie Management*, 6, Issue 34, S. 7-12.
- Gronau, N., 2019. Integration von Künstlicher Intelligenz in die Fabriksteuerung. *Fabriksoftware*, Issue 24, S. 31-33.
- Gronau, N., 2020a. Integration von Künstlicher Intelligenz in die Fabriksteuerung. In: N. Gronau, Hrsg. *Künstliche Intelligenz in Produktion und Logistik*. Berlin: GITO, S. 55-57.
- Gronau, N., 2020b. Modellieren des Umgangs mit Wissen für Industrie 4.0. In: M. Freitag, Hrsg. *Mensch-Technik-Interaktion in der digitalisierten Arbeitswelt*. Berlin: GITO, S. 79-101.
- Gronau, N., Hrsg., 2020. *Künstliche Intelligenz in Produktion und Logistik*. Berlin: GITO.

- Gronau, N., 2021. *ERP-Systeme: Architektur, Management und Funktionen des Enterprise Resource Planning*. 4 Hrsg. Berlin: De Gruyter.
- Gronau, N., Thim, C. & Fohrholz, C., 2017. *Wettbewerbsfaktor Analytics im Internet der Dinge*, Potsdam: Universität Potsdam.
- Gronau, N. & Ullrich, A., 2019. Auswirkungen der Digitalisierung – Implikationen und Handlungsempfehlungen für Transformation und betriebliche Weiterbildung. In: M. Schröder & K. Wegner, Hrsg. *Logistik im Wandel der Zeit – Von der Produktionssteuerung zu vernetzten Supply Chains*. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 471-493.
- Gruhn, V., 2020. Künstliche Intelligenz verleiht Cyber-Physical Systems Flügel. In: N. Gronau, Hrsg. *Künstliche Intelligenz in Produktion und Logistik*. Berlin: GITO, S. 15-18.
- GS1, 2021. *GS1 Standards im Überblick*. [Online]
Available at: <https://www.gs1-germany.de/gs1-standards/>
[Zugriff am 13.12.2021].
- Gualtieri, L., Palomba, I., Wehrle, E. J. & Vidoni, R., 2020. The Opportunities and Challenges of SME Manufacturing Automation: Safety and Ergonomics in Human–Robot Collaboration. In: D. T. Matt, V. Modrak & H. Zsifkovits, Hrsg. *Industry 4.0 for SMEs Challenges, Opportunities and Requirements*. Cham: Springer, S. 105-144.
- Günthner, W., Klenk, E. & Tenerowicz, P., 2014. Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0. In: T. Bauernhansl, M. ten Hompel & B. Vogel-Heuser, Hrsg. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik Anwendung Technologien Migration*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 297-323.
- Hänsch, K. & Endig, M., 2010. Wissensmanagementsysteme. In: M. Schenk, Hrsg. *Instandhaltung technischer Systeme Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs*. Heidelberg: Springer, S. 279-281.
- Heppner, H., Schlicher, K. & Hobscheidt, D., 2019. INLUMIA – Instrumentarium zur Steigerung der Leistungsfähigkeit durch Industrie 4.0. In: GfA, Hrsg. *Frühjahrskongress 2019. Arbeit interdisziplinär analysieren – bewerten – gestalten C.3.7*. Dortmund: GfA.
- Hevner, A., vom Brocke, J. & Maedche, A., 2018. Roles of Digital Innovation in Design Science Research. *Business & Information Systems Engineering*, 12, Issue 61, S. 3-8.
- Himmler, F. & Amberg, M., 2013. Die Digitale Fabrik – eine Literaturanalyse. *WIRTSCHAFTSINFORMATIK PROCEEDINGS 2013*, 11, S. 165-175.

- Himstedt, S., 2020. IT-Architektur für die Smart Factory. *IT&Production: Wissen kompakt 2020/21: MES Manufacturing Execution Systems*, S. 16-18.
- Hirsch-Kreinsen, H., 2014a. Wandel von Produktionsarbeit - "Industrie 4.0". *WSI Mitteilungen*, 6, S. 421-429.
- Hirsch-Kreinsen, H., 2014b. Welche Auswirkungen hat „Industrie 4.0“ auf die Arbeitswelt?. *WISO direkt Analysen und Konzepte zur Wirtschafts- und Sozialpolitik*, 12, S. 1-4.
- Hirsch-Kreinsen, H., 2015. Entwicklungsperspektiven von Produktionsarbeit. In: A. Botthof & E. A. Hartmann, Hrsg. *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, S. 89-98.
- Hirsch-Kreinsen, H., 2018. *Zum Konzept des Soziotechnischen Systems – Bedeutung und Kritik*. Dortmund, Technische Universität Dortmund, S. 21-33.
- Hirsch-Kreinsen, H. et al., 2018. „Social Manufacturing and Logistics“ – Arbeit in der digitalisierten Produktion. In: S. Wischmann & E. A. Hartmann, Hrsg. *Zukunft der Arbeit - Eine praxisnahe Betrachtung*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, S. 175-194.
- Huber, A., Mödinger, H. & Uckelmann, D., 2018. Soziale Netzwerke in Logistik und Industrie 4.0. *Industrie 4.0 Management*, 5, Issue 34, S. 51-54.
- Huber, M., 2020. Autonome Produktionen und Roboter: Möglichkeiten und Forschungsfelder maschineller Lernverfahren für das Produktionsumfeld. In: N. Gronau, Hrsg. *Künstliche Intelligenz in Produktion und Logistik*. Berlin: GITO, S. 51-54.
- Hübner, I., 2017. Industrie-4.0 Reife testen: 10 Reifegradmodelle im Vergleich. *Digital Factory Journal*, 2, S. 88-90.
- Hübner, M., 2018. Das Industrie 4.0-Reifegradmodell. In: G. Lanza & P. Nyhuis, Hrsg. *Industrie 4.0 für die Praxis. Befähigungs- und Einführungsstrategien*. Garbsen: TEWISS, S. 184-196.
- IfM, 2021. *Mittelstand inm Einzelnen*. [Online]
Available at: <https://www.ifm-bonn.org/statistiken/mittelstand-im-einzelnen/kmu-und-grossunternehmen>
[Zugriff am 14.2021].
- Immerschitt, W. & Stumpf, M., 2014. *Employer Branding für KMU: Der Mittelstand als attraktiver Arbeitgeber*. Wiesbaden: Springer Gabler.

- InAsPro, 2021. *InAsPro Integrierte Arbeitssystemgestaltung in digitalisierten Produktionsunternehmen*. [Online]
Available at: <https://www.inaspro.de>
- International Data Spaces e. V., 2021. *International Data Spaces (IDS)*. [Online]
Available at: <https://internationaldataspaces.org/why/data-spaces/>
[Zugriff am 07.12.2021].
- INTRO 4.0, 2018. *INTRO 4.0*. [Online]
Available at: <http://www.intro40.de>
[Zugriff am 2022.4.14].
- Jacobi, H.-F., 2013. Computer Integrated Manufacturing (CIM). In: E. Westkämper, D. Spath, C. Constantinescu & J. Lentjes, Hrsg. *Digitale Produktion*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, S. 51-92.
- Jacobs, J. C., Kagermann, H. & Spath, D. Hrsg., 2017. *Arbeit in der digitalen Transformation - Agilität, lebenslanges Lernen und Betriebspartner im Wandel. Ein Beitrag des Human-Resources-Kreises von acatech und der Jacobs Foundation – Forum für Personalvorstände zur Zukunft der Arbeit (acatech DISKUSSION)*. München: Herbert Utz.
- Jeske, T., von Garrel, J. & Starke, J., 2011. Erfolgsfaktor Flexibilität - Ergebnisse einer deutschlandweiten Unternehmensbefragung. In: REFA-Verband, Hrsg. *Industrial Engineering*. Darmstadt: REFA-Verband, S. 20-23.
- Jodlbauer, H., Schagerl, M. & Brunner, M., 2016. Reifegradmodell Industrie 4.0. Unternehmen durch Industrie 4.0 stärken. *Industrie 4.0 Management*, 5, Issue 32, S. 49-52.
- Kagermann, H., Lukas, W.-D. & Wahlster, W., 2011. Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zu Industrie 4.0. *VDI nachrichten*, Issue 13.
- Kagermann, H., Wahlster, W. & Helbig, J. Hrsg., 2012. *Bericht der Promotorengruppe Kommunikation. Im Fokus: Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Handlungsempfehlungen zur Umsetzung*. Berlin: Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V..
- Kagermann, H., Wahlster, W. & Helbig, J. Hrsg., 2013. *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0*. Berlin: Plattform Industrie 4.0.
- Kampker, A., Deutschens, C. & Marks, A., 2015. Die Rolle von lernenden Fabriken für Industrie 4.0. In: A. Botthof & E. A. Hartmann, Hrsg. *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, S. 77-85.

- Kaufmann, T., 2015. *Geschäftsmodelle in Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge: Der Weg vom Anspruch in die Wirklichkeit*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Kayser, G., 2006. Daten und Fakten - Wie ist der Mittelstand strukturiert?. In: W. Krüger, G. Klippstein, R. Merk & V. Wittberg, Hrsg. *Praxishandbuch des Mittelstands: Leitfaden für das Management mittelständischer Unternehmen*. Wiesbaden: Gabler, S. 33-48.
- Kelkar, O., Heger, R. & Dao, D.-K., 2014. *Industrie 4.0 – Eine Standortbestimmung der Automobil- und Fertigungsindustrie*, Stuttgart: MHP Management- und IT-Beratung GmbH.
- Kersten, W., Koller, H. & Lödding, H. Hrsg., 2014. *Industrie 4.0 Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern*. Berlin: GITO.
- Kersten, W. et al., 2017. *BVL Studie: Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management*. Hamburg, DVV Media Group.
- Kese, D. & Terstegen, S., 2017. Benchmark Reifegradmodelle. *IEE Industrie Engineering Effizienz*, 10, S. 30-34.
- Kinkel, S. et al., 2016. *Digital-vernetztes Denken in der Produktion (gefördert von der IMPULS-Stiftung des VDMA)*, Frankfurt: IMPULS-Stiftung.
- Kletti, J., 2006. *MES Manufacturing Execution System*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Kletti, J. & Deisenroth, R., 2021. *Manufacturing Execution Systeme (MES) Lehrbuch für digitales Fertigungsmanagement*. Berlin: Springer.
- Kletti, J. & Schumacher, J., 2014. *Die perfekte Produktion*. 2 Hrsg. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- Knackstedt, R., Pöppelbuß, J. & Becker, J., 2009. *Vorgehensmodell zur Entwicklung von Reifegradmodellen*. Wien, Österreichische Computer Gesellschaft, S. 535-544.
- Koch, V., Geissbauer, R., Kuge, S. & Schrauf, S., 2014. *Industrie 4.0 Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution*, Frankfurt, München: PwC.
- Kolberg, D. et al., 2017. Strategien zur Transformation der Produktionsumgebung. In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0 Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Carl Hanser Verlag, S. 213-256.
- Kotter, J. P., 1995. Leading Change: Why transformation efforts fail. *Harvard Business Review*, 3-4, S. 59-67.

- Kreggenfeld, N., Prinz, C. & Kuhlenkötter, B., 2016. Mitarbeiterbefähigung in der Industrie 4.0. *Industrie 4.0 Management*, 3, Issue 32.
- Kreimeier, D., Schröder, S. & Kreggenfeld, N., 2013. Konfiguration modularer Produktionssysteme. *Industrie Management*, 29(4), S. 18-22.
- Krüger, J. & Vick, A., 2017. Maschinensteuerung aus der Cloud – Automation as a Service. In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0 Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser, S. 89-97.
- Landherr, M., Neumann, M., Volkmann, J. & Constantinescu, C., 2013. Digitale Fabrik. In: E. Westkämper, D. Spath, C. Constantinescu & J. Lentjes, Hrsg. *Digitale Produktion*. Berlin Heidelberg: Springer, S. 107-131.
- Lass, S., 2018. *Nutzenvalidierung cyber-physischer Systeme in komplexen Fabrikumgebungen*. Berlin: GITO.
- Leineweber, S., Wienbruch, T. & Kuhlenkötter, B., 2018. Konzept zur Unterstützung der Digitalen Transformation von Kleinen und Mittelständischen Unternehmen. In: D. T. Matt, Hrsg. *KMU 4.0 - Digitale Transformation in kleinen und mittelständischen Unternehmen*. Berlin: GITO Verlag, S. 21-39.
- Lentes, J. & Dangelmaier, M., 2013. Digitale Produkte. In: E. Westkämper, D. Spath, C. Constantinescu & J. Lentjes, Hrsg. *Digitale Produktion*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, S. 93-106.
- Lichtblau, K. et al., 2015. *Industrie 4.0-Readiness (gefördert von der IMPULS-Stiftung des VDMA)*, Aachen, Köln: Institut der deutschen Wirtschaft Köln Consult GmbH.
- Lieberoth-Leden, C., Röschinger, M., Lechner, J. & Günthner, W. A., 2017. Logistik 4.0. In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0 Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Carl Hanser, S. 451-512.
- Lucke, D., Defranceski, M. & Adolf, T., 2017. Cyberphysische Systeme für die prädiktive Instandhaltung. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl & M. ten Hompel, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 1 Produktion*. Berlin: Springer Vieweg, S. 75-91.
- Marks, P., 2021. The future of supply chains. *Communications of the ACM*, 7, 64(7), S. 19-21.
- Matt, D. T., Modrak, V. & Zsifkovits, H. Hrsg., 2020. *Industry 4.0 for SMEs Challenges, Opportunities and Requirements*. Cham: Springer.

- Matt, D. T. et al., 2018. Industrie 4.0 Assessment - Bewertungsmodell zur Identifikation und Priorisierung von Industrie 4.0 Umsetzungsmaßnahmen in KMUs. In: D. T. Matt, Hrsg. *KMU 4.0 - Digitale Transformation in kleinen und mittelständischen Unternehmen. Schriftenreihe der WGAB*. Berlin: GITO, S. 93-112.
- Mayer, F. & Pantförder, D., 2014. Unterstützung des Menschen in Cyber-Physical-Production- Systems. In: T. Bauernhansl, M. ten Hompel & B. Vogel-Heuser, Hrsg. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik Anwendung Technologien Migration*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 481-491.
- Meier, H. & Zoller, C. S., 2020. Wissensmanagement in der kurzfristigen PPS. In: N. Gronau, Hrsg. *Künstliche Intelligenz in Produktion und Logistik*. Berlin: GITO, S. 77-80.
- Meißner, A. et al., 2017. Hindernisse der Industrie 4.0 - Umdenken notwendig?. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)*, 9, 112(9), S. 607-611.
- Mettler, T., 2011. Maturity assessment models: a design science research approach. *Int. J. Society Systems Science*, 3(1/2), S. 81-98.
- Mrugalska, B. & Stasiuk-Piekarska, A., 2020. Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises for Industry 4.0. *Advances in Manufacturing, Production Management and Process Control. AHFE 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing (AISC)*, Band 1216, S. 263-270.
- Mühlbradt, T., Kuhlmann, P. & Finsterbusch, T., 2018. Lernförderliche Arbeitsorganisation in der Industrie 4.0. In: S. Wischmann & E. A. Hartmann, Hrsg. *Zukunft der Arbeit - Eine praxisnahe Betrachtung*. Berlin: Springer Vieweg, S. 195-205.
- Müller, E. & Riedel, R., 2014. Humanzentrierte Entscheidungsunterstützung in intelligent vernetzten Produktionssystemen. In: W. Kersten, H. Koller & H. Lödding, Hrsg. *Industrie 4.0 Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern*. Berlin: GITO Verlag, S. 211-237.
- Müller, E., Tawalbeh, M. & Hopf, H., 2018. Reifegradbestimmung als Vorstufe der Industrie 4.0-Strategieentwicklung. In: D. T. Matt, Hrsg. *KMU 4.0 - Digitale Transformation in kleinen und mittelständischen Unternehmen. Schriftenreihe der WGAB*. Berlin: GITO, S. 71-91.
- Niehues, M. et al., 2017. Organisation, Qualität und IT-Systeme für Planung und Betrieb. In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0*. München: Carl Hanser, S. 137-167.

- Nittinger, J. & Brecher, C., 2017. Frontloading durch eine effizientere CAD-CAM-NCKette. In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0 Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser, S. 343-349.
- Nyhuis, P., Mayer, J. & Kuprat, T., 2014. Die Bedeutung von Industrie 4.0 als Enabler für logistische Modelle. In: W. Kersten, H. Koller & H. Lödding, Hrsg. *Industrie 4.0 Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern*. Berlin: GITO-Verlag, S. 79-100.
- Nyhuis, P., Schmidt, M. & Quirico, M., 2017. Mythos PPS 4.0. In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0 Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Carl Hanser, S. 45-50.
- Ohno, T., 1993. *Das Toyota Produktionssystem*. Frankfurt/Main: Campus Verlag.
- Peffers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A. & Chatterjee, S., 2007. A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. *Journal of Management Information Systems*, 8, 24(3), S. 45-78.
- Peschke, F. & Eckardt, C., 2019. *Flexible Produktion durch Digitalisierung*. München: Carl Hanser.
- Pfohl, H.-C., 2006. *Betriebswirtschaftslehre der Mittel- und Kleinbetriebe: Größenspezifische Probleme und Möglichkeiten zu ihrer Lösung*. Berlin: Erich Schmidt.
- Pierenkemper, C., Reinhold, J., Dumitrescu, R. & Gausemeier, J., 2019. Erfolg versprechende Industrie 4.0-Zielposition. Ermittlung unter Berücksichtigung zukünftiger Umfeldentwicklungen. *Industrie 4.0 Management*, 5, Issue 35, S. 30-34.
- Prinz, C. et al., 2016. Learning Factory modules for smart factories in Industrie 4.0. *Procedia CIRP*, Issue 54, S. 113-118.
- Puchan, J. & Zeifang, A., 2017. Industrie-4.0-Reifegradmodell. In: T. Barton, et al. Hrsg. *Angewandte Forschung in der Wirtschaftsinformatik. Prozesse, Technologie, Anwendungen, Systeme und Management. Tagungsband zur 30. AKWI-Jahrestagung*. Heide: mana-Buch, S. 257-265.
- PwC, 2022. *Industrie 4.0*. [Online]
Available at: https://www.pwc.de/de/digitale-transformation/industrie_4_0.html
[Zugriff am 10.4.2022].

- Reinhart, G. & Niehues, M., 2017. Systeme für Geschäftsprozesse. In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0 Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser, S. 137-146.
- Reinhart, G. & Zühlke, D., 2017. Von CIM zu Industrie 4.0. In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Carl Hanser Verlag, S. XXXI-XXXIX.
- Richter, K., 2015a. Kommissionier-Arbeitsplatz. In: M. Schenk, Hrsg. *Produktion und Logistik mit Zukunft Digital Engineering and Operation*. Berlin Heidelberg: Springer, S. 119-130.
- Richter, K., Poenicke, O., Kirch, M. & Nykolachuk, M., 2015b. Logistiksysteme. In: M. Schenk, Hrsg. *Produktion und Logistik mit Zukunft Digital Engineering and Operation*. Berlin Heidelberg: Springer, S. 245-281.
- Roland Berger, 2022. *Next Generation Manufacturing*. [Online]
Available at: <https://www.rolandberger.com/de/Insights/Global-Topics/Next-Gen-Manufacturing/Publications/>
[Zugriff am 10.4.2022].
- Roth, A., Hrsg., 2016. *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Roy, D., Mittag, P. & Baumeister, M., 2015. Industrie 4.0 - Einfluss der Digitalisierung auf die fünf Lean-Prinzipien. *Productivity*, 2, Issue 20, S. 27-30.
- Ryll, F. & Freund, C., 2010. Grundlagen der Instandhaltung. In: M. Schenck, Hrsg. *Instandhaltung technischer Systeme Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs*. Berlin Heidelberg: Springer, S. 23-99.
- Sauer, R., Dopfer, M., Schmeiss, J. & Gassmann, O., 2016. Geschäftsmodell als Gral der Digitalisierung. In: O. Gassmann & P. Sutter, Hrsg. *Digitale Transformation im Unternehmen gestalten: Geschäftsmodelle, Erfolgsfaktoren, Handlungsanweisungen, Fallstudien*. München: Hanser, S. 15-27.
- Schaupp, E., Grosch, T., Abele, E. & Metternich, J., 2017. Intelligenter Werkzeugkreislauf. In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0 Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser, S. 334-340.
- Schebek, L. et al., 2017. *Studie: Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes*, Berlin: VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE).

- Schenk, M., Hrsg., 2015. *Produktion und Logistik mit Zukunft Digital Engineering and Operation*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Schenk, M., Haase, T., Keller, A. & Berndt, D., 2016. Herausforderungen der Mensch-Technik-Interaktion für die Gestaltung zukünftiger Arbeitssysteme. In: C. M. Schlick, Hrsg. *Megatrend Digitalisierung Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation*. Berlin: GITO, S. 131-139.
- Schenk, M., Wirth, S. & Müller, E., 2014. *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik*. 2 Hrsg. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- Schenk, M., Wirth, S. & Müller, E., 2014. *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik*. 2 Hrsg. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- Schlick, C. M., Moser, K. & Schenk, M. Hrsg., 2014. *Flexible Produktionskapazität innovativ managen*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Schlick, J., Stephan, P., Loskyll, M. & Lappe, D., 2014. Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung. In: T. Bauernhansl, M. ten Hompel & B. Vogel-Heuser, Hrsg. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Schlund, S. & Pokomi, B., 2016. *Industrie 4.0 - Wo steht die Revolution der Arbeitsgestaltung?*, Ulm: Ingenics AG.
- Schmitt, R., Ngo, Q. H., Groggert, S. & Elser, H., 2016. Datenbasierte Qualitätsregelung. In: R. Refflinghaus, C. Kern & S. Klute-Wenig, Hrsg. *Qualitätsmanagement 4.0 - Status-Quo! Quo vadis? Bericht zur GQW-Jahrestagung 2016 in Kassel*. Kassel: kassel university press GmbH, S. 23-42.
- Schröder, C., 2016. *Herausforderungen von Industrie 4.0 für den Mittelstand*, Bonn: Friedrich-Ebert-Stiftung.
- Schröder, C., 2017. *Herausforderungen von Industrie 4.0 für den Mittelstand*. Bonn: Friedrich-Ebert-Stiftung.
- Schuh, G. et al., 2017. *Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen steuern (acatech STUDIE)*. München: Herbert Utz.
- Schuh, G. et al., 2018. *Industrie 4.0: Implement it! – Ein Leitfaden zur erfolgreichen Implementierung von Industrie 4.0-Lösungen*. Aachen: s.n.

- Schuh, G., Brosze, T. & Meier, C., 2012. Gestaltung der innerbetrieblichen Produktionsplanung und -steuerung. In: G. Schuh & V. Stich, Hrsg. *Produktionsplanung und -steuerung I Grundlagen der PPS*. Berlin Heidelberg: Springer, S. 297-305.
- Schuh, G., Brosze, T. & Meier, C., 2012. Gestaltungsaufgaben in der PPS. In: G. Schuh & V. Stich, Hrsg. *Produktionsplanung und -steuerung I Grundlage der PPS*. Berlin Heidelberg: Springer, S. 297-305.
- Schuh, G., Jordan, F., Maasem, C. & Zeller, V., 2016. Industrie 4.0: Implikationen für produzierende Unternehmen. In: O. Gassmann & P. Sutter, Hrsg. *Digitale Transformation im Unternehmen gestalten Geschäftsmodelle Erfolgsfaktoren Handlungsanweisungen Fallstudien*. München: Hanser, S. 39-58.
- Schuh, G. et al., 2017a. Geschäftsmodell-Innovationen. In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0 Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser, S. 3-29.
- Schuh, G. et al., 2017b. Netzwerkartige Wertschöpfungssysteme. In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0 Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser, S. 18-21.
- Schuh, G. & Stich, V. Hrsg., 2012. *Produktionsplanung und -steuerung 2 Evolution der PPS*. 4 Hrsg. Berlin Heidelberg: Springer.
- Schuh, G. & Stich, V. Hrsg., 2012. *Produktionsplanung und -steuerung I Grundlagen der PPS*. 4 Hrsg. Berlin Heidelberg: Springer.
- Schumacher, A., Erol, S. & Sihn, W., 2016. A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia CIRP*, Band 52, S. 161-166.
- Schumacher, J., 2005. Mit prozessorientierten Kennzahlen zu mehr Effizienz in der Fertigung. *VDI-Z*, 7/8, Issue 147, S. 38-39.
- Schumacher, J., 2018. *Vom Wertstrom 4.0 zur IT-Zielarchitektur*. [Online] Available at: <https://www.it-production.com/industrie-4-0-iot/lean-production-wertstrom-40/> [Zugriff am 18 10 2021].
- Schumacher, J., 2018. Wissen ist Trumpf – was der Digitalisierung noch im Wege steht. Ergebnisse der Perfect Production Umfrage 2017 zur Nutzung von Industrie 4.0 Modellen. *Productivity*, 1, Issue 23, S. 16-18.
- Schumacher, J., 2020. KI in der Produktion - den Einstieg nicht verpassen!. *Fabriksoftware*, 3, Band 25, S. 25-27.

- Schumacher, S., Hall, R., Rapp, S. & Bildstein, A., 2021. *Ganzheitliche Produktionssysteme 4.0*. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA.
- Seifert, I. et al., 2018. *Potenziale der künstlichen Intelligenz im produzierenden Gewerbe in Deutschland Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm PAiCE*, Berlin: iit-Institut für Innovation und Technik in der VDI / VDE Innovation + Technik GmbH.
- Siepmann, D., 2016. Industrie 4.0 - Technologische Komponenten. In: A. Roth, Hrsg. *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0*. Berlin Heidelberg: Springer, S. 47-82.
- Siestrup, G. & Zeeb, D., 2017. Reifegradbestimmung: der Weg zur Supply Chain 4.0. *Industrie 4.0 Management*, 3, Issue 33, S. 59-62.
- Soder, J., 2014. Use Case Production: Von CIM über Lean Production zu Industrie 4.0. In: T. Bauernhansl, M. ten Hompel & B. Vogel-Heuser, Hrsg. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik Anwendung Technologien Migration*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 85-102.
- Spath, D., Hrsg., 2013. *Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Spath, D., Dworschak, B. & Zaiser, H., 2016. Kompetenzentwicklung in der Industrie 4.0. *Industrie 4.0 Management*, 3, Issue 32, S. 51-54.
- Staufen AG, 2016. *Deutscher Industrie 4.0 Index 2016*, Königen: Staufen AG.
- Staufen AG, 2019. *Deutscher Industrie 4.0 Index 2019*, Königen: Staufen AG.
- Steedmüller, D. & Zürn, M., 2014. Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft. In: T. Bauernhansl, M. ten Hompel & B. Vogel-Heuser, Hrsg. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 103-119.
- Steimel, B. & Steinhaus, I., 2020. *Smarter Logistics Wie sich die Logistik digitale transformiert*. Meerbusch: Smarter Service Institut.
- Steinmüller, K., 2017. Methoden der Zukunftsforschung – 3 Langfristorientierung als Ausgangspunkt für das Technologie-Roadmapping. In: M. G. Möhrle & R. Isenmann, Hrsg. *Technologie-Roadmapping Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, S. 29-46.

- Sun, Z., Zou, H. & Strang, K., 2015. *Big Data Analytics as a Service for Business Intelligence*. Cham, Springer, S. 200-211.
- Teichmann, M., Ullrich, A., Wenz, J. & Gronau, N., 2020. Herausforderungen und Handlungsempfehlungen betrieblicher Weiterbildungspraxis in Zeiten der Digitalisierung. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, Band 57, S. 512-527.
- Terstegen, S., Hennegriff, S., Dander, H. & Adler, P., 2019. Vergleichsstudie über Vorgehensmodelle zur Einführung und Umsetzung von Digitalisierungsmaßnahmen in der produzierenden Industrie C.3.13. In: GfA, Hrsg. *Frühjahrskongress 2019. Arbeit interdisziplinär analysieren - bewerten - gestalten*. Dortmund: GfA, S. 1-7.
- Tücks, G. & Eilers, J., 2011. Komplexitätsbeherrschung durch wandlungsfähige Produktion. *Complexity Management Journal*, Issue 1, S. 4-8.
- Ullrich, G., 2014. *Fahrerlose Transportsysteme Eine Fibel - mit Praxisanwendungen - zur Technik - für die Planung*. 2 Hrsg. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Universität S. Gallen, 2021. *OPEX Benchmarking*. [Online]
Available at: <https://item.unisg.ch/en/divisions/production-management/opex-benchmarking>
[Zugriff am 27 09 2021].
- VDE, 2015. *VDE-Trendreport 2015 Schwerpunkt Industrie 4.0*, Frankfurt: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V..
- VDI, 2012. *VDI 2870-1 Ganzheitliche Produktionssysteme*. Berlin: Beuth.
- VDI, 2013. *VDI 5600 Blatt 2*. Berlin: Beuth.
- VDI, 2016. *VDI 5600 Blatt 1*. Berlin: Beuth.
- VDI, 2021. *VDI 5600 Blatt 7*. Berlin: Beuth.
- VDMA, 2018. *VDMA 66412-40 MES im Umfeld von Industrie 4.0*. Berlin: Beuth.
- VDMA, 2021. *Digitalisierung & Industrie 4.0*. [Online]
Available at: <https://industrie40.vdma.org>
[Zugriff am 3 2021].
- VDMA, F. I. 4., Hrsg., 2017. *Leitfaden Industrie 4.0 Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand*. Frankfurt: VDMA Verlag GmbH.

- Vernim, S., Reinhart, G. & Bengler, K., 2017. Qualifizierung des Produktionsmitarbeiters in der Industrie 4.0. In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0 Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser, S. 60-66.
- Vernim, S., Reinhart, G. & Bengler, K., 2017. Qualifizierung des Produktionsmitarbeiters in der Industrie 4.0. In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0 Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser, S. 60-66.
- Vogel-Heuser, B., 2014. Intelligente Produkte und adaptive intelligente Produktionseinheiten. In: T. Bauernhansl, M. ten Hompel & B. Vogel-Heuser, Hrsg. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 42-45.
- von Garrel, J., Schenk, M. & Seidel, H., 2014. Flexibilisierung der Produktion - Maßnahmen und Status-Quo. In: C. M. Schlick, K. Moser & M. Schenk, Hrsg. *Flexible Produktionskapazität innovativ managen*. Berlin Heidelberg: Springer, S. 81-126.
- von Wascinski, L., Weiß, M. & Tilebein, M., 2018. Industrie 4.0 für die Textil- und Bekleidungsindustrie. In: D. T. Matt, Hrsg. *KMU 4.0 - Digitale Transformation in kleinen und mittelständischen Unternehmen*. Berlin: GITO Verlag, S. 1-20.
- Weber, R. & Seeberg, P., 2020. *KI in der Industrie Grundlagen Anwendungen Perspektiven*. München: Hanser.
- WEKA FachmedienGmbH, 2021. *5G-basierte Indoor-Lokalisierung Finden statt suchen mit dem omlox-Standard*. [Online]
Available at: <https://www.elektroniknet.de/automation/industrie-40-iot/finden-statt-suchen-mit-dem-omlox-standard.190234.html>
[Zugriff am 13.12.2021].
- Westkämper, E., 2006. *Einführung in die Organisation der Produktion*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Westkämper, E., 2013a. Deindustrialisierung der Wirtschaft in den Industrieregionen. In: E. Westkämper, D. Spath, C. Constantinescu & J. Lentjes, Hrsg. *Digitale Produktion*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, S. 3-9.
- Westkämper, E., 2013b. Integration in der digitalen Produktion. In: E. Westkämper, D. Spath, C. Constantinescu & J. Lentjes, Hrsg. *Digitale Produktion*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, S. 133-143.

- Westkämper, E., 2013c. Das Modell der digitalen Produktion. In: E. Westkämper, D. Spath, C. Constantinescu & J. Lentjes, Hrsg. *Digitale Produktion*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, S. 11-13.
- Westkämper, E., 2013d. Produktlebenszyklusmanagement. In: E. Westkämper, D. Spath, C. Constantinescu & J. Lentjes, Hrsg. *Digitale Produktion*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, S. 151-161.
- Winter, J., 2020. Künstliche Intelligenz für die Wirtschaft von morgen. In: N. Gronau, Hrsg. *Künstliche Intelligenz in Produktion und Logistik*. Berlin: GITO, S. 8-11.
- Wolf, S., Dollinger, C., Hees, A. & Reinhart, G., 2018. Der Mensch in Interaktion mit autonomen Planungs- und Steuerungssystemen für Cyber-Physische Produktionssysteme. In: S. Wischmann & E. A. Hartmann, Hrsg. *Zukunft der Arbeit - Eine praxisnahe Betrachtung*. Berlin: Springer Vieweg, S. 123-132.
- Zsifkovits, H. & Woschank, M., 2019. Smart Logistics – Technologiekonzepte und Potenziale. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, Band 164, S. 42-45.
- Zsifkovits, H., Woschank, M., Ramingwong, S. & Wisittipanich, W., 2020. State-of-the-Art Analysis of the Usage and Potential of Automation in Logistics. In: D. T. Matt, V. Modrak & H. Zsifkovits, Hrsg. *Industry 4.0 for SMEs Challenges, Opportunities and Requirements*. Cham: Springer, S. 193-212.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Prozessmodell der Design Science Research Methodology (DSRM) (eigene Darstellung in Anlehnung Peffers et al., 2007, S. 48).....	14
Abbildung 1.2 Aufbau der Arbeit in Anlehnung an das DSRM Modell von Peffers et al. (2007, S. 48)	15
Abbildung 2.1 Fabrikmodell (eigene Darstellung in Anlehnung an das IFU-Referenzmodell für Fabrikbetrieb (Dombrowski & Mielke, 2015a, S. 3)	18
Abbildung 2.2 Abhängigkeit der Fertigungsprinzipien von Fertigungsarten (Westkämper, 2006, S. 198)	20
Abbildung 2.3 St. Galler "Operational Excellence Model" (Universität S. Gallen, 2021) ..	25
Abbildung 2.4 Aufgaben und Funktionen von ERP-Systemen (Gronau, 2021).....	26
Abbildung 2.5 Automatisierungspyramide (eigene Darstellung in Anlehnung an Siepman, 2016, S. 49)	27
Abbildung 2.6 Einordnung von MES in den Leitebenen eines Unternehmens (eigene Darstellung in Anlehnung an VDI 5600-1 und (Kletti & Schumacher, 2014, S. 13)	29
Abbildung 2.7 Bausteine der Wandlungsfähigkeit (Andresen et al., 2005, S. 65).....	32
Abbildung 2.8 Wertstromdiagramm 4.0 (eigene Darstellung).....	35
Abbildung 2.9 Elemente autonomer Organisations- und Leistungseinheiten (eigene Darstellung in Anlehnung an Westkämper, 2006, S. 221).....	37
Abbildung 2.10 Spannungsfeld eines Produktionsmitarbeiters (eigene Darstellung in Anlehnung an Vernim et al., 2017, S. 63).....	38
Abbildung 2.11 Die vier Stufen der industriellen Revolution (eigene Darstellung in Anlehnung an Kagermann et al., 2013, S. 17)	42
Abbildung 2.12 Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) (BMW, 2016).....	45
Abbildung 2.13 IEC 62264-3 Ebenenmodell (VDMA, 2018, S. 10).....	46
Abbildung 2.14 Integration von PLM, ERP und MES (eigene Darstellung in Anlehnung an VDMA 66412)	47
Abbildung 2.15 Die zu erwartende Weiterentwicklung von MES (VDI, 2021).....	48
Abbildung 2.16 Serviceorientierte Architektur (eigene Darstellung in Anlehnung an Peschke & Eckardt, 2019, S. 17 und S. 79).....	49
Abbildung 2.17 Elemente eines Cyber-Physischen Systems (CPS) (eigene Darstellung in Anlehnung an Peschke & Eckardt, 2019, S. 2 und Bauernhansl, et al., 2016, S. 18)	50
Abbildung 2.18 Industrie 4.0 Komponenten mit Verwaltungsschale (BITKOM e.V., et al., 2015, S. 54)	53

Abbildung 2.19 Arten der Assistenzsysteme für den Menschen (eigene Darstellung in Anlehnung an Bengler et al, 2017, S.57)	54
Abbildung 2.20 Eindimensionales neuronales Netz (Weber & Seeberg, 2020, S. 11).....	58
Abbildung 2.21 KI-Anwendungsfelder in der Produktion (Schumacher, 2020, S. 26)	59
Abbildung 2.22 Smart Factory, eigene Abbildung in Anlehnung an VDI 4499 und IFU-Referenzmodell für Fabrikbetrieb (Dombrowski & Mielke, 2015a, S. 3)	62
Abbildung 2.23 Werkzeugmanagement 4.0 (eigene Darstellung in Anlehnung an Schaupp et al., 2017, S. 334)	68
Abbildung 2.24 Smart Factory als sozio-technisches System (eigene Darstellung in Anlehnung an Abel & Wagner, 2017, S. 135)	74
Abbildung 2.25 Smart Supply Chain (eigene Darstellung in Anlehnung an Schuh et al., 2017, S. 19)	77
Abbildung 2.26 Handlungsfelder der Smart Supply Chain (eigene Darstellung).....	79
Abbildung 2.27 Möglichkeiten der digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus (eigene Darstellung in Anlehnung an RAMI 4.0).....	88
Abbildung 2.28 Vier Dimensionen eines Geschäftsmodells nach Gassmann et al., 2013, S. 18	89
Abbildung 2.29 Digitalisierung von Geschäftsmodellen (eigene Darstellung in Anlehnung an Sauer et al., 2016, S. 23)	91
Abbildung 2.30 Leistungstypen datenbasierter Services (eigene Darstellung in Anlehnung an Schuh et al., 2017, S. 24).....	92
Abbildung 2.31 Profil des Industrie 4.0 Maturity Index (acatech)	102
Abbildung 2.32 Profil des Werkzeugkasten Industrie 4.0 (VDMA).....	104
Abbildung 2.33 Profil des Industrie 4.0-Readiness Modells (IMPULS-Stiftung).....	106
Abbildung 2.34 Profil des Industrie 4.0 Assessment (Matt et al.)	109
Abbildung 2.35 Profil des Quick-Check Industrie 4.0 (INLUMIA).....	111
Abbildung 2.36 Profil des Industrie 4.0-Reifegradmodells (WZL, RWTH Aachen)	113
Abbildung 2.37 Profil des Reifegradmodells (Appelfeller & Feldmann)	116
Abbildung 2.38 Profil des Industrie 4.0-Reifegradmodells (INTRO 4.0)	119
Abbildung 2.39 Profil des Industrie 4.0-Reifegradmodells (Puchan & Zeifang)	121
Abbildung 2.40 Profil des Reifegradmodells (InAsPro).....	125
Abbildung 2.41 Status des Themas Industrie 4.0 im Unternehmen (n=68).....	131
Abbildung 2.42 Status der Einführung von Lean Production im Unternehmen (n=68)	132

Abbildung 2.43 Status der eingesetzten Funktionalitäten eines Manufacturing Execution System (MES) (n=34)	132
Abbildung 2.44 Hindernisgründe auf dem Weg zu Industrie 4.0 (n=68)	133
Abbildung 2.45 Defizite bestehender Industrie 4.0 Modelle (n=68)	134
Abbildung 4.1 Modularer Aufbau des Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)	141
Abbildung 4.2 Schematischer Aufbau der Reifegradmodelle je Einzelindex.....	141
Abbildung 4.3 Reifegradskala des Industrie 4.0 Reifegradmodells.....	144
Abbildung 4.4 Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI) - grafische Zielverfolgung.....	206
Abbildung 5.1 Schematischer Produktionsprozess für Hydraulikhämmer	210
Abbildung 5.2 Grafisches Profil des Smart Factory Reifegrads	212
Abbildung 5.3 Grafisches Profil des Smart Supply Chain Reifegrads	217
Abbildung 5.4 Grafisches Profil des Smart Product & Life Cycle Reifegrads.....	219
Abbildung 5.5 Grafisches Profil des New Business Reifegrads	222
Abbildung A1 Internetfragebogen zur Marktstudie "Status Quo der Nutzung von Industrie 4.0 Modellen"	263
Abbildung A2 Testergebnisse des Smart Factory Maturity Index (SFMI).....	268
Abbildung A3 Testergebnisse des Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI).....	273
Abbildung A4 Testergebnisse des Smart Products & Life Cycle Maturity Index (PLCMI)...	274
Abbildung A5 Testergebnisse des New Business Maturity Index (NBMI).....	275

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1 Status der Industrie 4.0 Aktivitäten (eigene Darstellung mit Zahlen aus Staufen AG, 2019).....	6
Tabelle 1.2 Übersicht über Studien und Marktumfragen zu Industrie 4.0 Hindernissen im Zeitraum von 2014 bis 2019.....	8
Tabelle 1.3 Die häufigsten Hindernisse für den Einstieg in Industrie 4.0 (Ergebnis einer eigenen Auswertung von 15 Studien und Marktumfragen im Zeitraum von 2014 bis 2019)	9
Tabelle 1.4 Typische Phasen der Vorgehensmodelle (eigene Darstellung, inhaltlich in Anlehnung an Terstegen et al., 2019)	10
Tabelle 2.1 Komponenten von Produktionssystemen (eigene Darstellung in Anlehnung an Gronau 2014a, S. 280).....	19
Tabelle 2.2 Gestaltungsprinzipien ganzheitlicher Produktionssysteme (eigene Darstellung in Anlehnung an VDI 2870-1 und Dombrowski & Mielke, 2015, S.5).....	22
Tabelle 2.3 Leitlinien zur Gestaltung flexibler Produktionssysteme (von Garrel, et al., 2014, S. 88).....	23
Tabelle 2.4 Gestaltungsprinzipien der Wertstromoptimierung (eigene Darstellung in Anlehnung an Erlach, 2010, S. 143ff.)	24
Tabelle 2.5 Besonderheiten von KMU und Mittelstand gegenüber Großunternehmen im Kontext der Digitalisierung (eigene Darstellung)	41
Tabelle 2.6 Definition Digitale Fabrik und Digitaler Fabrikbetrieb (VDI 4499).....	61
Tabelle 2.7 Kompetenzbedarf in der Smart Factory (eigene Darstellung in Anlehnung an Dombrowski et al, 2014, S. 145 Prinz et al., 2016, S. 114 und Spath et al., 2016, S. 52f.).....	72
Tabelle 2.8 Bereitstellungsstrategien für digitale Plattformen in Anlehnung an Bender et al., 2020, S. 649.....	93
Tabelle 2.9 Ausgewählte Industrie 4.0 Reifegradmodelle	95
Tabelle 2.10 Kriterien zur Bewertung der Industrie 4.0 Abdeckung von Reifegradmodellen	96
Tabelle 2.11 Bewertungsschema zur Bewertung des Betrachtungsbereichs von Reifegradmodellen	97
Tabelle 2.12 Kriterien zur Bewertung des sozio-technischen Fokus von Reifegradmodellen	98
Tabelle 2.13 Kriterien zur Bewertung des Bereichs Management und Unternehmenskultur..	98
Tabelle 2.14 Kriterien zur Bewertung Anwendbarkeit von Reifegradmodellen.....	99
Tabelle 2.15 Bewertungsschema zur Bewertung der Anwendbarkeit des Reifegradmodells..	99
Tabelle 2.16 Kriterien zur Bewertung des Reifegradindex	99

Tabelle 2.17 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen des Industrie 4.0 Maturity Index (acatech)	100
Tabelle 2.18 Bewertung des Industrie 4.0 Maturity Index (acatech)	101
Tabelle 2.19 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen des Werkzeugkasten Industrie 4.0 (VDMA)	103
Tabelle 2.20 Bewertung des Werkzeugkasten Industrie 4.0 (VDMA)	103
Tabelle 2.21 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen des Industrie 4.0-Readiness Modells (IMPULS-Stiftung)	105
Tabelle 2.22 Bewertung des Industrie 4.0-Readiness Modells (IMPULS-Stiftung).....	106
Tabelle 2.23 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen des Industrie 4.0 Assessment (Matt et al.).....	107
Tabelle 2.24 Bewertung des Industrie 4.0 Assessment (Matt et al.)	108
Tabelle 2.25 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen des Quick-Check Industrie 4.0 (INLUMIA).....	110
Tabelle 2.26 Bewertung des Quick-Check Industrie 4.0 (INLUMIA)	111
Tabelle 2.27 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen des Industrie 4.0-Reifegradmodells (WZL, RWTH Aachen).....	112
Tabelle 2.28 Bewertung des Industrie 4.0-Reifegradmodells (WZL, RWTH Aachen).....	113
Tabelle 2.29 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen des Reifegradmodells (Appelfeller & Feldmann).....	115
Tabelle 2.30 Bewertung des Reifegradmodells (Appelfeller & Feldmann).....	116
Tabelle 2.31 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen des Industrie 4.0-Reifegradmodells (INTRO 4.0)	117
Tabelle 2.32 Bewertung des Industrie 4.0-Reifegradmodells (INTRO 4.0)	118
Tabelle 2.33 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen des Industrie 4.0-Reifegradmodells (Puchan & Zeifang).....	120
Tabelle 2.34 Bewertung des Industrie 4.0-Reifegradmodells (Puchan & Zeifang)	121
Tabelle 2.35 Betrachtungsbereiche und Reifegradstufen Reifegradmodells (InAsPro)	123
Tabelle 2.36 Bewertung des Reifegradmodells (InAsPro).....	124
Tabelle 2.37 Industrie 4.0 Reifegradmodelle im Vergleich	126
Tabelle 2.38 Fragebogenaufbau Marktstudie "Status Quo der Nutzung von Industrie 4.0 Modellen"	130
Tabelle 3.1 Handlungsfelder und wesentliche Betrachtungsbereiche (Anforderung)	138

Tabelle 4.1 Definitionen der sozio-technische Dimensionen des Industrie 4.0 Reifegradmodells	143
Tabelle 4.2 Smart Factory Maturity Index (SFMI) - Betrachtungsbereiche und Bewertungskriterien	148
Tabelle 4.3 Reifegradmerkmale Smart Factory Strategie	149
Tabelle 4.4 Reifegradmerkmale Wissens- und Kompetenzmanagement.....	150
Tabelle 4.5 Reifegradmerkmale Change Management	151
Tabelle 4.6 Reifegradmerkmale Unternehmens- und Führungskultur.....	152
Tabelle 4.7 Reifegradmerkmale Aufgabenspektrum in den indirekten Bereichen	153
Tabelle 4.8 Reifegradmerkmale IT-Landschaft in der Auftragsabwicklung	154
Tabelle 4.9 Reifegradmerkmale Horizontale und vertikale Integration der IT-Systeme	155
Tabelle 4.10 Reifegradmerkmale Kommunikation	156
Tabelle 4.11 Reifegradmerkmale Big Data Analyse.....	157
Tabelle 4.12 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten in der Entwicklung	158
Tabelle 4.13 Reifegradmerkmale IT-Landschaft in der Entwicklung.....	159
Tabelle 4.14 Reifegradmerkmale Integration der IT in der Entwicklung	160
Tabelle 4.15 Reifegradmerkmale Assistenz für die Konstruktion	160
Tabelle 4.16 Reifegradmerkmale Assistenz für die Fertigungsplanung	161
Tabelle 4.17 Reifegradmerkmale Assistenz für die Arbeitsvorbereitung	162
Tabelle 4.18 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten in der Produktion.....	163
Tabelle 4.19 Reifegradmerkmale Maschinen und Anlagen	164
Tabelle 4.20 Reifegradmerkmale Intelligente Sensoren und Aktoren	165
Tabelle 4.21 Reifegradmerkmale Roboter	165
Tabelle 4.22 Reifegradmerkmale Produktionsprozess.....	166
Tabelle 4.23 Reifegradmerkmale Assistenz bei Datenerfassung und -analyse.....	167
Tabelle 4.24 Reifegradmerkmale Kognitive Assistenz.....	168
Tabelle 4.25 Reifegradmerkmale Physische Assistenz.....	169
Tabelle 4.26 Reifegradmerkmale Aufgabenspektrum der Beschäftigten auf der operativen Ebene.....	170
Tabelle 4.27 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten in der Produktionsplanung und -steuerung	171
Tabelle 4.28 Reifegradmerkmale Steuerungsprinzip	172
Tabelle 4.29 Reifegradmerkmale Assistenz für die Produktionsplanung und -steuerung	173
Tabelle 4.30 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten in der Intralogistik	174

Tabelle 4.31 Reifegradmerkmale Intralogistik (Technik).....	175
Tabelle 4.32 Reifegradmerkmale Materialversorgungsprinzip.....	176
Tabelle 4.33 Reifegradmerkmale Assistenz für die Intralogistik (Kommissionierung)	177
Tabelle 4.34 Reifegradmerkmale Assistenz für die Intralogistik (Materialtransport)	177
Tabelle 4.35 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten in der Instandhaltung.....	178
Tabelle 4.36 Reifegradmerkmale Instandhaltungsprinzip.....	179
Tabelle 4.37 Reifegradmerkmale Assistenz für die Instandhaltung.....	180
Tabelle 4.38 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten im Werkzeugbau	181
Tabelle 4.39 Reifegradmerkmale Assistenz für das Werkzeugmanagement.....	182
Tabelle 4.40 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten im Qualitätsmanagement	183
Tabelle 4.41 Reifegradmerkmale Assistenz für das Qualitätsmanagement.....	184
Tabelle 4.42 Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI) - Betrachtungsbereiche und Bewertungskriterien	184
Tabelle 4.43 Reifegradmerkmale Smart Supply Chain Strategie	186
Tabelle 4.44 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten im Supply Chain Management.....	186
Tabelle 4.45 Reifegradmerkmale Horizontale Integration in der Supply Chain.....	187
Tabelle 4.46 Reifegradmerkmale Identifikation, Lokalisierung und Status	188
Tabelle 4.47 Reifegradmerkmale Kognitive Assistenz.....	189
Tabelle 4.48 Reifegradmerkmale Assistenz bei der Planung, Steuerung und Überwachung	191
Tabelle 4.49 Reifegradmerkmale Assistenz beim Transportmanagement.....	192
Tabelle 4.50 Smart Product & Life Cycle Maturity Index (PLCMI) - Betrachtungsbereiche und Bewertungskriterien	192
Tabelle 4.51 Reifegradmerkmale Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus	194
Tabelle 4.52 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten im Product Life Cycle Management.....	194
Tabelle 4.53 Reifegradmerkmale Smart Product Intelligenz	195
Tabelle 4.54 Reifegradmerkmale Smart Product Einsatz in der Produktion	196
Tabelle 4.55 Reifegradmerkmale Smart Product Einsatz während der Nutzungsphase	197
Tabelle 4.56 Reifegradmerkmale Digital Mock-Up	198
Tabelle 4.57 Reifegradmerkmale Product-Life-Cycle-Management (PLM).....	199

Tabelle 4.58 New Business Maturity Index (NBMI) - Betrachtungsbereiche und Bewertungskriterien	199
Tabelle 4.59 Reifegradmerkmale Strategie für neue Geschäftsmodelle	200
Tabelle 4.60 Reifegradmerkmale Qualifikation der Beschäftigten im Bereich neuer Geschäftsmodelle	201
Tabelle 4.61 Reifegradmerkmale Smart Products (Geschäftsmodell)	202
Tabelle 4.62 Reifegradmerkmale Smart Services	202
Tabelle 4.63 Reifegradmerkmale Status digitaler Geschäftsmodelle	203
Tabelle 4.64 Reifegradmerkmale der Nutzung fremder Plattformen.....	204
Tabelle 4.65 Reifegradmerkmale der Bereitstellung einer eigenen Plattform	205
Tabelle 4.66 Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI).....	205
Tabelle 5.1 Ergebnisse des Smart Factory Assessments (Reifegrad IST/SOLL und Priorisierung).....	211
Tabelle 5.2 Ergebnisse des Smart Supply Chain Assessments (Reifegrad IST/SOLL und Priorisierung).....	216
Tabelle 5.3 Ergebnisse des Smart Product & Life Cycle Assessments (Reifegrad IST/SOLL und Priorisierung).....	218
Tabelle 5.4 Ergebnisse des New Business Assessments (Reifegrad IST/SOLL und Priorisierung).....	221
Tabelle 5.5 Ergebnisse des Overall Industry 4.0 Maturity Assessments (Reifegrad IST/SOLL und Priorisierung).....	224
Tabelle 5.6 Grafisches Profil des Overall Industry 4.0 Maturity Index (OI4MI)	225

Abkürzungsverzeichnis

ADAMOS	<i>Adaptive Manufacturing Open Solutions</i>
AiF	<i>Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AR	<i>Augmented Reality</i>
B2B	<i>Business-to-Business</i>
B2C	<i>Business-to Consumer</i>
BASOA	<i>Big Data Analytics Services Oriented Architecture</i>
BDE	<i>Betriebsdatenerfassung</i>
BVL	<i>Bundesvereinigung Logistik</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
Capability Maturity Model	<i>Capability Maturity Model</i>
CAPP	<i>Computer Aided Process Planning</i>
CAQ	<i>Computer Aided Quality</i>
CAVE	<i>Cave Automatic Virtual Environment</i>
CIM	<i>Computer Integrated Manufacturing</i>
CM	<i>Condition Monitoring</i>
CNC	<i>Computerized Numerical Control</i>
CPPS	<i>Cyber-Physisches Produktionssystem</i>
CPS	<i>Cyber-Physisches System</i>
CRM	<i>Customer Relationship Management</i>
d.h.	<i>das heißt</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DKE	<i>Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik</i>
DL	<i>Deep Learning</i>
DMU	<i>Digital Mock-Up</i>
DSR	<i>Design Science Research</i>
DSRM	<i>Design Science Research Methodology</i>
EMS	<i>Effektives Managementsystem</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
etc.	<i>et cetera</i>
FIFO	<i>First-In-First-Out</i>
FTS	<i>Fahrerloses Transportsystem</i>
GLN	<i>Global Location Number</i>
GPS	<i>Global Positioning System / Ganzheitliches Produktionssystem</i>
GTIN	<i>Global Trade Item Number</i>
HHD	<i>Handheld Device</i>
HMD	<i>Head Mounted Display</i>
HMI	<i>Hannover Messe Industrie</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
ICT	<i>Information and communications technology</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IfM	<i>Institut für Mittelstandsforschung</i>
IFU	<i>Institut für Fabrikbetriebslehre und Unternehmensforschung</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
IKT	<i>Informations- und Kommunikationstechnik</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISA	<i>Industry Standard Architecture</i>

ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IT	<i>Informationstechnologie</i>
JIT	<i>Just-In-Time</i>
KI	<i>Künstliche Intelligenz</i>
KMU	<i>Kleine und mittlere Unternehmen</i>
LKW	<i>Lastkraftwagen</i>
M	<i>Mensch</i>
M2M	<i>Maschine-zu-Maschine</i>
MDE	<i>Maschinendatenerfassung</i>
MES	<i>Manufacturing Execution System</i>
ML	<i>Machine Learning</i>
MO	<i>Mensch-Organisation</i>
MOM	<i>Manufacturing Operations Management</i>
MQTT	<i>Message Queue Telemetry Transport</i>
MT	<i>Mensch-Technik</i>
MTO	<i>Mensch-Technik-Organisation</i>
NVE	<i>Nummer der Versandeinheit</i>
O	<i>Organisation</i>
OPC-UA	<i>OPC Unified Architecture</i>
PaaS	<i>Platform as a Service</i>
PD	<i>Projection Devices</i>
PDCA	<i>Plan-Do-Check-Act</i>
PLM	<i>Produkt-Life-Cycle-Management</i>
RAMI 4.0	<i>Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i>
s.o.	<i>siehe oben</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SD	<i>Spatial Devices</i>
SME	<i>Small and Medium Enterprise</i>
SOA	<i>Serviceorientierte Architektur</i>
SPS	<i>Speicherprogrammierbare Steuerung</i>
SSCC	<i>Serial Shipping Container Code</i>
T	<i>Technik</i>
TO	<i>Technik-Organisation</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
TQM	<i>Total Quality Management</i>
VDE	<i>Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik</i>
VDMA	<i>Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau</i>
VR	<i>Virtual Reality</i>
WMS	<i>Warehouse Management System</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>
ZVEI	<i>Verband der Elektro- und Digitalindustrie</i>

Anhang

Abbildung A 1 Internetfragebogen zur Marktstudie "Status Quo der Nutzung von Industrie 4.0 Modellen"

A Fragen zum aktuellen Industrie 4.0 Status

[JA1) Was ist in Ihrer Branche das Ziel einer vollständigen Industrie 4.0 Realisierung?

Bitte wählen Sie einen oder mehrere Punkte aus der Liste aus.

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Ein individualisiertes Produkt
- Eine digital vernetzte Produktion auf Basis intelligenter Objekte
- Eine sich autonom steuernde Produktion auf Basis (teil-)automer Objekte
- Eine digitale Vernetzung mit Kunden und Lieferanten
- Die digitale Abbildung des gesamten Produktlebenszyklus
- Sonstiges:

[JA2) Welchen Status hat das Thema Industrie 4.0 in Ihrem Unternehmen?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- Industrie 4.0 ist bei uns bereits umfassend umgesetzt
- Wir haben erste Einzelprojekte gestartet bzw. umgesetzt
- Wir planen erste Projekte
- Wir beobachten und analysieren das Thema noch
- Bisher haben wir uns noch nicht mit Industrie 4.0 beschäftigt
- Sonstiges:

[JA3) In welchen Bereichen haben Sie bzw. planen Sie Industrie 4.0 Projekte?

Bitte wählen Sie einen oder mehrere Punkte aus der Liste aus.

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Entwicklung/Engineering
- Produktion
- Intralogistik
- Logistik
- Einkauf
- Administration
- Vertrieb
- Service
- Sonstiges:

[JA4) Wer ist bei Ihnen der Initiator von Industrie 4.0 Aktivitäten?

Bitte wählen Sie einen oder mehrere Punkte aus der Liste aus.

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Initiative einzelner
- abteilungsspezifisch
- projektbezogen
- unternehmensweite Initiative
- Sonstiges:

[JA5) Haben Sie ein für Ihr Unternehmen anwendbares Industrie 4.0 Modell gefunden, nach dem Sie die Einführung von Industrie 4.0 planen?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- Ja
- Nein

[JA6) Welches Modell / welche Modelle dienen Ihnen als Vorlage?

Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Antwort war 'Ja' bei Frage '[JA5] (A5) Haben Sie ein für Ihr Unternehmen anwendbares Industrie 4.0 Modell gefunden, nach dem Sie die Einführung von Industrie 4.0 planen?)

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

[JA7) Wie haben Sie das Modell / die Modelle gefunden?

Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Antwort war 'Ja' bei Frage '[JA5] (A5) Haben Sie ein für Ihr Unternehmen anwendbares Industrie 4.0 Modell gefunden, nach dem Sie die Einführung von Industrie 4.0 planen?)

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- Durch eine Unternehmensberatung
- In der Fachpresse
- Im Internet
- Auf einer Veranstaltung
- Durch einen Verband
- Sonstiges:

[JA8] Was fehlt Ihnen bei bestehenden Modellen?

Bitte wählen Sie einen oder mehrere Punkte aus der Liste aus.

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Die Modelle sind zu abstrakt und nicht praxisnah
- Die Modelle sind in unserer Branche schlecht anwendbar
- Die Modelle beschreiben keine Umsetzungsstufen, sondern nur den Endzustand
- Die Modelle beschreiben IT-technische Veränderungen zu ungenau
- Die Modelle beschreiben Prozessveränderungen in der Produktion zu ungenau
- Die Modelle gehen zu wenig auf organisatorische Veränderungen und den Faktor Mensch ein
- Die Modelle gehen zu wenig auf die Vernetzung in der Supply Chain ein
- Die Modelle gehen zu wenig auf die Abbildung des Produktlebenszyklus ein
- Die Modelle gehen zu wenig auf das Thema "Individualisierte Produkte" ein
- Sonstiges:

[JA9] Ist in Ihrem Unternehmen das Thema Lean Production etabliert?

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	ja	größtenteils	kaum	nein
Ordnung, Sauberkeit, Standardisierung (5S)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Rüstopfimerung (SMED)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Total Productive Maintenance (TPM)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Selbstregelnde Prozesse (z.B. Kanban)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fließfertigung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Shopfloor Management (Regelmeetings, KVP, etc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Dezentrale Produktionsplanung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Trennung von Wertschöpfung und Logistik	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lean-Kultur / Nachhaltigkeit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

[JA10] Verfügt Ihr Unternehmen über ein Manufacturing Execution System (MES)?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- ja
- nein

[JA11] Welche MES-Funktionen setzen Sie ein?

Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Antwort war 'ja' bei Frage '10 [A10]' (A10) Verfügt Ihr Unternehmen über ein Manufacturing Execution System (MES)?)

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	ja	größtenteils	kaum	nein
Auftragsmanagement (Übernahme der Fertigungsaufträge vom ERP-System)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Feinplanung (Feinplanung der Fertigungsaufträge auf Maschinen/Arbeitsplätze und Optimierung von Rüstzeiten, Durchlaufzeiten, Termintreue, Beständen, etc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Personalmanagement (qualifikationsbasierte Personaleinsatzplanung, Fehlzeitenmanagement)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Betriebsmittelmanagement (Wartungskalender für Maschinen/Werkzeuge, Werkzeugeinsatzplanung auf Basis Feinplanung)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Materialmanagement (Materialbereitstellung, Chargenverfolgung, transparente Umlaufbestände)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Informationsmanagement (papierlose Darstellung von Fertigungsaufträgen, Zeichnungen, 3D-Modellen, Arbeitsanweisungen, etc. in der Produktion)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Datenerfassung (Erfassung von Mengen, Zeiten, Prozessdaten, Störungen, etc. in der Produktion)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Qualitätsmanagement (Erstellung von Prüfplänen und Erfassung von Qualitätsdaten)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Energiemanagement (Erfassung und Analyse von Energieverbräuchen, energieoptimierte Planung zur Vermeidung von Lastspitzen, etc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Leistungsanalyse (Analyse aller erfassten Daten, Kennzahlenberechnung, Korrelationen, etc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

B Hindernisse bei der Einführung von Industrie 4.0

[B1] Wie stark werden Sie durch die nachfolgend genannten Einflussfaktoren auf Ihrem Weg zu Industrie 4.0 behindert?

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	sehr stark	stark	gering	sehr gering
Fehlende geeignete Industrie 4.0 Modelle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fehlende Normen und Standards	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fehlende technische Lösungen (Sensorik, Aktoren, etc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fehlende Plattform zur Datenintegration	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Unzureichende IT-Infrastruktur (Netzwerk, Server, Maschinenanbindung, etc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fehlende Veränderungsbereitschaft bei den Mitarbeitern	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fehlende Veränderungsbereitschaft bei den Führungskräften	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fehlendes Wissen bei den Mitarbeitern	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fehlendes Wissen bei den Führungskräften	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kosten der Digitalisierung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Datenschutz	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Datensicherheit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
IT-Ausfallrisiko	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Markttransparenz bzgl. Industrie 4.0 Berater	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Markttransparenz bzgl. Lösungsanbieter (Hard-/Software)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Unklarer Nutzen von Industrie 4.0	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Unklare Verantwortlichkeiten für das Thema	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

[B2] Was könnte Ihrem Unternehmen die Einführung von Industrie 4.0 erleichtern?

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

C Fragen zum erwarteten Nutzen von Industrie 4.0

[C1] Wie hoch schätzen Sie den Nutzen von Industrie 4.0 für Ihr Unternehmen ein?

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	sehr groß	groß	gering	sehr gering
Vernetzung mit Lieferanten (digitaler Austausch von Bedarfen/Beständen und Lieferterminen)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Vernetzung mit Kunden (digitaler Austausch von Bestellungen/Beständen und Lieferterminen)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Produktionsplanung (autonome und optimierte Einplanung der Fertigungsaufträge in der Produktion)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Instandhaltung (autonome Überwachung dynamischer Wartungszyklen, Erkennung sich anbahnender Schäden)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Qualitätsmanagement (digitale Erfassung und Analyse von Qualitätsdaten, selbststeuernde Regelkreise)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Produktion (digitales Abbild der Produktion in Echtzeit, papierlose Kommunikation)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Autonome Produktion (selbststeuernde Produktionsprozesse)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Intralogistik (autonome Steuerung des Materialflusses z.B. durch fahrerlose Transportsysteme)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Datenanalyse (Big Data Analytics, automatische Regelkreise und Reports)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Tracking/Tracing (vollständige und digitale Erfassung aller Daten zur Rückverfolgung, z.B. Chargen, Qualitätsdaten, Prozessdaten, etc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Energieeffizienz (digitale Erfassung und Analyse von Energieverbräuchen, energieeffiziente Produktionsplanung)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Entwicklung/Engineering (digitale Abbildung des Entwicklungsprozesses, z.B. vom 3D-Modell zu NC-Daten)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Individualisierte Produkte (individuelle Produkte trotz Massenproduktion)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

D Fragen zum Unternehmen**[D1] In welcher Branche ist Ihr Unternehmen tätig?**

Bitte wählen Sie einen oder mehrere Punkte aus der Liste aus.

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Kunststoff/Gummi
- Metallverarbeitung
- Automotive
- Maschinen- und Anlagenbau
- Nahrungs- und Genussmittel
- Möbel-/Holzverarbeitung
- Papier/Druck/Verpackung
- Optik/Feinwerktechnik
- Elektrotechnik/Elektronik
- Sonstiges:

[D2] An wie vielen Standorten produziert Ihr Unternehmen?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1
- 2-5
- >5
- Sonstiges:

[D3] Wie viele Mitarbeiter beschäftigt Ihr Unternehmen?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- <=50
- 51-100
- 101-500
- 501-1000
- >1000

[D4] Wie ist Ihre Produktion überwiegend organisiert?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- Werkstatt
- Produktionsinseln
- Linien-/Fließfertigung
- Sonstiges:

[D5] Welche Logistikstrategie verfolgen Sie?

Bitte wählen Sie einen oder mehrere Punkte aus der Liste aus.

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Lagerfertigung
- Auftragsfertigung
- kundenspezifische Einzelfertigung
- Sonstiges:

[D6] Wie viele Endprodukte (ohne Varianten) stellen Sie her?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1
- 2-10
- 11-50
- >50

[D7) Wie viele Varianten produzieren Sie durchschnittlich je Endprodukt?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- 1
- 2-10
- 11-50
- >50

[D8) Wie viele Arbeitsschritte sind zur Produktion eines durchschnittlichen Endprodukts erforderlich?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- <=10
- 11-50
- >50

[D9) Wie hoch ist die durchschnittliche Durchlaufzeit in Tagen eines Produkts in der Fertigung?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- <=10
- 11-50
- >50

[D10) Welche Funktion haben Sie im Unternehmen?

Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- Geschäftsführung
- Werksleitung
- Produktionsleitung
- IT-Leitung
- Sonstiges

[]

D11) An welchen Forschungsthemen haben Sie Interesse?

(diese Antwort dient der Universität Potsdam zur bedarfsgerichteten Ausrichtung der Forschungsaktivitäten)

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

[]

Abbildung A 2 Testergebnisse des Smart Factory Maturity Index (SFMI)

Smart Factory Maturity Index (SFMI)			Reifegradstufen					Reifegradindex			
			Ausgangsbasis	Transparenz	Reaktionsfähigkeit/ Assistenz	Vernetzung/ Dezentralisierung	Prognosefähigkeit	Selbstorganisation/ Autonomie	26%	57%	1,9
Betrachtungsbereich	Bewertungskriterium	Dimension	0	1	2	3	4	5	IST	SOLL	Priorität
Unternehmen									27%	56%	2,2
Smart Factory Strategie	MTO	Es gibt noch keine Digitalisierungsstrategie.	Es gibt noch keine Strategie, jedoch erste Digitalisierungsprojekte ("Use Cases") in Pilotbereichen.	Es gibt in einzelnen Abteilungen eine Digitalisierungsstrategie, die lokal umgesetzt wird.	Es gibt eine klar dokumentierte Digitalisierungsstrategie für das gesamte Unternehmen, die in der Unternehmensstrategie verankert ist.	Die Umsetzung der unternehmensweiten Digitalisierungsstrategie wird durch ein Management Team überwacht.	Die Smart Factory Strategie wird kontinuierlich weiterentwickelt und an sich verändernde Rahmenbedingungen angepasst.	1	3	2	
Wissens- und Kompetenzmanagement	MTO	Es gibt kein System für systematisches Wissens- und Kompetenzmanagement.	Für die verschiedenen Stellen im Unternehmen wurden Kompetenzprofile erstellt, in denen die für die Stelle erforderlichen Fach- und Methodenkompetenzen, personale Kompetenzen und sozial-kommunikative Kompetenzen beschrieben sind.	Lernförderliche Arbeitsplätze ermöglichen die Qualifizierung der Beschäftigten "on-the-job".	Personenbezogene Kompetenzprofile sind vorhanden. Es ist ein System zur Analyse, Digitalisierung, Verknüpfung, Verteilung und Visualisierung des vorhandenen Wissens etabliert.	Die jeweiligen Kompetenzprofile der Beschäftigten werden kontinuierlich mit künftigen Bedarfen abgeglichen und gegebenenfalls Qualifizierungsmaßnahmen gestartet.	Es existiert ein autonomes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement, das die jeweiligen Kompetenzprofile der Beschäftigten kontinuierlich mit künftigen Bedarfen abgleicht und gegebenenfalls Qualifizierungsmaßnahmen startet.	3	4	3	
Change Management	MO	Bisher wurde noch keine Aktivitäten gestartet.	Den Beschäftigten wurde ein Gefühl der Dringlichkeit vermittelt.	Eine Führungs-kommission wurde aufgebaut und eine Smart Factory Vision und Strategie entwickelt.	Die Veränderungs-vision wurde an die Beschäftigten kommuniziert. Die Beschäftigten werden auf breiter Basis befähigt, die Veränderungen zu gestalten. Schnelle Erfolge werden geschaffen.	Die erzielten Erfolge werden konsolidiert und weitere Veränderungen eingeleitet.	Die kontinuierliche Weiterentwicklung zur Smart Factory ist zur Unternehmenskultur geworden.	1	3	2	
Unternehmens- und Führungskultur	MO	Die Ziele des Unternehmens sind nicht klar definiert.	Die Ziele des Unternehmens sind klar definiert. Entscheidungen werden zentral getroffen.	Entscheidungen werden dezentral in den Abteilungen getroffen.	Entscheidungen werden durch die Beschäftigten auf Basis der verfügbaren Informationen getroffen. Die Führungskraft als Coach.	Die Beschäftigten verfügen über große Handlungsspielräume und Entscheidungsbefugnisse. Sie haben eine große Veränderungsbereitschaft ("Unternehmer im Unternehmen").	Im Unternehmen herrscht eine Kultur der kontinuierlichen Verbesserung und Veränderung.	1	3	2	
Aufgabenspektrum der Beschäftigten in den indirekten Bereichen	MO	Das Aufgabenspektrum besteht aus Planungs- und Steuerungsaufgaben sowie sonstigen organisatorischen Tätigkeiten.	Teile der Aufgaben der indirekten Bereiche sind durch die Digitalisierung vereinfacht (z.B. Datenerfassung und -auswertung).	Teile der Aufgaben der indirekten Bereiche sind durch die Digitalisierung abgelöst. Teilweise neue Aufgaben, wie z.B. das "trouble shooting", das zudem interdisziplinäres Wissen erfordert.	Aufgaben im Bereich Planung und -steuerung sind dezentralisiert. Überwachung und Koordination des vernetzten Systems.	Aufgaben im Bereich Planung und -steuerung sind auf die operative Ebene verlagert. Überwachung und Koordination des vernetzten Systems.	Rolle als "Dirigenten der Wertschöpfung". Festlegung, Überwachung und Umsetzung von Smart Factory Strategien.	2	3	2	
IT-Landschaft in der Auftragsabwicklung	T	Es gibt neben dem ERP-System keine speziellen IT-Systeme in der Produktion.	Betriebsdatenerfassung (BDE) und Maschinendatenerfassung (MDE) oder Manufacturing Execution System (MES) zur Datenerfassung und -auswertung. CAQ-System (Insellösung) zur Prüfplanung und Erfassung von Qualitätsdaten.	Integriertes Manufacturing Execution System (MES) für Feinplanung, Materialmanagement, Betriebsmittelmanagement, Qualitätsmanagement, Personalmanagement, Energiemanagement.	Serviceorientierte Architektur mit dezentraler Datenerfassung und Verarbeitung durch Cyber-Physische Systeme, Gateways und Edge-Bausteine. IoT-Plattform zur Vernetzung und Bereitstellung der Daten.	(Cloudbasierte) Webservices und Anwendungen (Apps). Fähigkeit zur Prognose. Einsatz standardisierter Industrie 4.0 Komponenten (Verwaltungsschale).	(Cloudbasierte) Webservices und Anwendungen (Apps). Fähigkeit zur Selbststeuerung und Autonomie. Einsatz standardisierter Industrie 4.0 Komponenten (Verwaltungsschale).	1	2	3	
Horizontale und vertikale Integration der IT-Systeme	TO	Es gibt neben dem ERP-System keine speziellen IT-Systeme.	Vertikale Integration zwischen Shopfloor und ERP-System.	Vertikale und horizontale Integration der bestehenden Systeme in der Auftragsabwicklung.	Vollständige horizontale und vertikale Integration der Systeme in der Auftragsabwicklung und in der Entwicklung (z.B. CAD-CAM-NC-MES, ERP-PLM-MES).	Teilweise Integration in der Supply Chain und Datenaustausch mit Kunden und Wertschöpfungspartnern.	Vollständige Integration in der Supply Chain und Datenaustausch mit Kunden und Wertschöpfungspartnern.	1	3	3	
Kommunikation	TO	Die Kommunikation erfolgt über Telefon, Email und Meetings.	In einzelnen Bereichen werden Social Media Funktionen zum Chat zwischen den Beschäftigten eingesetzt.	Social Media Funktionen werden genutzt, um hilfreiche, kontextsensitive Informationen, wie Maschinenstatus, Instandhaltungshinweise, Auftragsänderungen, Handlungsempfehlungen, etc. an die Menschen zu "posten".	Social Media Funktionen werden umfassend zum interdisziplinären Informationsaustausch, zur Problemlösung sowie zur autonomen Abstimmung (z.B. Schicht-Doodle) eingesetzt.	Social Media Funktionen werden teilweise auch in der Kommunikation mit Kunden und Wertschöpfungspartnern eingesetzt.	Social Media Funktionen werden in der Kommunikation mit Kunden und Wertschöpfungspartnern eingesetzt.	1	2	1	
Big Data Analyse	MT	Manuelle Datenanalyse (z.B. mit Office Software).	Deskriptive Analysen in einzelnen Systemen.	Deskriptive und diagnostische Analysen in einzelnen Systemen.	Deskriptive und diagnostische systemübergreifende Analysen.	Deskriptive, diagnostische, und prädiktive Analysen (überwiegend systemübergreifend).	Deskriptive, diagnostische, prädiktive und präskriptive Analysen (überwiegend systemübergreifend).	1	2	2	

Entwicklung								43%	60%	1,5
Qualifikation der Beschäftigten	M	Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen in den Bereichen Prozessoptimierung und Industrie 4.0	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen in der Prozessoptimierung. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen, ganzheitliches Denken und sozial-kommunikative Kompetenzen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein autonomes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.	2	3	3
IT-Landschaft in der Entwicklung	T	Es gibt keine speziellen IT-Systeme in der Entwicklung.	2D/3D Computer Aided Design (CAD) und Computer Aided Manufacturing (CAM).	3D Computer Aided Design (CAD) und Computer Aided Manufacturing (CAM), Computer Aided Process Planning (CAPP).	IT für Layoutplanung, digitale Fabrikmodelle, Virtual Reality (VR), Digital Mock-Ups (DMU).	IT zur Simulation (Materialfluss, Ergonomie, Roboter und NC) und Fähigkeit zur Prognose.	IT zur autonomen Optimierung von Entwicklungsdaten.	1	2	1
Integration der IT in der Entwicklung	TO	Es gibt keine speziellen IT-Systeme in der Entwicklung.	Bei den vorhandenen Systemen handelt es sich um nicht vernetzte Inselösungen.	CAD und CAM sind gekoppelt.	CAD-CAM-NC Kopplung und bereichsübergreifende Integration (ERP, MES, CAQ, PLM).	Teilweise Integration in der Supply Chain und Datenaustausch mit Kunden und Wertschöpfungspartnern.	Vollständige Integration in der Supply Chain und Datenaustausch mit Kunden und Wertschöpfungspartnern.	3	4	2
Assistenz für die Konstruktion	MT	Manuelle Konstruktion (z.B. mit Office Software).	Einsatz von Computer Aided Design (CAD).	Einsatz von 3D Modellen.	Verfügbarkeit weiterer Daten aus ERP, MES, CAQ, PLM, etc. Einsatz eines digitalen Modells des Produkts (Digital Mock-Up).	Einsatz von Simulationen und Prognosen sowie weitere Daten aus ERP, MES, CAQ, PLM, etc.	Autonome Optimierung von Entwicklungsdaten.	3	4	2
Assistenz für die Fertigungsplanung	MT	Manuelle Fertigungsplanung (z.B. mit Office Software).	Einsatz von Computer Aided Design (CAD) bei der Layoutplanung.	Einsatz von Computer Aided Process Planning (CAPP) bei der Planung von Fertigungsprozessen, Verfahren und Betriebsmitteln.	Einsatz von Layoutplanungssoftware bei der Layoutplanung. Einsatz eines digitalen Fabrikmodells und Virtual Reality (VR).	Einsatz von Simulationen und Prognosen.	Autonome Optimierung von Layouts und Prozessen.	2	2	0
Assistenz für die Arbeitsvorbereitung	MT	Manuelle Arbeitsvorbereitung (z.B. im ERP-System).	Einsatz digitaler Zeichnungen.	Automatisierte Generierung von Stammdaten (Arbeitspläne, Stücklisten, etc.) und NC-Daten.	Automatisierte Stammdatenanlage im ERP-System und digitale Übertragung von Arbeitsanweisungen, Zeichnungen, NC-Daten, etc. an MES bzw. Maschinen.	Einsatz von Simulationen und Prognosen.	Autonome Optimierung von Stammdaten.	2	3	1

Produktion								20%	51%	1,4
Qualifikation der Beschäftigten	M	Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen in den Bereichen Prozessoptimierung und Industrie 4.0.	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen in der Prozessoptimierung. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen, ganzheitliches Denken und sozial-kommunikative Kompetenzen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein automatisiertes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.	1	3	2
Maschinen und Anlagen	T	Maschinen und Anlagen haben keine Schnittstellen für die Kommunikation.	Maschinen und Anlagen bieten unidirektionale Schnittstellen zur Datenerfassung.	Maschinen und Anlagen bieten Schnittstellen zur Datenerfassung und Steuerung (bidirektional).	Maschinen und Anlagen bieten standardisierte Schnittstellen zur Kommunikation untereinander (M2M).	Maschinen und Anlagen sind untereinander vernetzt und können durch IT gesteuert werden.	Autonome Kommunikation und Steuerung der Maschinen und Anlagen.	2	2	0
Intelligente Sensoren und Aktoren	T	Es werden keine Sensoren und Aktoren eingesetzt.	Einzelne Sensoren und Aktoren sind an die Automatisierungstechnik angebunden.	Sensoren und Aktoren erweitern physische Systeme (Maschine, Werkzeug, Fördermittel, etc.) zu Embedded Systems.	Vernetzte, intelligente Sensoren und Aktoren kommunizieren und interagieren als Cyber-Physische Systeme mit der Umgebung.	Intelligente, cyber-physische Sensoren und Aktoren kommunizieren untereinander, um Abläufe zu optimieren.	Intelligente Sensoren und Aktoren kommunizieren untereinander, um Abläufe autonom zu steuern.	0	2	1
Roboter	T	Keine Roboter vorhanden.	Koexistierende Roboter vorhanden.	Kooperierende Roboter vorhanden.	Einzelne kollaborative Roboter (Cobots) vorhanden.	Zahlreiche kollaborative Roboter (Cobots) vorhanden.	Autonom arbeitende kollaborative Roboter (Cobots) vorhanden.	0	2	1
Produktionsprozess	O	Wenig organisierte Produktionsprozesse. Lean Prinzipien sind nicht umgesetzt.	Die Produktion erfolgt nach dem Werkstattprinzip. Erste Lean Prinzipien wurden umgesetzt.	Die Produktion erfolgt in flexiblen, segmentierten Einheiten. Lean Prinzipien sind überwiegend umgesetzt.	Die Produktion erfolgt wertstromoptimiert nach dem Fließprinzip.	Die wertstromoptimierte Produktion ist modularisiert.	Die modularisierte Produktion hat die Fähigkeit zur Umkonfiguration der Module sowie des gesamten modularen Produktionssystems.	2	3	3
Assistenz bei Datenerfassung und -analyse	MT	Keine bzw. manuelle Erfassung auf Papier.	Automatisierte Erfassung von Mengen, Zeiten und Maschinenstatus in Echtzeit und automatisierte Rückmeldung der Daten an das ERP-System.	Reaktive Funktionalitäten zur Unterstützung der Beschäftigten, z.B. Signalisierung von Auftragsfortschritt, Abweichungen, Störungen, Kennzahlen. Automatisierte Erfassung weiterer Daten (Qualität, Chargen, etc.).	Automatisierte Erfassung und Analyse aller relevanten Daten aus der Produktion (Prozessdaten, Drehmomente, etc.).	Prognose von zu erwartenden Ereignissen oder Trends (Predictive Analytics).	Autonome Handlungsempfehlungen zur Zielerreichung oder Problemvermeidung (Prescriptive Analytics).	1	2	2
Kognitive Assistenz	MT	Keine kognitiven Assistenzsysteme im Einsatz.	Digitale Bereitstellung der Fertigungsaufträge, Arbeitsanweisungen, Zeichnungen, etc. am Arbeitsplatz.	Digitale Bereitstellung kontextsensitiver Informationen am Arbeitsplatz.	Digitale Bereitstellung kontextsensitiver Informationen und Handlungsanweisungen über mobile Geräte, Augmented Reality oder Pick-by-Light bzw. Pick-by-Voice.	Digitale Bereitstellung nutzer- und kontextsensitiver Informationen und Handlungsanweisungen über mobile Geräte, Augmented Reality oder Pick-by-Light bzw. Pick-by-Voice.	Autonome, lernende Bereitstellung nutzer- und kontextsensitiver Informationen und Handlungsanweisungen.	1	3	1
Physische Assistenz durch Roboter	MT	Keine Roboter im Einsatz.	Einsatz koexistierender Roboter.	Einsatz kooperierender Roboter.	Einsatz kollaborativer Roboter (Cobots) an einzelnen Pilotarbeitsplätzen.	Durchgängiger Einsatz kollaborativer Roboter (Cobots).	Einsatz autonom arbeitender kollaborativer Roboter (Cobots).	0	2	1
Aufgabenspektrum der Beschäftigten auf der operativen Ebene	MO	Das Aufgabenspektrum beschränkt sich auf die wertschöpfenden Tätigkeiten.	Wertschöpfende Tätigkeiten sowie Überwachung einzelner Maschinen und Anlagen.	Wertschöpfende Tätigkeiten. Überwachung einzelner Maschinen und Anlagen und Entscheidungsfindung.	Reduzierte wertschöpfende Tätigkeiten. Überwachung des vernetzten Systems und Entscheidungsfindung.	Reduzierte wertschöpfende Tätigkeiten. Überwachung und Koordination des vernetzten Systems.	Rolle als "Dirigenten der Wertschöpfung". Festlegung, Überwachung und Umsetzung von Produktionsstrategien.	2	4	2

Produktionsplanung und -steuerung								33%	60%	3,0
Qualifikation der Beschäftigten	M	Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen in den Bereichen Prozessoptimierung und Industrie 4.0.	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen in der Prozessoptimierung. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen, ganzheitliches Denken und sozial-kommunikative Kompetenzen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein automatisiertes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.	2	3	3
Steuerungsprinzip	TO	Zentrale Produktionsplanung und -steuerung ohne Systemunterstützung.	Zentrale Produktionsplanung und -steuerung im ERP-System (Grobplanung).	Zentrale Produktionsplanung und -steuerung im ERP-System (Grobplanung). Zentrale Feinplanung in Echtzeit im MES.	Zentrale Produktionsplanung und -steuerung im ERP-System (Grobplanung). Dezentrale Feinplanung in Echtzeit im MES.	Weitere Dezentralisierung der Steuerung modularer Produktionseinheiten mit Hilfe von Cyber-Physischen Systemen bzw. Smart Products.	Dezentrale Selbststeuerung und Autonomie der modularen Produktionseinheiten.	1	3	3
Assistenz für die Produktionsplanung und -steuerung	MT	Manuelle Produktionsplanung und -steuerung (z.B. mit Office Software).	Einsatz der Grobplanungsfunktionalitäten eines ERP-Systems.	Einsatz der Grobplanungsfunktionalitäten eines ERP-Systems und zusätzliche echtzeitbasierte, reaktive Feinplanungsfunktionalitäten eines MES. Kontextsensitiven Informationen z.B. zum Störungsmanagement.	Entlastung der Produktionsplanung und -steuerung durch Dezentralisierung der Feinplanung z.B. in einzelne Produktionsbereiche. Kontextsensitive Informationen und Handlungsanweisungen z.B. zum Störungsmanagement.	Weitere Entlastung von der Produktionsplanung und -steuerung durch eine zunehmende Selbststeuerung der modularen Produktionseinheiten sowie durch die Prognosefähigkeit derer Systeme. Nutzer- und kontextsensitiven Informationen und Handlungsanweisungen z.B. zum Störungsmanagement.	Weitestgehende Entlastung von Planungs- und Steuerungsaufgaben. Autonome, lernende Bereitstellung nutzer- und kontextsensitiver Informationen und Handlungsanweisungen.	2	3	3

Intralogistik								12%	40%	1,0
Qualifikation der Beschäftigten	M	Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen in den Bereichen Prozessoptimierung und Industrie 4.0.	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen in der Prozessoptimierung. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein automatisiertes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.	0	2	1
Intralogistik (Technik)	T	Manuell gesteuerte Transportmittel (z.B. Gabelstapler) ohne IT-Unterstützung.	Manuell gesteuerte Transportmittel (z.B. Gabelstapler) mit IT-gestützter Anzeige von Transportaufträgen.	Manuell gesteuerte Transportmittel (z.B. Gabelstapler) mit IT-gestützter Anzeige routenoptimierter Transportaufträge.	Fahrerlose Transportsysteme (FTS) auf festen Routen.	Fahrerlose Transportsysteme (FTS) auf flexiblen Routen.	Autonom gesteuerte Fahrerlose Transportsysteme (FTS).	0	2	1
Materialversorgungsprinzip	TO	Zentral gesteuerte Materialtransporte bzw. Materialbereitstellung "auf Zuru" ohne Systemunterstützung.	Zentrale Steuerung von Materialtransporten im ERP-System.	Zentrale Steuerung von Materialtransporten in Echtzeit im MES. Dezentrale Steuerung durch Kanban.	Dezentrale, routenoptimierte Steuerung von Materialtransporten in Echtzeit im MES (z.B. e-Kanban). Fahrerlose Transportsysteme (FTS) in Pilotbereichen.	Weitere Dezentralisierung von Materialtransporten zwischen modularen Produktionseinheiten durch Fahrerlose Transportsysteme (FTS). Berücksichtigung von Prognosen der zu erwartenden Materialverbräuche und Transporte.	Autonome Steuerung der Materialtransporte zwischen modularen Produktionseinheiten durch Fahrerlose Transportsysteme (FTS).	1	2	1
Assistenz für die Intralogistik (Kommissionierung)	MT	Kommissionierlisten in Papierform.	Einsatz digitaler Kommissionierlisten aus ERP-System.	Einsatz digitaler Kommissionierlisten auf mobilen Geräten.	Einsatz von Pick-by-Light, Pick-by-Voice.	Einsatz von Augmented Reality (AR) (Pick-by-Vision).	Einsatz autonom arbeitender (kollaborativer) Kommissionierroboter.	1	2	1
Assistenz für die Intralogistik (Materialtransport)	MT	Papiergestützte Materialbedarfslisten bzw. Transport "auf Zuru".	Einsatz digitaler Materialbedarfslisten aus ERP-System.	Einsatz digitaler Transportaufträge z.B. auf mobilem Gerät des Intralogistiklers.	Vernetzung aller Transportbedarfe und automatisierte Routenoptimierung. Entlastung durch erste Fahrerlose Transportsysteme (FTS).	Weitere Entlastung der Intralogistik durch den zunehmenden Einsatz von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS). Überwachung und Koordination des vernetzten Systems.	Weitestgehende Entlastung der Intralogistik durch den Einsatz von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS). Festlegung, Überwachung und Umsetzung von Intralogistikstrategien.	1	2	1

Instandhaltungsmanagement								13%	80%	3,0
Qualifikation der Beschäftigten	M	Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen in den Bereichen Prozessoptimierung und Industrie 4.0.	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen in der Prozessoptimierung. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein automatisiertes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.	0	4	3
Instandhaltungsprinzip	TO	Zentrale, periodisch vorbeugende bzw. reaktive Instandhaltung.	Zentrale Überwachung von Betriebsmitteln durch Condition Monitoring im MES.	Zentrale, vorbeugende Instandhaltung nach vorgegebenen Einsatzzeiten oder Takten im MES.	Dezentrale, vorbeugende Instandhaltung nach vorgegebenen Einsatzzeiten oder Takten im MES. Verfügbarkeit aller Instandhaltungsrelevanter Informationen, z.B. aus cyber-physischen Systemen (CPS).	Predictive Maintenance zur Erkennung sich anbahnender Störungen.	Prescriptive Maintenance mit Vorhersage möglicher Lösungswege zur Störungsvermeidung.	1	4	3
Assistenz für die Instandhaltung	MT	Manuelle Instandhaltungsplanung (z.B. mit Office Software).	Maschinenbezogene Auswertungen, wie Maschinenstatus in Echtzeit, Stillstandsanalysen und Kennzahlen (z.B. OEE) im MES.	Einsatz eines digitalen Wartungskalenders im MES zur vorbeugenden Instandhaltung	Dezentralen, vorbeugenden Instandhaltung durch Instandhaltungsmeldungen auf mobilen Geräten. AR/VR Funktionalitäten zur Fehleridentifikation und -behebung. Funktionalitäten zur Ersatzteilbestellung.	Frühzeitige Informationen über sich anbahnende Störungen.	Frühzeitige Informationen über sich anbahnende Störungen und Vorhersage möglicher Lösungswege zur Störungsvermeidung.	1	4	3

Werkzeugmanagement								40%	60%	1,0
Qualifikation der Beschäftigten	M	Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen in den Bereichen Prozessoptimierung und Industrie 4.0.	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen in der Prozessoptimierung. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein automatisiertes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.	1	3	2
Assistenz für das Werkzeugmanagement	MT	Manuelle Werkzeugverwaltung und -einsatzplanung (z.B. mit Office Software).	Einsatz einer Werkzeugverwaltung im ERP-System.	Werkzeugverwaltung im ERP, MES bzw. Tool Management System und echtzeitbasierte Werkzeugeinsatzplanung im MES. Erfassung und Bereitstellung relevanter Daten (z.B. Status, Stückzahl, Einsatzzeit, Temperatur, Druck).	Digitale Abbildung des gesamten Werkzeugkreislaufs (Lagerung, Identifizierung, Montage, Einstellung, Bereitstellung, Nutzung, Demontage, Aufbereitung).	Predictive Maintenance zur Erkennung sich anbahnender werkzeugbedingter Störungen.	Prescriptive Maintenance mit Vorhersage möglicher Lösungswege zur Vermeidung werkzeugbedingter Störungen.	3	3	0

Qualitätsmanagement								20%	50%	2.0
Qualifikation der Beschäftigten	M	Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen in den Bereichen Prozessoptimierung und Industrie 4.0.	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen in der Prozessoptimierung. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen, ganzheitliches Denken und sozial-kommunikative Kompetenzen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein automatisiertes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.	1	3	2
Assistenz für das Qualitätsmanagement	MT	Manuelle Qualitätsdatenerfassung und -auswertung (z.B. mit Office Software).	Einsatz eines CAQ-System (Insellösung) zur Prüfplanung und Prüfdatenerfassung.	Reaktive Funktionalitäten, (z.B. Visualisierung von Qualitätsabweichungen, Ursachenanalyse, Eskalations- und Workflowmanagement) eines integrierten CAQ-Systems (z.B. MES).	Umfassende, produktbezogene Überwachung von Qualitätsdaten, Auftragsdaten, Prozessdaten und Produktdaten sowie kontextsensitive Hinweise.	Predictive Quality zur Erkennung sich anbahnender Qualitätsabweichungen.	Prescriptive Quality mit Vorhersage möglicher Lösungswege zur Vermeidung von Qualitätsabweichungen.	1	2	2

Abbildung A 3 Testergebnisse des Smart Supply Chain Maturity Index (SCMI)

			Reifegradstufen					Reifegradindex				
Smart Supply Chain Maturity (SCMI)			Ausgangsbasis	Transparenz	Reaktionsfähigkeit/ Assistenz	Vernetzung/ Dezentralisierung	Prognosefähigkeit	Selbstorganisation/ Autonomie	33%	68%	1,6	
			0	1	2	3	4	5	IST	SOLL	Priorität	
Betrachtungsbereich	Bewertungskriterium	Dimension	Reifegradmerkmale									
Unternehmen								27%	67%	1,7		
	Smart Supply Chain Strategie	MTO	Es gibt noch keine Smart Supply Chain Strategie zur Neuausrichtung der eigenen Rolle in der Wertschöpfungskette sowie zum Aufbau eines agilen Supply Chain Netzwerks.	Es gibt noch keine Strategie, jedoch erste Projekte ("Use Cases") in Pilotbereichen.	Es gibt in einzelnen Bereichen eine Smart Supply Chain Strategie, die umgesetzt wird.	Es gibt eine klar dokumentierte Supply Chain Strategie für das gesamte Unternehmen, die in der Unternehmensstrategie verankert ist.	Die Umsetzung der unternehmensweiten Supply Chain Strategie wird durch ein Management Team überwacht.	Die Smart Supply Chain Strategie wird kontinuierlich weiterentwickelt und an sich verändernde Rahmenbedingungen angepasst.	1	3	2	
	Qualifikation der Beschäftigten	M	Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen in den Bereichen Supply Chain Management und Industrie 4.0.	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen im Bereich Supply Chain Management. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen, ganzheitliches Denken und sozial-kommunikative Kompetenzen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein automatisiertes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.	0	3	2	
	Horizontale Integration in der Supply Chain	TO	Es gibt neben dem ERP-System keine speziellen IT-Systeme für das Supply Chain Management. Der Datenaustausch mit Kunden, Lieferanten und Wertschöpfungspartnern erfolgt durch Telefon, Fax und Email.	Der Datenaustausch erfolgt über Electronic Data Interchange (EDI). Das ERP-System und das Lagerverwaltungssystem (LVS) bzw. Warehouse Management System (WMS) sind miteinander vernetzt.	Ein Supply Chain Management (SCM) System integriert die Prozesse in der Supply Chain.	Die Vernetzung in der Supply Chain erfolgt über Plattformen in der Cloud, auf denen Angebote und Nachfragen zu Produkten und Services ausgetauscht werden.	(Cloudbasierte) Webservices und Anwendungen (Apps) mit Fähigkeit zur Prognose. Einsatz standardisierter Industrie 4.0 Komponenten (Verwaltungsschale).	(Cloudbasierte) Webservices und Anwendungen (Apps) mit Fähigkeit zur Selbststeuerung und Autonomie. Einsatz standardisierter Industrie 4.0 Komponenten (Verwaltungsschale).	3	4	1	
Echtzeitstatus und Tracking								n.a.	n.a.	n.a.		
	Identifikation, Lokalisierung und Status	TO	Logistische Objekte (Produkte, Behälter, Transportmittel) werden nicht verfolgt.	Die Identifikation und Ortung erfolgt durch Scan eindimensionaler Barcodes (Strichcode) oder zweidimensionaler QR- bzw. Datamatrix Codes an festen Orten (z.B. Wareneingang).	Die Identifikation und Ortung erfolgt an RFID-Gates durch das automatische Auslesen von RFID-Tags, die an den logistischen Objekten angebracht sind.	Mit Sensoren ausgestattete "intelligente" Ladungsträger (Smart Logistics Objects) erfassen den Status der Ware (z.B. Temperatur, Druck, Füllstand).	Smart Logistics Objects stellen als cyber-physische Systeme ihre erfassten Daten zur Prozesssteuerung über das Internet zur Verfügung.	Smart Logistics Objects kommunizieren als Industrie 4.0 Komponente zur autonomen Steuerung mit anderen Industrie 4.0 Komponenten.	n.a.	n.a.	n.a.	
	Kognitive Assistenz	MT	Für die Beschäftigten im Außendienst gibt es keine kognitiven Assistenzsysteme.	Einsatz mobiler Endgeräte (z.B. Barcode Scanner).	Einsatz mobiler Endgeräte mit kontextsensitiven Informationen.	Kontextsensitive Informationen und Handlungsanweisungen auf mobilen Geräten oder Augmented Reality (AR) Lösungen.	Nutzer- und kontextsensitive Informationen und Handlungsanweisungen auf mobilen Geräten oder Augmented Reality (AR) Lösungen.	Autonome, lernende Bereitstellung nutzer- und kontextsensitiver Informationen und Handlungsanweisungen.	n.a.	n.a.	n.a.	
Planung, Steuerung und Überwachung								40%	70%	1,5		
	Assistenz bei der Planung, Steuerung und Überwachung	MT	Unterstützung durch das ERP-System bei der Kunden- und Lieferantenverwaltung, bei der Bedarfsplanung sowie bei der kaufmännischen Abwicklung von Bestellungen.	Entlastung durch den automatisierten und digitalen Datenaustausch mit Kunden und Lieferanten.	Einsatz einer integrierten Supply Chain Management Lösung. Unterstützung bei Entscheidungen (z.B. optimale Bestellmengen) und Problemlösungen durch kontextsensitive Informationen und Datenanalysen.	Entlastung durch die direkte, digitale Vernetzung mit Kunden, Lieferanten und Wertschöpfungspartnern über eine oder mehrere Cloud-Plattformen.	Weitere Entlastung von der Planung, Steuerung und Überwachung durch eine zunehmende Selbststeuerung der Prozesse in der Supply Chain. Nutzer- und kontextsensitive Informationen und Handlungsanweisungen. Prognose von Bedarfen, Lieferengpässen, etc.	Weitestgehende Entlastung von der Planung, Steuerung und Überwachung. Autonome, lernende Bereitstellung nutzer- und kontextsensitiver Informationen und Handlungsanweisungen.	3	4	2	
	Assistenz beim Transportmanagement	MT	Es gibt neben dem ERP-System keine speziellen IT-Systeme zur Unterstützung des Transportmanagements.	Einsatz eines Transport Management System (TMS). Bei eigenen Fahrzeugen werden Telematiklösungen (Position und Zustand der Fahrzeuge) eingesetzt.	Kontextsensitive Informationen und Datenanalysen zur Optimierung von Transportmitteln, Lägern und Übergabepunkten zur Reduzierung von Transportzeiten, Kosten und Emissionen.	Einsatz von Transport- und Frachtenbörsen zur Vergabe von Transportaufträgen sowie gegebenenfalls auch zur Annahme von Transportaufträgen (zur Vermeidung leerer Rückfahrten bei eigenem Fuhrpark).	Nutzer- und kontextsensitive Informationen und Handlungsanweisungen sowie Prognosen künftiger Transportbedarfe.	Weitestgehende Entlastung vom Transportmanagement durch den Einsatz autonomer Transportsysteme.	1	3	1	

Abbildung A 4 Testergebnisse des Smart Products & Life Cycle Maturity Index (PLCMI)

			Reifegradstufen					Reifegradindex			
Smart Products & Life Cycle Maturity Index (PLCMI)			Ausgangsbasis	Transparenz	Reaktionsfähigkeit/ Assistenz	Vernetzung/ Dezentralisierung	Prognosefähigkeit	Selbstorganisation/ Autonomie	14%	67%	2.0
			0	1	2	3	4	5	IST	SOLL	Priorität
Betrachtungsbereich	Bewertungskriterium	Dimension	Reifegradmerkmale								
Unternehmen									10%	60%	2.0
	Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus	MTO	Es gibt noch keine Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus.	Es gibt noch keine Strategie, jedoch erste Projekte ("Use Cases") in Pilotbereichen.	Es gibt in einzelnen Bereichen eine Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus, die umgesetzt wird.	Es gibt eine klar dokumentierte Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus für das gesamte Unternehmen, die in der Unternehmensstrategie verankert ist.	Die Umsetzung der unternehmensweiten Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus wird durch ein Management Team überwacht.	Die Strategie zur digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus wird kontinuierlich weiterentwickelt und an sich verändernde Rahmenbedingungen angepasst.	1	3	2
	Qualifikation der Beschäftigten	M	Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen im Bereich der digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus.	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen im Bereich der digitalen Abbildung des Produktlebenszyklus. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen, ganzheitliches Denken und sozial-kommunikative Kompetenzen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein automatisiertes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.	0	3	2
Smart Products									13%	60%	3.0
	Smart Product Intelligenz	T	Die Produkte haben keine cyber-physische Komponente.	Die Smart Products sind in der Lage, Informationen zu sammeln und zu speichern.	Die Smart Products sind in der Lage, Probleme zu erkennen.	Die Smart Products sind in der Lage, die erfassten Daten für übergeordnete Services bereitzustellen (z.B. als Industrie 4.0 Komponente über die Verwaltungsschale).	Die Smart Products sind in der Lage, einfache Entscheidungen zu treffen.	Die Smart Products sind in der Lage, komplexere, autonome Entscheidungen zu treffen.	1	3	3
	Smart Product Einsatz (Produktion)	TO	Die Produkte haben keine cyber-physische Komponente.	Während der Produktion sammeln die Smart Products Daten über ihren Herstellungsprozess.	Smart Products erkennen Probleme im Herstellungsprozess (z.B. Qualitätsabweichungen).	Smart Products liefern Informationen über ihren Bearbeitungsstand an übergeordnete Services bzw. an ein dynamisches Produktmodell (ihren digitalen Schatten).	Smart Products treffen in der Produktion auf Basis der erfassten oder erhaltenen Informationen Entscheidungen.	Smart Products steuern Produktionsprozesse autonom.	0	3	3
	Smart Product Einsatz (Nutzungsphase)	TO	Die Produkte haben keine cyber-physische Komponente.	Während der Nutzungsphase sammeln die Smart Products Daten über ihre Nutzung.	Smart Products erkennen Probleme während der Nutzung (z.B. Verschleiß).	Smart Products liefern Informationen über ihre Nutzung an übergeordnete datenbasierte Services (z.B. Maintenance).	Smart Products treffen in der Nutzungsphase auf Basis der erfassten oder erhaltenen Informationen Entscheidungen.	Smart Products steuern Funktionen bzw. Services während der Nutzung autonom.	1	3	3
Digitale Abbildung des Produktlebenszyklus									20%	80%	1.0
	Digital Mock-Up (DMU)	TO	Es ist kein Digital Mock-Up im Einsatz.	Ein Digital Mock-Up erfasst produktbezogene Daten während der Entwicklung/Konstruktion.	Ein Digital Mock-Up erfasst produktbezogene Daten zusätzlich in der Phase der Produktpflege.	Ein Digital Mock-Up erfasst produktbezogene Daten zusätzlich während der Produktion.	Ein Digital Mock-Up erfasst produktbezogene Daten zusätzlich in der Nutzungsphase.	Der Digital Mock-Up ist vollständig in die IT-Landschaft (ERP, MES, etc.) des Unternehmens integriert.	0	4	1
	Product Life-Cycle Management (PLM)	TO	Es ist kein PLM System im Einsatz.	Ein PLM-System erfasst produktbezogene Daten während der Entwicklung/Konstruktion.	Ein PLM-System erfasst produktbezogene Daten zusätzlich in der Phase der Produktpflege.	Ein PLM-System erfasst produktbezogene Daten zusätzlich während der Produktion.	Ein PLM-System erfasst produktbezogene Daten zusätzlich in der Nutzungsphase.	Das PLM-System ist vollständig in die IT-Landschaft (ERP, MES, etc.) des Unternehmens integriert.	2	4	1

Abbildung A 5 Testergebnisse des New Business Maturity Index (NBMI)

New Business Maturity Index (NBMI)			Reifegradstufen					Reifegradindex			
			Ausgangsbasis	Transparenz	Reaktionsfähigkeit/ Assistenz	Vernetzung/ Dezentralisierung	Prognosefähigkeit	Selbstorganisation/ Autonomie	2%	58%	2.0
Betrachtungsbereich	Bewertungskriterium	Dimension	0	1	2	3	4	5	IST	SOLL	Priorität
Unternehmen									10%	60%	2.0
	Strategie für neue Geschäftsmodelle	MTO	Es gibt noch keine Strategie für neue Geschäftsmodelle.	Es gibt noch keine Strategie, jedoch erste Projekte ("Use Cases") in Pilotbereichen.	Es gibt in einzelnen Bereichen eine Strategie für neue Geschäftsmodelle, die umgesetzt wird.	Es gibt eine klar dokumentierte Strategie für neue Geschäftsmodelle für das gesamte Unternehmen, die in der Unternehmensstrategie verankert ist.	Die Umsetzung der unternehmensweiten Strategie für neue Geschäftsmodelle wird durch ein Management Team überwacht.	Die Strategie für neue Geschäftsmodelle wird kontinuierlich weiterentwickelt und an sich verändernde Rahmenbedingungen angepasst.	1	3	2
	Qualifikation der Beschäftigten	M	Die Beschäftigten haben kein spezifisches Fachwissen im Bereich neuer, datenbasierter Geschäftsmodelle.	Die Beschäftigten verfügen über Fach- und Methodenkompetenzen im Bereich neuer, datenbasierter Geschäftsmodelle. Es gibt Kompetenzprofile für jeden Beschäftigten.	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen (Prozesse, Organisation, Methoden, IT).	Die Beschäftigten verfügen über breite, interdisziplinäre Fach- und Methodenkompetenzen, ganzheitliches Denken und sozial-kommunikative Kompetenzen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich weitergebildet. Ihre Kompetenzprofile werden laufend mit künftigen Bedarfen abgeglichen.	Die Beschäftigten werden kontinuierlich durch ein automatisiertes, beschäftigtenbezogenes Wissens- und Kompetenzmanagement weitergebildet.	0	3	2
Smart Products									0%	60%	3.0
	Status von Smart Products	TO	Es gibt keine Smart Products.	Smart Products werden in einem ersten Pilotprojekt getestet.	Smart Products werden bei einzelnen Kunden zur Erprobung eingesetzt.	Smart Products gehören zum festen Produktangebot des Unternehmens.	Mit Smart Products wird mehr als 25% des Gesamtumsatzes erzielt.	Mit Smart Products wird mehr als 50% des Gesamtumsatzes erzielt.	0	3	3
Smart Services									0%	80%	3.0
	Status von Smart Services	TO	Es gibt keine Smart Services.	Smart Services werden in einem ersten Pilotprojekt getestet.	Smart Services werden bei einzelnen Kunden erprobt.	Smart Services gehören zum festen Serviceangebot des Unternehmens.	Mit Smart Services wird mehr als 25% des Gesamtumsatzes erzielt.	Mit Smart Services wird mehr als 50% des Gesamtumsatzes erzielt.	0	4	3
Digitale Geschäftsmodelle									0%	60%	1.0
	Status von digitalen Geschäftsmodellen	TO	Es gibt kein digitales Geschäftsmodell.	Ein digitales Geschäftsmodell wird in einem ersten Pilotprojekt getestet.	Ein digitales Geschäftsmodell wird bei einzelnen Kunden erprobt.	Ein oder mehrere digitale Geschäftsmodelle gehören zum festen Leistungsangebot des Unternehmens.	Mit digitalen Geschäftsmodellen wird mehr als 25% des Gesamtumsatzes erzielt.	Mit digitalen Geschäftsmodellen wird mehr als 50% des Gesamtumsatzes erzielt.	0	3	1
Digitale Plattformen									0%	30%	1.0
	Nutzung fremder Plattformen	TO	Es werden keine digitalen Plattformen genutzt.	Eine oder mehrere digitale Plattformen werden in einem ersten Pilotprojekt getestet.	Eine oder mehrere digitale Plattformen werden zur Erprobung eingesetzt.	Über digitale Plattformen bereitgestellte Produkte und Services gehören zum festen Leistungsangebot des Unternehmens.	Auf digitalen Plattformen wird mehr als 25% des Gesamtumsatzes erzielt.	Auf digitalen Plattformen wird mehr als 50% des Gesamtumsatzes erzielt.	0	0	0
	Bereitstellung einer eigenen Plattform	TO	Es wird keine eigene digitale Plattform bereitgestellt.	Eine eigene Plattform wird entwickelt bzw. auf Basis von Technologiebausteinen oder White-label-Plattformen bereitgestellt.	Die eigene Plattform wird erprobt.	Über die eigene Plattform bereitgestellten Produkte und Services gehören zum festen Leistungsangebot des Unternehmens.	Auf der eigenen digitalen Plattform wird mehr als 25% des Gesamtumsatzes erzielt.	Auf der eigenen digitalen Plattform wird mehr als 50% des Gesamtumsatzes erzielt.	0	3	2