

# **Entwicklung einer KMU-spezifischen Einschätzungsmethode der Unternehmenssituation im Kontext von Industrie 4.0**

## **Bachelorarbeit**

**zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science (B.Sc.)**

Universität Kassel  
Institut für Produktionstechnik und Logistik  
Fachgebiet Produktorganisation und Fabrikplanung

**Kevin Adrian Schneider**

Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen  
Fachrichtung Maschinenbau

Erstprüferin: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel  
Zweitprüferin: Deike Gliem, M.Sc.

Kassel, den 09.09.2020



## Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Inhaltsverzeichnis .....</b>                                                                | <b>II</b> |
| <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>                                                             | <b>IV</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis .....</b>                                                               | <b>V</b>  |
| <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>                                                             | <b>VI</b> |
| <b>1 Einleitung.....</b>                                                                       | <b>1</b>  |
| 1.1 Problemstellung und Motivation.....                                                        | 1         |
| 1.2 Zielstellung der Arbeit.....                                                               | 3         |
| 1.3 Vorgehensweise zur Zielerreichung .....                                                    | 4         |
| <b>2 Theoretische Grundlagen .....</b>                                                         | <b>6</b>  |
| 2.1 Digitale Transformation und Industrie 4.0 .....                                            | 6         |
| 2.1.1 Wesentliche Begrifflichkeiten im Kontext der Digitalen Transformation .....              | 6         |
| 2.1.2 Historischer Hintergrund der vierten industriellen Revolution.....                       | 13        |
| 2.1.3 Charakteristika der Digitalen Transformation.....                                        | 15        |
| 2.1.4 Anforderungen an die Digitale Fabrikplanung.....                                         | 16        |
| 2.1.5 Potenziale und Hemmnisse der Digitalen Transformation .....                              | 20        |
| 2.2 Kleine und mittlere Unternehmen .....                                                      | 22        |
| 2.2.1 Definition .....                                                                         | 22        |
| 2.2.2 Bedeutung des Mittelstandes .....                                                        | 23        |
| 2.2.3 Eigenschaften kleiner und mittlerer Unternehmen .....                                    | 24        |
| 2.2.4 Charakteristische Geschäftsprozesse .....                                                | 26        |
| 2.3 Literaturrecherche und -analyse .....                                                      | 28        |
| 2.3.1 Systematiken zur Recherche.....                                                          | 29        |
| 2.3.2 Vorgehensmodelle zur Durchführung .....                                                  | 32        |
| 2.3.3 Bewertungsmethoden von Rechercheergebnissen .....                                        | 37        |
| <b>3 Bestehende Methoden zur Einschätzung des Digitalisierungsgrades von Unternehmen .....</b> | <b>41</b> |
| 3.1 Systematik für die Recherche.....                                                          | 41        |

|          |                                                                                                                             |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2      | Durchführung und Ergebnisse der Recherche.....                                                                              | 44         |
| 3.3      | Beschreibung bestehender Methoden zur Einschätzung des Digitalisierungsgrades von Unternehmen .....                         | 50         |
| 3.4      | Analyse der Methoden hinsichtlich ihrer Gemeinsamkeiten und Unterschiede .....                                              | 61         |
| 3.5      | Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse .....                                                                           | 64         |
| <b>4</b> | <b>Bewertung bestehender Einschätzungsmethoden hinsichtlich ihrer Eignung für den Mittelstand.....</b>                      | <b>67</b>  |
| 4.1      | Auswahl einer geeigneten Bewertungsmethode.....                                                                             | 67         |
| 4.2      | Bewertungskriterien.....                                                                                                    | 68         |
| 4.3      | Bewertungsskala.....                                                                                                        | 69         |
| 4.4      | Bewertung der Methoden hinsichtlich ihrer Eignung für den Mittelstand .....                                                 | 70         |
| 4.5      | Handlungsempfehlung .....                                                                                                   | 72         |
| <b>5</b> | <b>Entwicklung einer KMU-spezifischen Einschätzungsmethode der Unternehmenssituation im Kontext von Industrie 4.0 .....</b> | <b>73</b>  |
| 5.1      | Anforderungen an eine KMU-spezifische Einschätzungsmethode.....                                                             | 73         |
| 5.2      | Definition geeigneter Digitalisierungsstufen .....                                                                          | 74         |
| 5.3      | Entwicklung einer Methodik.....                                                                                             | 76         |
| 5.4      | Vorstellung der KMU-spezifischen Einschätzungsmethodik .....                                                                | 79         |
| <b>6</b> | <b>Evaluation der KMU-spezifischen Einschätzungsmethodik.....</b>                                                           | <b>95</b>  |
| 6.1      | Entwicklung eines Evaluationskonzeptes .....                                                                                | 95         |
| 6.2      | Durchführung der Evaluation.....                                                                                            | 96         |
| 6.3      | Evaluationsergebnisse .....                                                                                                 | 97         |
| 6.4      | Kritische Würdigung .....                                                                                                   | 99         |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>                                                                                    | <b>104</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis .....</b>                                                                                           | <b>106</b> |
|          | <b>Anhang.....</b>                                                                                                          | <b>127</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 2-1: Das Internet der Dinge, Dienste und Daten .....               | 9   |
| Abbildung 2-2: Elemente eines CPS.....                                       | 11  |
| Abbildung 2-3: Historie der industriellen Revolutionen.....                  | 14  |
| Abbildung 2-4: IFU-Referenzmodell: Der Fabriklebenszyklus .....              | 18  |
| Abbildung 2-5: Volkswirtschaftliche Bedeutung der KMU in Deutschland .....   | 23  |
| Abbildung 2-6: Vorgehensmodell zur Literaturrecherche .....                  | 33  |
| Abbildung 2-7: Die sechs Schritte der Literaturanalyse.....                  | 35  |
| Abbildung 2-8: Prozess der Literatursuche .....                              | 36  |
| Abbildung 2-9: Prozessschritte zur Auswahl von Quellen .....                 | 38  |
| Abbildung 2-10: Erweiterte Concept Matrix.....                               | 39  |
| Abbildung 2-11: Beispielhafte Darstellung einer Nutzwertanalyse .....        | 39  |
| Abbildung 2-12: Schematische Darstellung des Paarvergleichs .....            | 40  |
| Abbildung 3-1: Systematik zur Durchführung der Literaturrecherche .....      | 42  |
| Abbildung 3-2: Suchprozess in "Academic Search Ultimate" .....               | 45  |
| Abbildung 3-3: Aufbau einer Reifegrad-Kennwert-Matrix .....                  | 51  |
| Abbildung 3-4: Der Indikator „Maintenance“ der Quelle [32] .....             | 54  |
| Abbildung 3-5: Struktur des Reifegradmodells [44] .....                      | 55  |
| Abbildung 3-6: Modellaufbau des acatech Industrie 4.0 Maturity Index .....   | 56  |
| Abbildung 3-7: Anzahl Dimensionen und Indikatoren der Reifegradmodelle ..... | 65  |
| Abbildung 3-8: Anzahl der verwendeten Reifegradstufen .....                  | 65  |
| Abbildung 3-9: Häufigkeit der aufgezeigten Themenfelder .....                | 66  |
| Abbildung 5-1: Die Dimension "Produkte".....                                 | 80  |
| Abbildung 5-2: Die Dimension "Produktion".....                               | 83  |
| Abbildung 5-3: Die Dimension "(Ablauf-)Organisation“ .....                   | 84  |
| Abbildung 5-4: Die Dimension "IT und Daten" .....                            | 88  |
| Abbildung 5-5: Die Dimension "Management, Führung und Kultur" .....          | 90  |
| Abbildung 5-6: Die Dimension "Mitarbeiter/-innen" .....                      | 92  |
| Abbildung 5-7: Die Dimension "Geschäftsmodell und Netzwerk" .....            | 94  |
| Abbildung 6-1: Beispielhafte Evaluation eines Indikators.....                | 96  |
| Abbildung 6-2: Schematische Darstellung des Evaluationskonzepts .....        | 96  |
| Abbildung 6-3: Schematische Darstellung der Evaluationsdurchführung .....    | 97  |
| Abbildung 6-4: Potenzieller Modellindikator "Ressourceneffizienz" .....      | 102 |

## Tabellenverzeichnis

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 2-1: Größenklassen von Unternehmen .....                                   | 22 |
| Tabelle 2-2: Kern- und Unterstützungsprozesse .....                                | 27 |
| Tabelle 3-1: Mögliche Suchbegriffe für die Literaturrecherche .....                | 44 |
| Tabelle 3-2: Vorläufige Ergebnisliste aus "Academic Search Ultimate" .....         | 46 |
| Tabelle 3-3: Filtrierte Ergebnisliste der Primärrcherche .....                     | 47 |
| Tabelle 3-4: Filtrierte Ergebnisliste der Rückwärtssuche .....                     | 48 |
| Tabelle 3-5: Finale Ergebnisliste der Literaturrecherche .....                     | 49 |
| Tabelle 3-6: Übersicht über die Merkmale der Reifegradmodelle .....                | 62 |
| Tabelle 3-7: Synthese der Modelldimensionen .....                                  | 63 |
| Tabelle 4-1: Ergebnisse der Bewertung der Reifegradmodelle aus der Literatur ..... | 71 |
| Tabelle 5-1: Identifizierte einzigartige Modellindikatoren.....                    | 78 |
| Tabelle 5-2: Dimensionen und Indikatoren des entwickelten Reifegradmodells .....   | 79 |
| Tabelle 6-1: Zuordnung von Zahlwerten und Antwortoptionen.....                     | 98 |
| Tabelle 6-2: Evaluationsergebnisse des Indikators "Sensoren/Aktoren" .....         | 98 |
| Tabelle 6-3: Indikatorspezifische Evaluationsergebnisse .....                      | 99 |

## Abkürzungsverzeichnis

|               |                                                            |
|---------------|------------------------------------------------------------|
| AR            | Augmented Reality                                          |
| ASU           | Academic Search Ultimate                                   |
| B2B           | Business-to-Business                                       |
| BMI           | Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat           |
| BMWi          | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie               |
| CAQ           | Computer-aided quality                                     |
| CPPS          | Cyber-Physisches Produktionssystem                         |
| CPS           | Cyber-Physisches System                                    |
| DBIS          | Datenbank-Infosystem                                       |
| EB            | Exabyte                                                    |
| EDB Singapore | Economic Development Board Singapore                       |
| EFRE          | Europäischer Fonds für regionale Entwicklung               |
| ERP           | Enterprise-Resource-Planning                               |
| EU            | Europäische Union                                          |
| EZB           | Elektronische Zeitschriftenbibliothek                      |
| FMEA          | Failure Mode and Effects Analysis                          |
| IEC           | International Electrotechnical Commission                  |
| IFU           | Institut für Fabrikbetriebslehre und Unternehmensforschung |
| IKT           | Informations- und Telekommunikationstechnologie            |
| IoE           | Internet of Everything                                     |
| IoT           | Internet of Things                                         |
| IP            | Internet Protocol                                          |
| IPS           | Intrusion Prevention System                                |
| ISIS12        | Informations-Sicherheitsmanagement System in 12 Schritten  |
| ISMS          | Managementsystem für Informationssicherheit                |
| ISO           | Internationale Organisation für Normung                    |
| IT            | Informationstechnik                                        |

|           |                                                           |
|-----------|-----------------------------------------------------------|
| IWD       | Informationsdienst des Instituts der deutschen Wirtschaft |
| KMU       | Kleine und mittlere Unternehmen                           |
| KVK       | Karlsruher Virtueller Katalog                             |
| LAN       | Local Area Network                                        |
| M2M       | Maschine-zu-Maschine                                      |
| MA        | Mitarbeiter                                               |
| MES       | Manufacturing Execution System                            |
| CIM       | Computer-integrated manufacturing                         |
| BDE       | Betriebsdatenerfassung                                    |
| MMS       | Mensch-Maschine-Schnittstelle                             |
| MRK       | Mensch-Roboter-Kollaboration                              |
| NFC       | Near Field Communication                                  |
| OPAC      | Online Public Access Catalogue                            |
| PwC       | PricewaterhouseCoopers                                    |
| QFD       | Quality Function Deployment                               |
| RFID      | Radio-frequency identification                            |
| SEF       | Smart Electronic Factory e.V.                             |
| SPC       | Statistical Process Control                               |
| SPN       | Smart Protection Network                                  |
| SPS       | Speicherprogrammierbare Steuerung                         |
| TU        | Technische Universität                                    |
| VPN       | Virtual Private Network                                   |
| VR        | Virtual Reality                                           |
| WisLab DF | Wissenstransferlabor „Digitale Fabrik“                    |
| WLAN      | Wireless Local Area Network                               |
| ZB        | Zettabyte                                                 |

# 1 Einleitung

Durch die „digitale Vernetzung der Wertschöpfung“ (Bauernhansl et al. 2016, S. 4) im Zuge der vierten industriellen Revolution steht die Industrie derzeit vor einer historischen Zäsur – virtuelle und reale Welt sind im Begriff, vollständig miteinander zu verschmelzen (Bauernhansl et al. 2016, S. 4; BMWi 2015, S. 3; Kagermann 2017, S. 235). Der Kerngedanke der Revolution besteht in der Echtzeit-Vernetzung aller betrieblichen Ressourcen und Akteure „über alle Wertschöpfungsstufen hinweg und unter Einsatz neuer Technologien“ (Schallmo 2019, S. 5), insbesondere des Internets der Dinge und Dienste. Diese neu gewonnene Möglichkeit bildet zugleich die Basis für neuartige, teils disruptive Geschäftsmodelle (Bauernhansl et al. 2016, S. 3).

Die Einsparpotenziale und Effizienzgewinne durch die Industrie 4.0 ermöglichen dabei eine Steigerung der industriellen Gesamtproduktivität um bis zu 50 % (ebd.); Studien schätzen allein für Deutschland ein zusätzliches Wachstumspotenzial zwischen 200 und 400 Milliarden Euro bis 2025 (BMWi 2015, S. 4). Folglich sieht Bundesminister a. D. Sigmar Gabriel in der „Digitalen Transformation [...] eine der zentralen Gestaltungsaufgaben der nächsten Jahre“ (BMWi 2015, S. 2) und auch Autoren wie Bauernhansl et al. (2016, S. 4) betonen die Dringlichkeit der Thematik.

Jedoch bringen die Veränderungen nicht nur Chancen mit sich, sondern schaffen auch ganz neue Herausforderungen (BMWi 2015, S. 3). Das breite Spektrum neuartiger Technologien und Anwendungen erhöht die Komplexität der Geschäftsprozesse und die globale Vernetzung sorgt für eine noch schärfere Wettbewerbsintensität (Fechtelpeter et al. 2019, S. 3).

Insbesondere bei den kleinen und mittleren (Industrie-)Unternehmen (KMU) herrscht dabei oft große Unsicherheit bezüglich der bevorstehenden technologischen Veränderungen (Bauernhansl et al. 2016, S. 3). Mit dem Ziel, KMU den Einstieg in und die Umsetzung von Industrie 4.0 zu erleichtern, sind auf Bundes- und Länderebene in den letzten Jahren bereits verschiedene Unterstützungsangebote geschaffen worden. Der digitale Fortschritt variiert derzeit jedoch innerhalb der Unternehmenslandschaft stark (Fechtelpeter et al. 2019, S. 7); das BMWi (2015, S. 6) spricht gar von einer „digitalen Zweiklassengesellschaft“. Um KMU bei der Digitalen Transformation tatsächlich bedarfsgerecht unterstützen und fördern zu können, ist es daher von zentraler Bedeutung, zunächst ein objektives Bild über den digitalen Ist-Stand eines Unternehmens zu generieren.

## 1.1 Problemstellung und Motivation

Mittelständische Unternehmen besitzen andere Voraussetzungen und Charakteristika als Großunternehmen, stehen aber nicht weniger komplexen Herausforderungen gegenüber

(Bischoff 2015, S. 41 f.). Die ökonomische Bedeutung des Mittelstands ist dabei unumstritten, er gilt als „Fundament“ (Bosse, Zink 2019, S. 8) beziehungsweise „Rückgrat der deutschen Wirtschaft“ (Fechtelpeter et al. 2019, S. 3).

Im Mittelstand überwiegt der Anteil eigentümergeführter Unternehmen; die Führungskräfte haben oft eine gute persönliche Bindung zu ihren Angestellten und die Hierarchien sind im Vergleich zu großen Unternehmen flach. Daher sind die Informationswege kürzer und Entscheidungen können schneller und flexibler getroffen werden. Auch der Austausch mit ihren Kunden ist bei KMU deutlich ausgeprägter als bei Konzernen, häufig bieten sie kundenindividuelle Produktlösungen an (Bischoff 2015, S. 42 ff.). Aufgrund ihrer besonderen Organisationsstruktur mit flachen Hierarchien denken und handeln KMU zudem wirtschaftlich langfristiger, was die Realisierung von Innovationen begünstigt. Mittelständische Unternehmen gelten deshalb seit jeher als besonders kreativ, wandlungsfähig und innovationsfreudig (Becker et al. 2017, S. 1), weshalb sie besonders geeignet sind, die Konzepte der Industrie 4.0 hinsichtlich neuer Produkte, Märkte und Geschäftsmodelle umzusetzen (VDI ZRE 2017, S. 15).

Industrie 4.0 ist aber nicht nur „eine Chance für Deutschland als Produktionsstandort“ (acatech, Forschungsunion 2013, S. 19). Die fortwährend steigende Dynamik und Komplexität der industriellen Produktion stellt insbesondere für KMU eine Herausforderung dar (Bauernhansl et al. 2016, S. 3). Dem Mittelstand stehen deutlich geringere finanzielle und personelle Ressourcen zur Verfügung als großen Unternehmen; Fehlinvestitionen können nur schwer abgefangen werden (Bischoff 2015, S. 43). Daher ist es für KMU besonders wichtig, Industrie 4.0-Projekte und Potenziale korrekt zu ermitteln. Die von Becker et al. (2017, S. 119), der Bertelsmann Stiftung (2018, S. 6) sowie Fechtelpeter et al. (2019, S. 7) durchgeführten Studien zeigen, dass sich Führungskräfte von KMU großen Hürden im Zuge der Digitalen Transformation gegenübersehen. Diese bestehen vor allem in unzureichenden (IT-)Kompetenzen ihrer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Fachkräftemangel), dem Mangel an definierten Industriestandards und einer eigenen durchgängigen Transformationsstrategie sowie Bedenken hinsichtlich Datensicherheit und -schutz. Auch bezüglich Potenzial- und Wirtschaftlichkeitsbewertung sowie dem Zugang zu praktischen, realen Anwendungsbeispielen herrscht Unsicherheit (Fechtelpeter et al. 2019, S. 17 ff.).

Mit seinem starken industriellen Kern und seinem technologischen Knowhow besitzt Deutschland beste Voraussetzungen zur erfolgreichen Umsetzung der Digitalen Transformation (acatech, Forschungsunion 2013, S. 21). Die vorhandenen Potenziale insbesondere der KMU zu nutzen und sie bei der Bewältigung der bestehenden Hürden zu unterstützen, ist essenziell, um die Wettbewerbsfähigkeit des Industriestandortes Deutschland auch in Zukunft sicherzustellen (BMW i 2015, S. 3). In diesem Zusammenhang äußern gemäß einer Studie von Fechtelpeter et al. (2019, S. 7) viele KMU den Wunsch nach lokalen Unterstützungsangeboten

und der Möglichkeit, technologische Aspekte der Industrie 4.0 anhand praktischer Anwendungsbeispiele schnell und realitätsnah kennenlernen und erproben zu können.

Hier setzt das KMU-Wissenstransferlabor „Digitale Fabrik“ (KMU-WisLab DF) des Fachgebiets Produktorganisation und Fabrikplanung der Universität Kassel an. Ziel des dreijährigen Forschungsprojekts, das aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und aus Mitteln des Landes Hessen gefördert wird, ist es, KMU aus der Region Nordhessen die vielfältigen Handlungsfelder der Industrie 4.0 aufzuzeigen und somit Transparenz bezüglich vorhandener Optimierungs- und Nutzenpotenziale zu schaffen. Im Fokus steht dabei das Handlungsfeld der digitalen, modell- und datenbasierten Planung von Produktions- und Logistiksystemen mit Hilfe von Methoden und Werkzeugen der Digitalen Fabrik (WisLab DF 2020). Im Rahmen des Projekts soll hierfür ein modulares Lernkonzept entwickelt werden, sodass die Methoden und Lerninhalte individuell kombinierbar und so auf die Gegebenheiten des jeweiligen Unternehmens anpassbar sind. Die digitalen Modelle werden dabei durch physische Modelle, wie beispielsweise der LEGO®-Modellfabrik, ergänzt, wodurch die Wirkzusammenhänge innerhalb einer vernetzten Produktion veranschaulicht und die Praxisnähe gesichert werden kann.

Die Wichtigkeit der individuellen Anpassbarkeit der Lehrinhalte ergibt sich aus der starken Varianz innerhalb der deutschen KMU-Landschaft hinsichtlich des Industrie 4.0 Fortschritts und Knowhows. KMU unterscheiden sich aber nicht nur bezüglich ihrer Ausgangssituation, sondern auch ihrer Zielstellung. Folglich ist der Weg zur Industrie 4.0 für jedes Unternehmen individuell zu gestalten (Schuh et al. 2017, S. 14). Es wird deutlich, dass die Bewertung des digitalen Ist-Zustands eines Unternehmens eine unabdingbare Grundvoraussetzung zur zielgerichteten Unterstützung auf dem Weg der Digitalen Transformation eines jenen darstellt. Deshalb soll im Rahmen dieser Arbeit, die sich in die erste Projektphase des KMU-WisLab DF eingliedert, eine KMU-spezifische Methode zur Einschätzung des Digitalisierungsgrades eines Unternehmens auf Basis bestehender Bewertungsansätze, wie beispielsweise des Maturity Indexes nach Schuh et al.(2017) entwickelt werden.

Die Vielzahl existierender Bewertungsansätze und Readiness-Checks sorgt derzeit für Unübersichtlichkeit und verdeutlicht daher den Bedarf nach einer vereinheitlichten, auf die Besonderheiten von KMU angepassten, Bewertungsmethode.

## **1.2 Zielstellung der Arbeit**

Das Ziel dieser Arbeit besteht in der Entwicklung einer KMU-spezifischen Einschätzungsmethode der Unternehmenssituation im Kontext von Industrie 4.0, die die Definition von Digitalisierungsgraden – unter anderem hinsichtlich der Digitalen Planung – ermöglicht. Dafür ist es

notwendig, den aktuellen Forschungsstand der Digitalen Transformation in der Industrie – insbesondere im KMU-Umfeld – durch eine systematische Literaturrecherche aufzuzeigen. Hierbei soll auch ein Überblick über bestehende Transformationsprojekte und den aktuellen Forschungs- und Umsetzungsstand der Digitalen Transformation in Deutschland gegeben werden. Auf dieser Grundlage sollen die bereits in der Literatur existierenden Ansätze zur Bewertung der Unternehmenssituation in Bezug auf die Digitale Transformation aufgezeigt und hinsichtlich ihrer Eignung für KMU bewertet werden. So kann anschließend die oben genannte Methode fundiert entwickelt werden.

Das Ergebnis dieser Arbeit bildet die Basis zur Ermittlung des Status Quo von KMU bezüglich der Digitalen Transformation. In einer an diese Arbeit anschließenden Interviewstudie sollen KMU verschiedener Branchen aus der Region Hessen befragt und mittels der entwickelten Methode analysiert und eingestuft werden. Hierdurch soll ein Überblick über die Situation nordhessischer Unternehmen in Bezug auf Industrie 4.0 gewonnen und die Identifikation KMU-spezifischer Problemfelder ermöglicht werden. Weiterführend sollen unternehmensspezifische Planungs- und Experimentierszenarien erarbeitet, validiert und gegebenenfalls adaptiert werden.

Insgesamt soll diese Arbeit also die Grundlage für eine situationsabhängige und problemspezifische Förderung von KMU im Raum Hessen auf Basis ihres jeweiligen Digitalisierungsgrades bilden (WisLab DF 2020). Somit soll dem bereits geschilderten Bedarf an lokalen, praxisnahen und fähigkeits- sowie bedarfsorientierten Unterstützungsmöglichkeiten zum Aufbau einschlägiger Industrie 4.0-Kompetenzen (Fechtelpeter et al. 2019, S. 3) von KMU nachgekommen werden. Es gilt, die „nächste Innovationswelle anzustoßen und aktiv [zu] gestalten“ (Kagermann 2017, S. 236), um die Zukunft des Produktionsstandorts Deutschland zu sichern. Denn die „Grundlagen für den Wettlauf um die Produkte und Märkte von morgen“ (BMW 2015, S. 2) werden schon heute gelegt.

### **1.3 Vorgehensweise zur Zielerreichung**

Die Arbeit wird mit der Beschreibung der Problemstellung und der zugrunde liegenden Motivation eingeleitet. Es folgen die Formulierung der Zielstellung sowie die Beschreibung des zur Zielerreichung angedachten Vorgehens.

Um im weiteren Verlauf eine KMU-spezifische Einschätzungsmethode des Digitalisierungsgrades anhand bereits in der Forschung und Literatur vorhandener Bewertungsmethoden ableiten und evaluieren zu können, sollen besagte Methoden zunächst im Rahmen einer systematischen Literaturrecherche ermittelt werden. Um den Rechercheprozess zu fundieren, werden in Kapitel 2 die notwendigen theoretischen Grundlagen betrachtet. Hierbei werden in Abschnitt 2.1 zunächst die wesentlichen Begrifflichkeiten und der historische Kontext der vierten

industriellen Revolution erläutert. Anschließend werden die Charakteristika der Digitalen Transformation und ihre Implikationen für die Digitale Fabrikplanung aufgezeigt sowie die daraus resultierenden Potenziale und Hemmnisse gegenübergestellt.

In Abschnitt 2.2 wird zunächst eine Definition von KMU eingeführt, ihre Bedeutung für den Produktionsstandort Deutschland aufgezeigt, ihre besonderen Eigenschaften dargestellt und die Charakteristika ihrer Geschäftsprozesse betrachtet. Abschließend wird im Abschnitt 2.3 die Grundlage für eine systematische Literaturrecherche gelegt, indem verschiedene Vorgehensmodelle zur Recherche sowie Methoden zur Bewertung der Rechercheergebnisse beleuchtet werden.

Diese Grundlagen ermöglichen die qualifizierte Durchführung einer Literaturrecherche bezüglich bestehender Einschätzungsmethoden des Digitalisierungsgrades von Unternehmen im dritten Kapitel. Hierbei wird in Abschnitt 3.1 zunächst eine Systematik für die Recherche definiert, um sicherzustellen, dass ein vollständiges Bild bestehender Methoden dargestellt wird. Auf die Beschreibung der ermittelten Einschätzungsmethoden folgt eine Analyse hinsichtlich ihrer Gemeinsamkeiten und Unterschiede sowie eine Zusammenfassung der Rechercheergebnisse.

In Kapitel 4 werden die aufgezeigten Methoden im Hinblick auf ihre Eignung für die Einschätzung speziell von KMU bewertet, wobei zunächst eine geeignete Bewertungsmethode ausgewählt wird und die resultierenden Bewertungskriterien sowie eine Bewertungsskala festgelegt werden. Das Kapitel wird daraufhin in Abschnitt 4.5 mit einer Handlungsempfehlung, welche Aspekte einer Methode für die Einschätzung von KMU geeignet sind, abgeschlossen.

Den Kern der Arbeit bildet das fünfte Kapitel, in dem auf Basis der Handlungsempfehlung eine eigene, KMU-spezifische Einschätzungsmethode der Unternehmenssituation im Kontext von Industrie 4.0 entwickelt wird. Dabei werden zunächst die Anforderungen an eben jene Methode und im Folgenden geeignete Stufen zur Beschreibung des Digitalisierungsgrades eines KMU definiert. Die daraus entwickelte Bewertungsmethodik wird im Abschnitt 5.4 vorgestellt.

Die Evaluation der erarbeiteten Methode erfolgt in Kapitel 6. Auf die Entwicklung eines Evaluationskonzeptes folgen die Durchführung der Evaluation im Kreis des Projektkonsortiums sowie die Beschreibung der gewonnenen Ergebnisse und schließlich eine kritische Würdigung. Im siebten Kapitel wird die Arbeit abgeschlossen, indem ihre Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick gegeben werden.

## **2 Theoretische Grundlagen**

Um im Rahmen dieser Arbeit eine KMU-spezifische Einschätzungsmethode der Unternehmenssituation im Kontext von Industrie 4.0 entwickeln zu können, müssen zunächst verschiedene theoretische Grundlagen betrachtet werden. Zu Beginn soll die Digitale Transformation mitsamt den wichtigsten Begrifflichkeiten und Charakteristika, dem historischen Hintergrund und der bestehenden Potenziale und Hemmnisse sowie der resultierenden Anforderungen an die Digitale Fabrikplanung eingeführt werden. Anschließend sollen KMU definiert und ihre spezifischen Eigenschaften und Geschäftsprozesse beleuchtet werden, um anhand dessen später die zu entwickelnde Einschätzungsmethode entsprechend ausrichten zu können. Außerdem soll der Prozess der systematischen Literaturrecherche und -analyse als Grundlage für die in Kapitel 3 beschriebene Recherche bestehender Reifegradmodelle erläutert werden.

### **2.1 Digitale Transformation und Industrie 4.0**

Der Begriff Industrie 4.0 wird seit geraumer Zeit verwendet, um die sich anbahnende vierte industrielle Revolution, deren Kern in der „Vernetzung von industrieller Infrastruktur und allen an der Wertschöpfung beteiligten Akteure[n]“ (Obermaier 2019, S. 3) besteht, zu beschreiben. Weder für Industrie 4.0, noch für den in diesem Kontext oft synonym verwendeten Terminus der Digitalen Transformation existieren derzeit allgemeingültige Definitionen (Schallmo 2019, S. 3). Folglich soll in diesem Kapitel zunächst Klarheit hinsichtlich dieser beiden Begriffe geschaffen werden, indem sie definiert und ihre wesentlichen Aspekte dargestellt werden. Um die Entwicklung hin zur Industrie 4.0 nachvollziehen zu können, wird die Historie der industriellen Revolutionen betrachtet. Anschließend werden allgemeine Charakteristika der Digitalen Transformation aufgezeigt und vor dem Hintergrund der Forschungsarbeit des Fachgebiets für Produktionsorganisation und Fabrikplanung die Implikationen der Revolution für die Digitale Fabrikplanung untersucht. Abgeschlossen wird das Kapitel durch eine Betrachtung der Potenziale und Hemmnisse der Digitalen Transformation.

#### **2.1.1 Wesentliche Begrifflichkeiten im Kontext der Digitalen Transformation**

Schallmo (2019, S. 3 ff.) betont, dass für den Begriff der Digitalen Transformation nicht nur keine allgemeine Definition vorliegt, sondern er auch oftmals synonym zu den Begriffen Digitalisierung und Digitales Zeitalter verwendet wird. Als wichtigste Merkmale der Digitalen Transformation nennt er die „Vernetzung von Akteuren, wie zum Beispiel Unternehmen und Kunden, über alle Wertschöpfungsstufen hinweg und unter Einsatz neuer Technologien“ (Schallmo 2019, S. 5). Dies erfordert insbesondere Fähigkeiten zur Gewinnung, zum Austausch und zur Analyse von Daten, um diese in Form von Informationen zum Treffen von Entscheidungen

sowie zum Einleiten betrieblicher Aktivitäten nutzen zu können. Die Digitale Transformation kann sich dabei nicht nur auf (Produktions-)Prozesse und Produkte, sondern auch auf das gesamte Geschäftsmodell beziehen (ebd.).

Auch der Begriff Industrie 4.0, der erstmals durch eine Promotorengruppe auf der Hannover Messe 2011 ausgerufen (Obermaier 2019, S. 5) und eine Kurzversion des Ausdrucks „vierte industrielle Revolution“ darstellt (Reinhart 2017, S. xxxiv), ist nicht allgemeingültig definiert. Die Plattform Industrie 4.0 (2020d) versteht unter Industrie 4.0 die „intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen in der Industrie mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnologie“. Obermaier (2017, S. 3) definiert Industrie 4.0 als „die Vernetzung von industrieller Infrastruktur (Maschinen, Werkstücke, Produkte und Menschen) im Bereich der industriellen Produktion mittels sogenannter Cyber-Physischer Systeme (CPS)“. Auch Reinhart (2017, S. xxxiv) beschreibt Industrie 4.0 als die „intensive Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligten Akteure und Systeme“ durch die „Erweiterung physischer Systeme um Sensoren und Aktoren sowie eine eingebettete Software“, also durch CPS. Aus produktionswissenschaftlicher Sicht bilden „das Internet der Dinge und die neuen Möglichkeiten, Ressourcen, Dienste und Menschen in der Produktion auf Basis Cyber-physischer Systeme in Echtzeit zu vernetzen“ (Bauernhansl et al. 2016, S. 6) den Kern der Industrie 4.0.

Insgesamt wird deutlich, dass die Autoren allesamt die Vernetzung der verschiedenen Akteure des Wertschöpfungsprozesses mittels neuer Technologien, insbesondere dem Internet der Dinge und Cyber-Physischen Systemen, als wesentliche Merkmale der Industrie 4.0 ansehen. Ebenso kennzeichnend ist, dass der Daten- beziehungsweise Informationsaustausch, der durch die besagte Vernetzung angestrebt wird, in Echtzeit stattfindet (Obermaier 2019, S. 4). Die starke Ähnlichkeit zu Schallmos Definition der Digitalen Transformation (s. o.) lässt bereits vermuten, dass die beiden Begriffe oftmals synonym verwendet werden. Obermaier (2019, S. 8) ist hier zwar etwas präziser als andere Autoren und bezeichnet die Digitale Transformation als „das erfolgreiche Beschreiten des Transformationspfads“ eines Unternehmens, an dessen Ende die erfolgreiche Umsetzung der Industrie 4.0 steht, doch auch dieser Unterschied ist letztlich marginal. Daher werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Begriffe Digitale Transformation und Industrie 4.0 beziehungsweise vierte industrielle Revolution synonym verwendet.

Neben der Definition des Begriffs Digitale Transformation beziehungsweise Industrie 4.0 selbst müssen allerdings noch weitere Begrifflichkeiten, die in diesem Kontext relevant sind, erklärt werden.

### **Internet der Dinge**

Die Grundlage der Vernetzung und damit der nächsten Innovationswelle bildet das sogenannte Internet der Dinge, auf Englisch „Internet of Things“ (IoT) (Kagermann 2017, S. 236).

Die Vision besteht hierbei in der Verlängerung des Internets in die reale Welt hinein, indem physische Objekte, wie zum Beispiel auch Alltagsgegenstände, an das Internet angebunden werden, und Informationen mit der virtuellen Welt oder sogar untereinander austauschen können und so zu Smarten Objekten werden (Mattern, Flörkemeier 2010, S. 107 ff.). Die Vorstellung einer umfassenden Informatisierung und Vernetzung der physischen Welt und ihrer Objekte ist allerdings keineswegs neu, sondern findet ihren Ursprung in der 1991 von Mark Weiser formulierten Idee des „Ubiquitous Computing“. Weiser beschreibt dabei eine Systemumgebung, in der zahlreiche Computer in Form von Tablets und Sensoren miteinander agieren können, sodass die rechnergestützte Informationsverarbeitung allgegenwärtig („ubiquitous“) wird. Die erste dokumentierte Verwendung des Begriffs des Internets der Dinge erfolgte schließlich im Jahr 2002 durch Kevin Ashton. Im Jahr 2009 wurde das Internet der Dinge erstmals auch durch die EU-Kommission betrachtet und als „allgemeiner Wandel des Internets von einem Computernetz zu einem Netz untereinander verbundener Gegenstände“ (Mattern, Flörkemeier 2010, S. 108) definiert. (Mattern, Flörkemeier 2010, S. 107 f.; Andelfinger, Hänisch 2017, S. 12; Wikipedia 2020d)

Möglich wurde diese Ausweitung des Internets durch die gemäß des Moore'schen Gesetzes exponentiell steigende Rechenleistung und Speichergröße sowie die damit verbundene Abnahme der Größe, des Preises und des Energiebedarfs von Mikroelektronik (Kagermann 2017, S. 236; Mattern, Flörkemeier 2010, S. 107). Durch die Einführung des neuen Internetprotokolls IPv6 im Jahr 2012 stehen mittlerweile zudem ausreichend IP-Adressen für eine flächendeckende Vernetzung intelligenter Gegenstände mittels des Internets bereit (acatech, Forschungsunion 2013, S. 17). Technisch gesehen stellt das Internet der Dinge keine isolierte Innovation, sondern eine Kombination aus sich ergänzenden technologischen Entwicklungen, dar. Hierzu zählen nach Mattern, Flörkemeier (2010, S. 109 f.):

- Kommunikation und Kooperation: Physischen Objekten ist es möglich, sich mit Ressourcen im Netz und untereinander zu vernetzen und somit Daten gegenseitig in Echtzeit auszutauschen und zu nutzen.
- Adressierbarkeit: Gegenstände können aus der Ferne gefunden und angesprochen werden.
- Identifikation: Objekte sind eindeutig identifizierbar, bspw. mittels Radio Frequency Identification (RFID), Near Field Communication (NFC) oder Barcodes.
- Sensorik: Dinge können mittels eingebauter Sensoren Informationen über ihren eigenen Zustand und den ihrer Umgebung erfassen.
- Aktorik: Eingebaute Aktoren ermöglichen es den Objekten, eigenständig aktiv auf ihre Umwelt einzuwirken.

- Eingebettete Informationsverarbeitung: Die Objekte erfassen und kommunizieren Informationen nicht nur, sondern verarbeiten und interpretieren diese mit Hilfe eingebauter Prozessoren und Speicher selbst.
- Lokalisierung: Dinge kennen ihren physischen Aufenthaltsort und sind im Netz lokalisierbar.
- Benutzerschnittstelle: Smarte Objekte können auf geeignete Art und Weise, beispielsweise über ein mobiles Interface, mit Menschen kommunizieren.

Eine Erweiterung des Internets der Dinge ist das Internet der Dienste, durch das nicht nur die physischen Objekte selbst, sondern auch ihre Funktionalitäten in Form von Diensten („Services“) beziehungsweise webbasierten Softwarekomponenten digital abgebildet werden können (Bauernhansl et al. 2016, S. 32; acatech, Forschungsunion 2013, S. 85). Die Vision des Internets der Dienste besteht folglich darin, es den Akteuren zu ermöglichen, verschiedene Dienstleistungen über das Internet global anzubieten beziehungsweise nachzufragen und sie zu Mehrwertdiensten miteinander zu verknüpfen (Buxmann et al. 2009, S. 393). Ein solcher Dienst kann auf operativer Ebene beispielsweise ein Service zur Koordination eines Materialflusses von smarten Objekten sein, der die von diesen Objekten bereitgestellten Informationen nutzt (Reinhart 2017, S. 452).

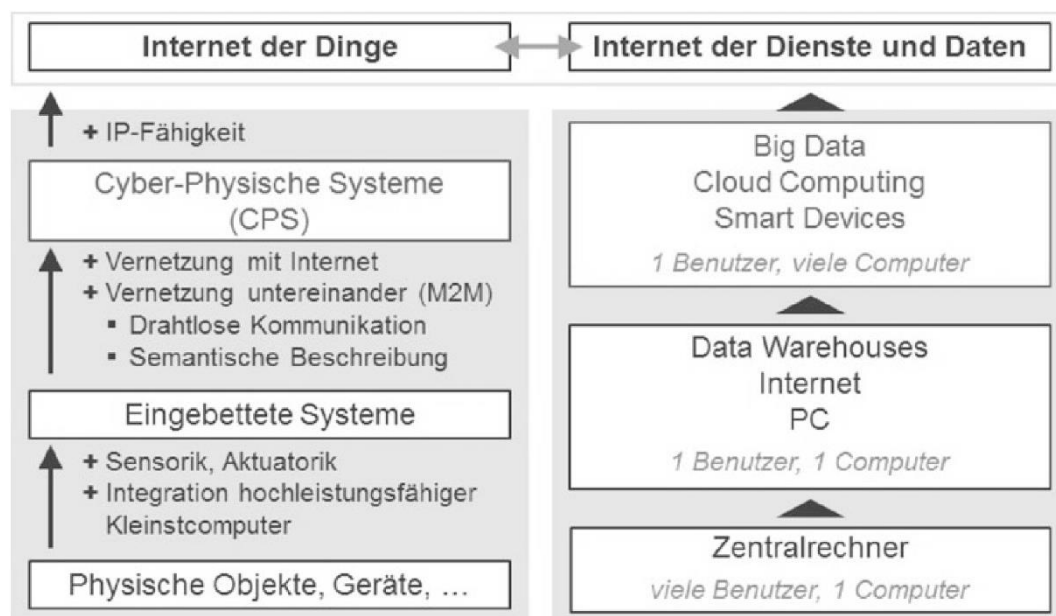


Abbildung 2-1: Das Internet der Dinge, Dienste und Daten (Kagermann 2017, S. 236)

Die Haltung der im Rahmen des Internets der Dinge anfallenden Daten findet zumeist in der Cloud statt, da diese ein orts- und zeitunabhängiges Abrufen, Auswerten und Aktualisieren aller gesammelten Informationen ermöglicht. Die Gesamtheit dieser Daten (Big Data, s. u.) stellt eine informationstechnische Erweiterung der physikalischen Objekte beziehungsweise Welt dar. In diesem Kontext wird oft vom Internet der Daten gesprochen. (Günthner et al. 2017, S. 108)

Während Autoren wie Obermaier (2019, S. 21) und Bauernhansl et al. (2016, S. 6) die verschiedenen „Internets“ getrennt betrachten, sprechen acatech, Forschungsunion (2013, S. 17) vom „Internet der Dinge und Dienste“. Kagermann (2017, S. 236) geht noch einen Schritt weiter und postuliert das „Internet of Everything“ (IoE) beziehungsweise das „Internet der Dinge, Dienste und Daten“ als Kombination und neueste Entwicklungsstufe der drei „Internets“ (siehe Abbildung 2-1).

### **Big Data**

Die weltweit aggregierte Datenmenge wächst explosionsartig. Während vom Beginn der Menschheitsgeschichte bis zum Jahr 2003 insgesamt 5 Exabyte (EB) Daten produziert wurden, waren es im Jahr 2012 bereits ca. 3 Zettabyte (ZB), was dem 600-fachen Wert entspricht (Intel 2012). Im Jahr 2018 ist die Datenmenge bereits auf 33 ZB angestiegen und bei einer prognostizierten jährlichen Steigerung von ca. 27 % wird sie bis ins Jahr 2025 auf 175 ZB wachsen. In Anbetracht dieses enormen Anstiegs der Datenmengen, für den in erster Linie die digitale Vernetzung im Zuge der Industrie 4.0 verantwortlich ist, hat sich der Begriff „Big Data“ etabliert. (IWD 2019)

Während Big Data zunächst nur Technologien, die zur Speicherung, Filterung und Bereitstellung großer Datenmengen geeignet sind, bezeichnet, werden die Algorithmen und Prozesse, die die Analyse dieser ermöglichen, unter dem Begriff „Data Science“ zusammengefasst (Andelfinger, Hänisch 2017, S. 10 f.). Die zentralen Merkmale von Big Data stellen die „5 Vs“ dar. Die Daten existieren in schier unvorstellbarem Volumen (Volume), werden in hoher Geschwindigkeit erzeugt und verarbeitet (Velocity) und liegen in vielfältiger Form (Variety) vor. Ebenfalls kennzeichnend sind ihre Korrektheit (Veracity) sowie ihr Wert für das Unternehmen, das sie erhebt und verarbeitet (Value). (Reinhart 2017, S. 98)

Vor dem Hintergrund des Internets der Dinge werden Big Data in der industriellen Produktion nicht manuell von Mitarbeitern, sondern automatisch durch die Sensoren der Maschinen und Produkte (Objekte) erfasst. Die reine Datenerfassung mittels Sensoren ist allerdings zunächst nichts Neues und der „Industrie 3.0“ zuzuordnen. Der entscheidende Unterschied liegt in der Art und Weise, wie mit den gesammelten (Sensor-)Daten verfahren wird. Im Kontext der Industrie 4.0 werden diese nicht nur zur Steuerung einer Anlage verwendet und dann verworfen, sondern systematisch gespeichert, analysiert und anderen Anwendungen zur Verfügung gestellt. Hierdurch können neue Erkenntnisse, beispielsweise über bisher unbekannte Zusammenhänge innerhalb der Produktion, gewonnen werden. (Andelfinger, Hänisch 2017, S. 11)

### **Cyber-Physische Systeme**

Ausgangspunkt für die bereits beschriebene Vernetzung der Produktion bilden sogenannte eingebettete Systeme, hochleistungsfähige Mikro-Computer, die gemeinsam mit Sensoren

und Aktoren milliardenfach in alle möglichen Systeme und Gegenstände integriert werden können (Kagermann 2017, S. 236). Erhält ein mechatronisches System neben einem eingebetteten System auch noch die Möglichkeit, innerhalb eines Netzwerkes, dem Internet der Dinge, zu kommunizieren, wird es zu einem Cyber-Physischen System (CPS) (siehe Abbildung 2-2) (Bauernhansl et al. 2016, S. 10; Reinhart 2017, S. xxxiv). CPS sind in der Lage, Realweltdaten, wie beispielsweise Zustandsdaten einer Maschine oder Eigenschaften eines Bauteils, in die digitale Welt zu integrieren. Folglich stellen sie die „nächste Stufe der Technologieintegration“ (Bauernhansl et al. 2016, S. 10) dar und sind für die Interaktion respektive Verschmelzung von physischer und digitaler Welt unabdingbar.

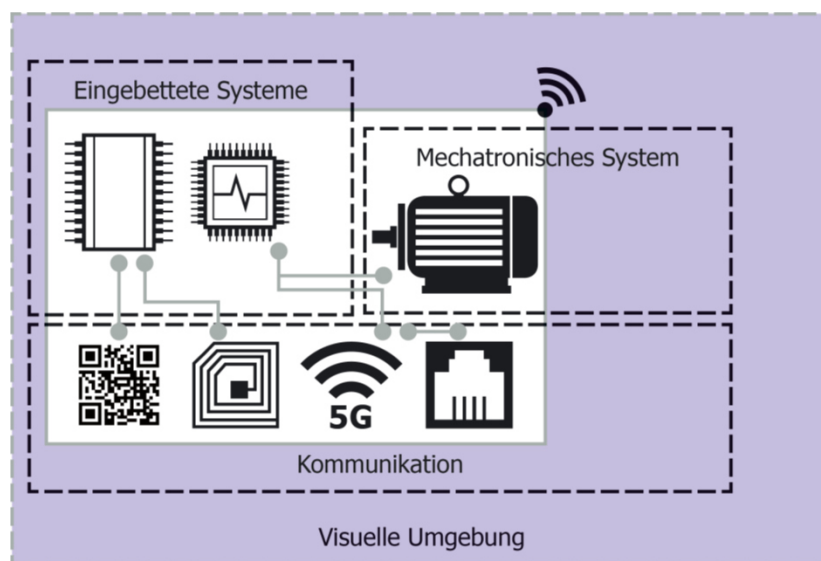


Abbildung 2-2: Elemente eines CPS (Bauernhansl et al. 2016, S. 10)

Die potenzialstiftende Eigenschaft eines CPS liegt demnach nicht in der reinen Digitalisierung der Systeme beziehungsweise Objekte, sondern vielmehr in ihrer Fähigkeit, in lokalen und globalen Netzwerken mit anderen CPS zu kommunizieren. Diese plattformbasierte Vernetzung ermöglicht neuartige Funktionalitäten, wie beispielsweise die Kommunikation eines smarten Werkzeugs mit der Maschinensteuerung, um Verschleißreserven zu ermitteln. CPS haben dabei stets Kenntnis über ihren eigenen Zustand und ihre Fähigkeiten, sind also selbstbeschreibungsfähig. Sie können nicht nur untereinander, sondern über entsprechende Nutzerschnittstellen auch mit Menschen kommunizieren und so Eingaben, Anfragen oder Anweisungen entgegennehmen. Auch eine Weiterverarbeitung der erfassten Daten ist direkt innerhalb des CPS möglich. (Bauernhansl et al. 2016, S. 11)

Die Gesamtheit der miteinander vernetzten CPS innerhalb eines Produktionsstandortes wird als Cyber-Physisches Produktionssystem (CPPS) bezeichnet (Andelfinger, Hänisch 2017, S. 62). CPPS bestehen aus „flexiblen, autonomen und sich selbstkonfigurierenden Produktionsressourcen, die untereinander und mit [smartem] Produkten kommunizieren und situationspezifische Entscheidungen treffen können“ (Bauernhansl et al. 2016, S. 11). Innerhalb eines

CPPS werden Daten dort gespeichert und genutzt, wo sie benötigt werden. Entscheidungen werden dezentral getroffen, was eine Auflösung der klassischen Automatisierungspyramide zur Folge hat. (ebd.)

Über Plattformen als Teil der CPS können zudem Anwendungen und Dienstleistungen, wie beispielsweise Services zur Datenanalyse, angeboten werden. Dies impliziert eine Verlagerung der Rechenkapazitäten, wodurch die lokal und global zur Verfügung stehende Rechenleistung zielgerichteter skaliert und verteilt werden kann. Das Bereitstellen von Speicherplatz, Rechenleistung und Software als Dienstleistung über das Internet wird als Cloud Computing bezeichnet (Wikipedia 2020a). (Bauernhansl et al. 2016, S. 11)

### **Smart Factory**

Im Zusammenspiel von Menschen und vernetzten CPS, die autonom und dezentral Netzwerke aufbauen und sich selbst optimieren, entsteht die sogenannte Smarte Fabrik („Smart Factory“), die die Umsetzung der Industrie 4.0 in der Produktion darstellt (Bauernhansl 2017, S. 12; Thiele et al. 2018, S. 4). Gemäß der Plattform Industrie 4.0 (2020b) definiert sich die Smart Factory über ihren Integrationsgrad, der eine solche Tiefe erreicht hat, dass die Fabrik hinsichtlich ihrer Produktion und aller die Produktion betreffenden Prozesse selbstorganisationsfähig ist.

Nach Thiele et al. (2018, S. 4) lässt sich dieser Wandel der klassischen deterministischen zur selbststeuernden Produktion in drei wesentliche Aspekte – technische, organisatorische und prozedurale – gliedern:

Aus technischer Sicht stellen die neuen Möglichkeiten der Erfassung, Aufbereitung und Analyse von Daten den wichtigsten Treiber der Smart Factory dar. Durch die Vernetzung von Maschinen entstehen (Sub-)Systeme, in denen Echtzeitdaten mittels maschinellem Lernen und Künstlicher Intelligenz analysiert werden können, was die Autonomie und vollständige Flexibilisierung der Produktionsanlagen ermöglicht. (Thiele et al. 2018, S. 4 f.)

Auf organisationaler Ebene zeigt sich in der Smart Factory ein Wandel in der Rolle des Menschen. Dieser wird zunehmend als Facharbeiter und Wissensträger der vernetzten Systeme anhand der Daten, die diese über entsprechende Nutzerschnittstellen bereitstellen, überwachen. Manuelle Tätigkeiten werden dagegen immer seltener gefordert werden und wenn doch, dann in direkter Zusammenarbeit mit Robotern im Sinne einer Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK). (Thiele et al. 2018, S. 5)

Zuletzt findet in der Smart Factory eine grundlegende Neuordnung der Prozesse zur Produktentstehung und Produktionsplanung statt. Die durch Big Data ermöglichte Virtualisierung der Fabrik erlaubt eine durchgängige Simulation und Analyse von Produktparametern, Produktionslinien und sogar ganzen Fabriklayouts weit vor der realen Umsetzung, wodurch die

betriebliche Entscheidungsfindung ein nie dagewesenes Maß an Qualität erreicht. Ein in diesem Kontext wichtiger Begriff ist der des „Digitalen Schattens“. Dieser bezeichnet ein „hinreichend genaues Abbild der Prozesse in der Produktion, der Entwicklung und angrenzenden Bereichen“ (Bauernhansl et al. 2016, S. 23), das als echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten Daten dient (ebd.). (Thiele et al. 2018, S. 6)

Die Smart Factory beschränkt sich dabei nicht auf die Produktion, sondern besitzt Schnittstellen zu den Bereichen Smart Mobility, Smart Logistics, Smart Buildings und Smart Grids. Als elementarer Bestandteil moderner Infrastrukturen sind Smart Factories vertikal mit den betriebswirtschaftlichen Prozessen anderer Fabriken verknüpft und horizontal in globale Wertschöpfungsnetzwerke eingebunden (vgl. Abschnitt 2.1.3.). Insgesamt ermöglicht die Smart Factory damit eine Art der Kommunikation zwischen Menschen, Maschinen und Ressourcen, die so selbstverständlich ist, wie in einem sozialen Netzwerk. (acatech, Forschungsunion 2013, S. 23; Kagermann 2017, S. 238 f.)

### 2.1.2 Historischer Hintergrund der vierten industriellen Revolution

Bislang wurde Industrie 4.0 im Rahmen dieser Arbeit völlig selbstverständlich als vierte industrielle Revolution bezeichnet. In der Literatur ist jedoch umstritten, ob es sich bei Industrie 4.0 überhaupt um eine echte Revolution, also einen radikalen, schnell fortschreitenden Wandel, oder lediglich um eine Evolution handelt. Unstrittig ist dabei jedoch, dass sich Industrie 4.0 insofern von den vorangegangenen Revolutionen unterscheidet, als dass sie ex cathedra verkündet, also explizit durch Wissenschaft, Forschung und Politik ausgerufen wurde. Ob es sich bei Industrie 4.0 nun tatsächlich um eine Revolution im engeren Sinne handelt, lässt sich zum aktuellen Zeitpunkt nicht final beantworten, sondern kann erst im Nachhinein festgestellt werden. Für die Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit spielt die Beantwortung dieser Frage letztlich keine Rolle, weshalb die Termini „Industrie 4.0“ und „vierte industrielle Revolution“ weiterhin synonym verwendet werden. Zur kontextualen Einordnung wird im Folgenden die Historie der vier industriellen Revolutionen betrachtet. (Obermaier 2019, S. 10; Andelfinger, Hänisch 2017, S. 36)

Die bisherigen industriellen Revolutionen (siehe Abbildung 2-3) wurden allesamt durch technologische Innovationen ausgelöst. So war es die Einführung der Wasser- und Dampfkraft um das Jahr 1750, die die menschliche Muskelkraft ersetzte und damit die **Mechanisierung**, die erste industrielle Revolution, auslöste. Das bekannteste Beispiel hierfür ist die Einführung des ersten mechanischen Webstuhls im Jahr 1784. Die gestiegene industrielle Produktivität und neue Transportsysteme, wie das Dampfschiff und die Eisenbahn, hatten zur Folge, dass es keine strukturell bedingten Hungerkatastrophen mehr gab, wodurch das Bevölkerungswachstum explodierte. Es bildete sich jedoch ein starkes wirtschaftliches Ungleichgewicht zwischen

den beiden neu entstandenen Schichten der Fabrikbesitzer und -arbeiter, was gepaart mit den schlechten Arbeitsbedingungen innerhalb der Fabriken zu bürgerlichen Aufständen führte. (Bauernhansl 2017, S. 1 f.; Obermaier 2019, S. 9 f.)

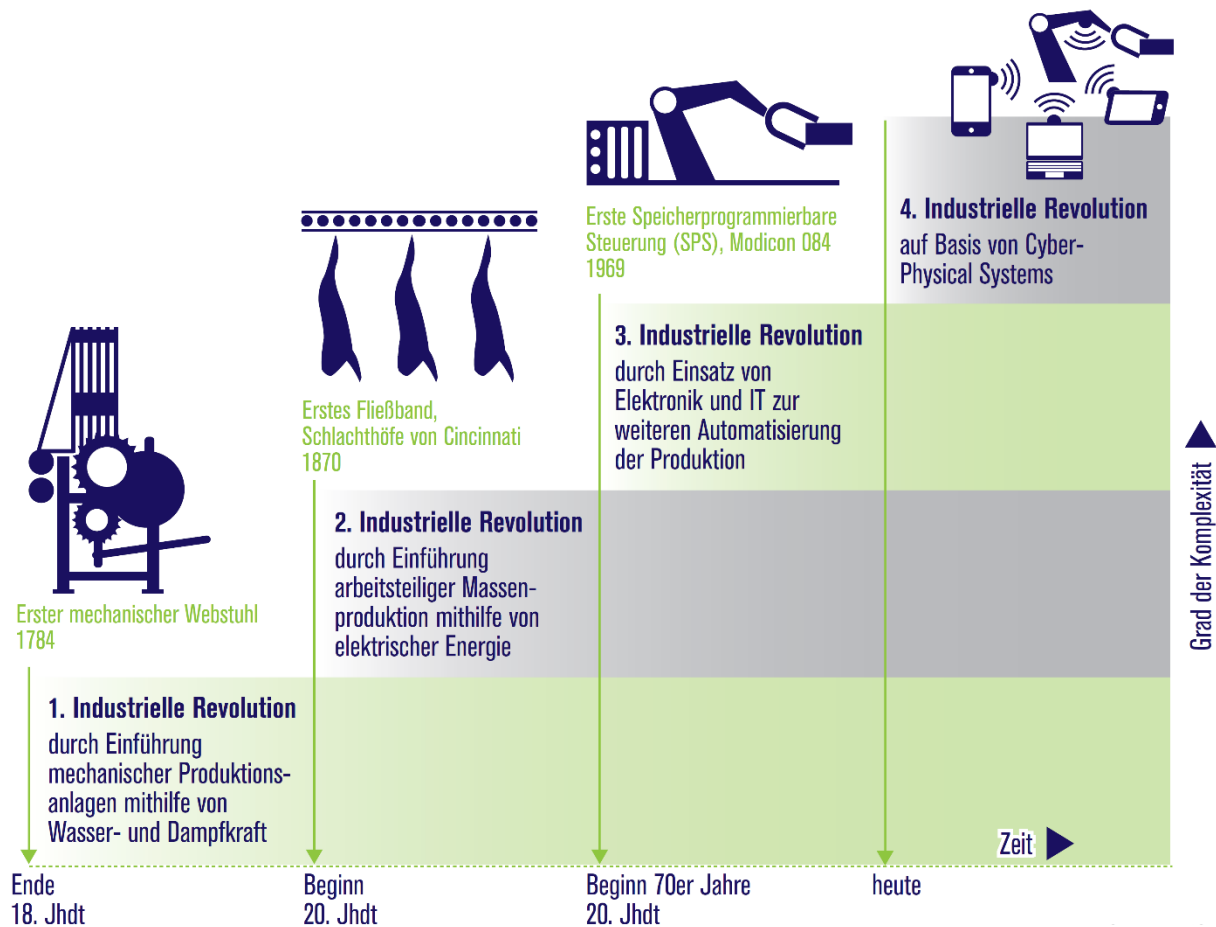


Abbildung 2-3: Historie der industriellen Revolutionen (acatech, Forschungsunion 2013, S. 17)

Die gesellschaftlichen Spannungen und die Entwicklung elektrischer Antriebe und Verbrennungsmotoren sowie die berühmte Einführung des Fließbands durch Henry Ford im Jahr 1870 lösten die zweite große industrielle Revolution, die **Automatisierung**, aus. Die Möglichkeit, Arbeitsmaschinen dezentral anzutreiben, läutete die großindustrielle Massenproduktion ein. Die weiterhin stetig wachsende Bevölkerung und das Wohlstandsbedürfnis der Fabrikarbeiter, die sich nicht länger ausbeuten lassen wollten, führten erneut zu gesellschaftlichen Unruhen. Diese konnten jedoch durch die Massenproduktion, die aufgrund von Skaleneffekten die Produktivität und gesamtgesellschaftliche Wertschöpfung in die Höhe trieb, gelöst werden. (Bauernhansl 2017, S. 2 f.; Obermaier 2019, S. 9 f.)

Auf die ersten beiden Weltkriege folgte in den 1960er Jahren mit der **Digitalisierung** die dritte industrielle Revolution, deren Treiber zunächst die neue Elektronik und später die Informations- und Kommunikationstechnologie waren. Die Implementierung der ersten speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) 1969 stellt hier einen wichtigen Meilenstein dar. Es fand eine

Automatisierung und Rationalisierung der Produktionsprozesse statt, was letztlich die variantenreiche Serienproduktion ermöglichte. Vor dem Hintergrund gesättigter Märkte gewann die Käuferseite in den 80er Jahren zunehmend an Marktmacht, weshalb die Industrie nun verstärkt auf Qualität und Individualität achten musste. Die folgenden Jahrzehnte waren schließlich maßgeblich durch die Einführung des Internets als Medium zum Wissensaustausch sowie die weltweite Arbeitsteilung im Zuge der Globalisierung geprägt. (Bauernhansl 2017, S. 3; Obermaier 2019, S. 10)

Der Kern der heute ausgerufenen vierten industriellen Revolution besteht nach Obermaier (2019, S. 10) in der „**Vernetzung** von industrieller Infrastruktur (Maschinen, Werkstücke, Produkte und Menschen) [...] mittels CPS“. Kennzeichnend sind die Allgegenwärtigkeit rechnergestützter und eingebetteter Systeme und der Einzug des Internets der Dinge und Dienste in die Fabrik, was zur vielfach genannten Verschmelzung von physischer und digitaler Welt führt (acatech, Forschungsunion 2013, S. 13). Der Ausdruck Industrie 4.0 entstammt dabei ursprünglich einem Zukunftsprojekt der Bundesregierung, durch das die digitale Vernetzung klassischer Produktionsbetriebe gefördert werden sollte (Obermaier 2019, S. 6). Zentrales Organ des Projekts ist die „Plattform Industrie 4.0“, auf der sich diverse Industrie- und Forschungsverbände zusammengefunden haben und sich gemeinsam engagieren (ebd.).

### 2.1.3 Charakteristika der Digitalen Transformation

In Abschnitt 2.1.1 wurden bereits die wichtigsten technologischen Innovationen, die als Enabler der vierten industriellen Revolution dienen, vorgestellt. Die Implementierung dieser Technologien, also das Vollziehen der Digitalen Transformation, lässt sich gemäß acatech, Forschungsunion (2013, S. 24) in drei übergeordnete Merkmale gliedern.

Das erste dieser drei Industrie 4.0-Charakteristika stellt die **horizontale Integration** über Wertschöpfungsnetzwerke dar. Hierunter wird die Integration verschiedener IT-Systeme innerhalb einer Hierarchieebene der Produktion, beispielsweise zwischen Eingangslogistik, Fertigung, Ausgangslogistik und Vermarktung, verstanden. Sie beschränkt sich nicht auf die Systemgrenze eines Unternehmens, sondern findet darüber hinaus innerhalb gesamter Wertschöpfungsnetzwerke, also über mehrere Unternehmen hinweg, statt. (acatech, Forschungsunion 2013, S. 24; Plattform Industrie 4.0 2020a)

Das zweite Charakteristikum bildet die **vertikale Integration** auf Basis vernetzter Produktionssysteme. Im Gegensatz zur horizontalen Integration beschreibt diese die Integration von IT-Systemen über unterschiedliche Hierarchieebenen hinweg, also beispielsweise von Akteur-, Sensor-, Steuerungs-, Produktionsleit- sowie Betriebsleitebene. Vertikale Integration beschränkt sich auf die Grenzen eines (Produktions-)Systems respektive die einer (Smarten)

Fabrik. Die Durchgängigkeit der Aktor- und Sensorsignale über alle Unternehmensebenen hinweg ermöglicht es der Smart Factory, ihre Produktionsstrukturen nicht mehr ex ante konkret festlegen zu müssen. Stattdessen wird die Topologie – der Aufbau des Produktionssystems aus Produktionsressourcen und den zugehörigen Wirkbeziehungen – auf Basis informationstechnischer Konfigurationsregeln und unter Einsatz von Big Data Werkzeugen automatisiert und stets fallspezifisch festgelegt. So kann ein neues Maß an Modularität erreicht und damit die Vision der „kundenindividuellen Massenfertigung in Losgröße 1“ (Reinhart 2017, S. 557) beziehungsweise „Mass Customization“ (Obermaier 2019, S. 31) verwirklicht werden. (acatech, Forschungsunion 2013, S. 36; Plattform Industrie 4.0 2020c)

Die **digitale Durchgängigkeit des Engineerings** ist das dritte Merkmal der Industrie 4.0. Im Sinne eines System Engineerings werden hierbei alle Geschäftsprozesse entlang der gesamten Wertschöpfungskette „von der Produktentwicklung über das Engineering des Produktionssystems bis hin zur Produktion“ (acatech, Forschungsunion 2013, S. 36) durch entsprechende IT-Systeme unterstützt. Eine ganzheitliche Betrachtung der Fabrik und ihrer Prozesse über die verschiedenen Fachdisziplinen hinweg erfolgt. Um diese Durchgängigkeit und Ganzheitlichkeit trotz der zunehmenden Komplexität technischer Systeme zu beherrschen, stellen vor allem die neuen Möglichkeiten der durch Data Science unterstützten Modellierung und Simulation einen wichtigen Hebel dar. (ebd.)

Darüber hinaus beschreiben acatech, Forschungsunion (2013, S. 27 f., 40 f.) die Veränderungen auf gesellschaftlich-sozialer beziehungsweise arbeitsorganisationaler Ebene, zu denen Industrie 4.0 führen wird. CPS und die Smart Factory erfordern aufgrund des „Paradigmenwechsels in der Mensch-Technik-Interaktion“ (acatech, Forschungsunion 2013, S. 27) neue Arbeitsstrukturen, die in erster Linie durch eine „viel stärkere strukturelle Einbindung der Beschäftigten in [Entscheidungs- und] Innovationsprozesse“ (ebd.) gekennzeichnet sind. Hierfür sind umfassende Qualifizierungs- und Weiterbildungsmaßnahmen ebenso wichtig wie neue Gestaltungsmodelle der Arbeit, beispielsweise neue Möglichkeiten der individuellen Belastungsregulation.

Insgesamt werden durch Industrie 4.0 neuartige, teils radikal veränderte Geschäftsmodelle, die erst durch die unternehmensübergreifende Kooperation in hochdynamischen Geschäftsnetzwerken ermöglicht werden und deren Bezugseinheit stets der Kunde ist, entstehen (acatech, Forschungsunion 2013, S. 26; Schallmo 2019, S. 7).

### 2.1.4 Anforderungen an die Digitale Fabrikplanung

Im Zuge der Digitalen Transformation werden die Anforderungen an moderne Produktionsstätten, unter anderem aufgrund immer kürzerer Produktlebenszyklen und der damit verbundenen

Notwendigkeit zur Wandelbarkeit und Anpassungsfähigkeit, zunehmend komplexer. Um sowohl dieser Entwicklung als auch den grundlegenden Veränderungen, die CPPS aufgrund ihrer Dezentralität und Autonomie gegenüber klassischen Produktionssystemen aufweisen, gerecht zu werden, muss auch die Digitale Fabrikplanung angepasst werden. (Kerkenberg 2016, S. 104; Bauernhansl 2017, S. 13).

Die Fabrikplanung bezeichnet den „systematischen, zielorientierten [und] in aufeinander aufbauende Phasen strukturierten [...] Prozess zur Planung einer Fabrik, von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion“ (VDI 5200 Blatt 1, S. 3). Ihre Aufgabe ist es, den Produktionsprozess so zu gestalten, dass er möglichst störungsfrei, wirtschaftlich und unter humanen, guten Arbeitsbedingungen verläuft (Bracht et al. 2018, S. 28). Dabei müssen Rahmenbedingungen und (Produktions-)Parameter berücksichtigt und geeignete Methoden und Werkzeuge angewendet werden (ebd.). Ein in diesem Zusammenhang schon seit längerer Zeit etabliertes Konzept ist das der Digitalen Fabrik (Bracht et al. 2018, S. 52). Diese bildet einen „Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen, unter anderem der Simulation und dreidimensionalen Visualisierung“ (VDI 4499 Blatt 1, S. 8), deren Ziel die „ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung [...] der realen Fabrik“ (ebd.) ist. Die Digitale Fabrik ist nicht mit der Smart Factory (vgl. Abschnitt 2.1.1), deren Kerngedanke in der datengetriebenen Steuerung und Optimierung der Fabrik in Echtzeit besteht, zu verwechseln (Bracht et al. 2018, S. 25). Während der Fokus der Digitalen Fabrik in ihren Anfängen noch auf der Produktionsplanung lag, unterstützt sie heute die Fabrikplanung mittels 3D-basierter Simulationssoftware zur „Visualisierung [...] von Produktionsaufgaben und Prozessen“ (Bracht et al. 2018, S. 52) gleichermaßen (Reinhart 2017, S. 171). Um fortan auch die Konzepte der Industrie 4.0 simulativ erproben zu können, müssen sich die virtuellen (Fabrik-)Modelle jedoch insgesamt zu deutlich genaueren und aktuelleren Abbildern ihrer physischen Pendanten entwickeln (Bracht et al. 2018, S. 52).

Fabrikplanung ist ein weitläufiger Begriff und Fabrikplanungsprojekte sind meist umfangreich und komplex. Um die besagten Anforderungen, die sich aus der Industrie 4.0 an die (Digitale) Fabrikplanung ergeben, aufzeigen zu können, ist es daher sinnvoll, den Fabrikplanungsprozess strukturiert zu betrachten. Hierbei hilft das von Dombrowski et al. (2018, S. 57) am Institut für Fabrikbetriebslehre und Unternehmensforschung (IFU) der TU Braunschweig entwickelte Referenzmodell (siehe Abbildung 2-4), welches den Fabrikplanungsprozess in sechs Stufen unterteilt. Das Grundgerüst für Fabrikplanungsprojekte bilden die ersten drei Stufen Betriebsanalyse, Grob- und Feinplanung. Es folgen die Umsetzung der geplanten Fabrik in die Realität, die kontinuierliche Optimierung und Anpassung während des Fabrikbetriebs sowie abschließend die Stilllegung oder Revitalisierung der Fabrik. (Reinhart 2017, S. 177)

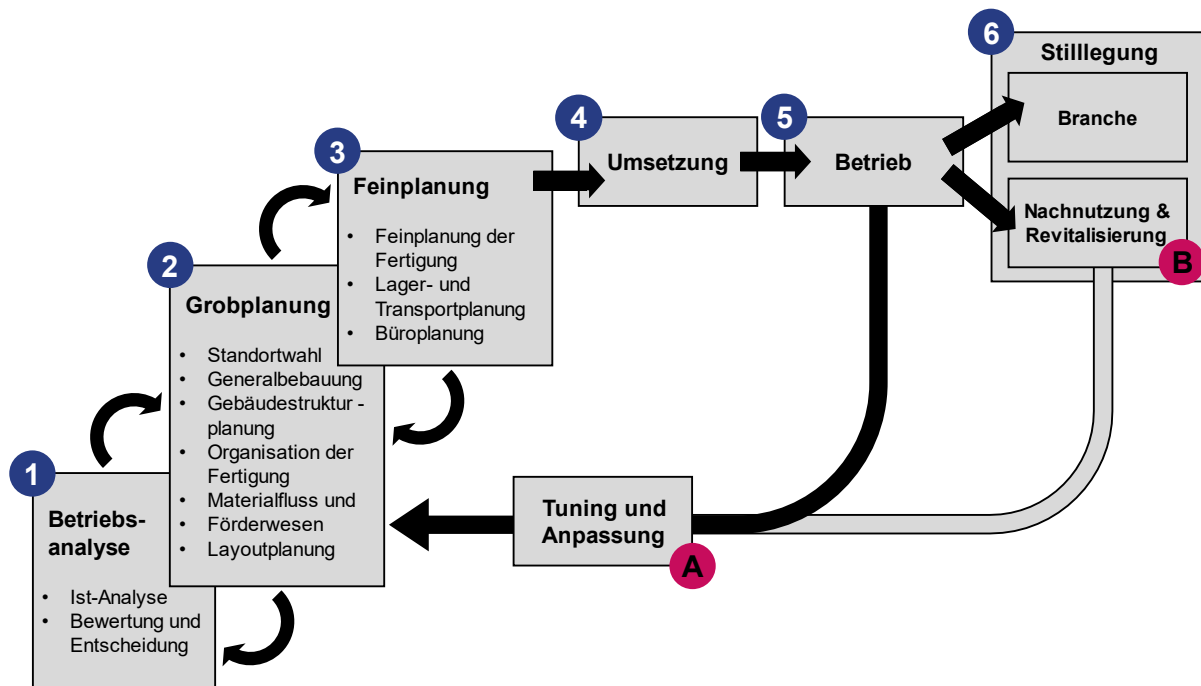


Abbildung 2-4: IFU-Referenzmodell: Der Fabriklebenszyklus (in Anlehnung an Reinhart 2017, S. 177)

Im Rahmen der Betriebsanalyse werden der Ist-Zustand der Fabrik detailliert analysiert, die zu erreichenden Ziele definiert und betriebliche Handlungsalternativen abgeleitet und bewertet, was die Entscheidungsgrundlage für die Unternehmensführung bildet. Durch Industrie 4.0 werden Analyse und Bewertung der Ausgangsdaten durch den Einsatz leistungsfähiger, Big Data-basierter Prognosesoftware miteinander verschmelzen. Die digitale Nachmodellierung der bestehenden Fabrikstruktur kann beispielsweise durch digitalisierte, automatisierte Vermessung mittels unbemannter Luftfahrzeuge (Drohnen) oder 3D-Scanner unterstützt und vereinfacht werden. (Reinhart 2017, S. 178; Dombrowski et al. 2018, S. 57 f.)

Die darauffolgende Grobplanung beginnt mit der Standortwahl, der Festlegung des Generalbebauungsplans und der Gebäudestrukturplanung. Insbesondere bei der Neuplanung von Fabriken gebietet es die Industrie 4.0-Vision, Geodaten und Randbedingungen eines Standortes (zum Beispiel Bodenstruktur, Gefälle, Verkehrsanbindung) systematisch zu erfassen, automatisch auszuwerten und zur Entscheidungsfindung zu nutzen. Auch die im Anschluss erfolgende Organisation der Fertigung sowie die Planung des Materialflusses, Förderwesens und Fabriklayouts gilt es, trotz steigender Komplexität effizienter zu gestalten, indem immer weitere Fabrikparameter in den Planungsprozess integriert werden. Das im Kontext der Industrie 4.0 umzusetzende Konzept der dezentralisierten, autonomen Organisation und Steuerung der Produktionsprozesse durch Menschen, Maschinen und Produkte steht dabei zunächst im Konflikt mit der klassischen Fabrikplanung. Es kann nicht länger von vorab definierten Produktionsprogrammen und Prozessen ausgegangen werden. Stattdessen sind die Verbindungen zwischen Elementen des Produktionssystems dank ad-hoc-Vernetzung dynamisch

und müssen in Echtzeit an veränderte Rahmenbedingungen angepasst werden, weshalb weder Produktionsprogramm noch Bearbeitungsreihenfolge vorab als Basis für die Layoutplanung dienlich sind. Folglich sind neue Kriterien und Methoden zur Fabrik- beziehungsweise Layoutplanung, die die dezentrale Entscheidungslogik und autonomen Prozessabläufe berücksichtigen, zu entwickeln. Einen ersten Ansatz stellt hierbei zum Beispiel der IFU Planungstisch 4.0, der mehrere Werkzeuge der Digitalen Fabrik miteinander vereint, dar. Dieser besteht aus einem Multitouch-fähigem Display, auf dem mittels digitaler und/oder physischer (3D-gedruckter) Modelle der anzuordnenden Maschinen und Anlagen ein Layout erstellt werden kann. In Echtzeit werden die Ergebnisse räumlich projiziert und Layoutänderungen relativ zum Idealzustand, auch im Hinblick auf die resultierenden Materialflüsse, bewertet. Das Beispiel zeigt, wie Methoden der Industrie 4.0 Mitarbeiter bei der fundierten Entscheidungsfindung unterstützen und so für stärkere Partizipation sorgen können. (Reinhart 2017, S. 180 ff.; Dombrowski et al. 2018, S. 58 ff.)

In der anschließenden Feinplanung wird die gesamte Fabrik detailliert digital ausgeplant und dabei die „Feinanordnung der Maschinen und Arbeitsplätze sowie deren virtuelle Absicherung, die [ergonomische] Gestaltung der Arbeitsumgebung [...] [und] -abläufe sowie die Lager- und Transportplanung“ (Reinhart 2017, S. 183) betrachtet. In Perfektion umgesetzt führt dies zur Implementierung des Digitalen Zwillings. Während der Digitale Schatten (vgl. Abschnitt 2.1.1) zunächst nur den realen Produktionsprozess in die virtuelle Welt überführt, kann der Digitale Zwilling darauf aufbauend den Produktionsprozess simulativ nachstellen und so ein „möglichst identisches Abbild der Realität liefern“ (Bauernhansl et al. 2016, S. 23). Hierdurch können etwaige Änderungen vor der Umsetzung überprüft, getestet und optimiert werden. (Reinhart 2017, S. 183 ff.; Dombrowski et al. 2018, S. 64 ff.)

Die Umsetzung als vierte Stufe der Fabrikplanung umfasst den Bau des Fabrikgebäudes und den Aufbau beziehungsweise Umzug der Fabrikeinrichtung gemäß der Feinplanung. Hierbei können Augmented Reality (AR) Lösungen, die die reale Welt in Echtzeit um eine Projektion des in der virtuellen Welt Geplanten ergänzen, unterstützen. (Reinhart 2017, S. 186; Dombrowski et al. 2018, S. 67 f.)

Mit dem Anlauf der Produktion beginnt die Phase des Betriebs, des Tunings und der Anpassung. Das Ziel der Industrie 4.0-gerechten Fabrikplanung besteht darin, die Daten des laufenden Fabrikbetriebs fortlaufend zu aktualisieren und zu verarbeiten – „ohne Medienbrüche, digital und [...] durch entsprechende Algorithmen voll automatisiert im Hintergrund“ (Reinhart 2017, S. 187). Wichtige Voraussetzung hierfür ist die horizontale und vertikale Vernetzung (vgl. Abschnitt 2.1.3) der Fabrik und damit das Vorhandensein einheitlicher Kommunikationsschnittstellen – ein Aspekt, der „in der Fabrikplanung bisher kaum Beachtung gefunden“ (Reinhart 2017, S. 183) hat. (Reinhart 2017, S. 186 ff.)

Insgesamt wird deutlich, dass die vierte industrielle Revolution weitreichende, neuartige Anforderungen an die Digitale Fabrikplanung stellt. Die Digitale Fabrik mit ihren Werkzeugen zur modellgestützten Planung und Simulation kann dabei einen entscheidenden Wegbereiter der Industrie 4.0 darstellen. Damit die neuen Konzepte und Technologien im Rahmen der Fabrikplanung erprobt und abgesichert werden können, ist es von entscheidender Bedeutung, dass virtuelle Abbilder deutlich genauer werden, indem Daten in hoher Qualität und echtzeitnah erhoben werden. (Bracht et al. 2018, S. 52 f.; Kerkenberg 2016, S. 104; Reinhart 2017, S. 147, 188 f.)

### **2.1.5 Potenziale und Hemmnisse der Digitalen Transformation**

Es ist in der Literatur unumstritten, dass die „Auswirkungen der vierten industriellen Revolution [...] für die wirtschaftliche Entwicklung und die Arbeitsorganisation tiefgreifend“ (Kagermann 2017, S. 235) sein werden. Die Potenziale der Industrie 4.0 und ihrer hochvernetzten Technologien sind dabei enorm; Bauernhansl et al. (2016, S. 3) erwarten insgesamt in „fast allen Bereichen der Wertschöpfung Einsparpotenziale durch eine Steigerung der Gesamtproduktivität von bis zu 50 %“.

Durch die CPS-basierte Echtzeit-Vernetzung des gesamten Wertschöpfungsnetzwerks können Geschäftsprozesse vollkommen dynamisch gestaltet werden (acatech, Forschungsunion 2013, S. 20). Dies ermöglicht eine optimale Verteilung der Wertschöpfung und der Funktionalitäten im Netzwerk, wodurch zunehmend von Skaleneffekten profitiert werden kann (Bauernhansl et al. 2016, S. 3). Insgesamt wird die Produktion also hochflexibel, hochproduktiv und ressourceneffizient, was letztlich die Herstellung kundenindividueller Produkte, also die Fertigung in Losgröße 1, zu den Kosten eines Massenprodukts ermöglicht (Kagermann 2017, S. 240; acatech, Forschungsunion 2013, S. 19).

Durch Big Data werden die Fabrik und ihre Prozesse durchgängig transparent; Echtzeitanalysen mittels Data Science können die betriebliche Entscheidungsfindung optimieren. Zum einen können so Planungsentscheidungen frühzeitig abgesichert werden und zum anderen gewinnt das System massiv an Resilienz, da eine Störung, wie beispielsweise eine Wirtschaftskrise oder ein Infrastrukturausfall, frühzeitig erkannt und entsprechend unmittelbar reagiert werden kann. Durch Predictive Maintenance – die prognosebasierte, vorausschauende Instandhaltung – können die Anlagenverfügbarkeit signifikant erhöht und die Ersatzteil- beziehungsweise Ausfallfallkosten entsprechend reduziert werden (Bauernhansl et al. 2016, S. 9). (Kagermann 2017, S. 239; acatech, Forschungsunion 2013, S. 20)

Auch aus ökologischer Sicht bietet die Digitale Transformation ein enormes Potenzial, da Ressourcen insgesamt effizienter, schonender und transparenter genutzt werden können. So kann beispielsweise der Stromverbrauch in der Smart Factory durch Maschinen mit intelligenter

Start-Stopp-Funktion gesenkt oder in der Logistik die Auslastung und Wegeplanung der Verkehrsmittel optimiert werden. (Kagermann 2017, S. 240; acatech, Forschungsunion 2013, S. 20)

Weitere Wertschöpfungspotenziale bestehen in den neuen Dienstleistungen und Geschäftsmodellen, welche durch Industrie 4.0 ermöglicht werden. Beispiele sind der Verkauf produktbezogener Dienstleistungen bei Smart Products, das Entwickeln von Business-to-Business-Services (B2B) oder das Anbieten innovativer Miet- statt Kaufmodelle im Sinne der Sharing Economy. (Kagermann 2017, S. 239; acatech, Forschungsunion 2013, S. 20; Ematinger 2018, S. 15 ff.)

Industrie 4.0 bietet aber nicht nur ökonomische und ökologische, sondern auch soziale Chancen. Die interaktive Mensch-Roboter-Kollaboration ermöglicht eine altersgerechte Arbeitsgestaltung, wodurch dem demografischen Wandel und dem Fachkräftemangel entgegengewirkt werden kann. Vielfältige und flexible Laufbahnmodelle sowie digitale Arbeitsplatz- und neue Mobilitätskonzepte führen zu einer besseren Work-Life-Balance und damit einer Steigerung der Lebensqualität – „die Produktion folgt dem Takt des Menschen“ (Kagermann 2017, S. 240). (Menig et al. 2019, S. 34; acatech, Forschungsunion 2013, S. 20)

Trotz all dieser Vorteile bestehen derzeit noch teils starke Hemmnisse hinsichtlich der Einführung von Industrie 4.0. Ein zentraler Aspekt ist hierbei die fehlende Nutzentransparenz im Sinne einer Wirtschaftlichkeitsbewertung der neuen Technologien, die insbesondere KMU empfinden (Schuh et al. 2017, S. 11; Fechtelpeter et al. 2019, S. 17 ff.). Darüber hinaus bestehen im Mittelstand noch technische Unsicherheiten, die eigenen Kompetenzen hinsichtlich der Digitalisierung werden als unzureichend erachtet (Fachkräftemangel) und der zeitliche Horizont der Umsetzung wird als zu lang angesehen, weshalb insgesamt erhebliche Investitionshemmnisse bestehen (ebd.). Bauernhansl et al. (2016, S. 4) entgegnen hier, dass Industrie 4.0 oft weniger kostet als erwartet, da bestehende Maschinen stückweise nachgerüstet werden können.

Ein weiteres Hemmnis besteht in der vorherrschenden Unsicherheit hinsichtlich Fragen der IT-Sicherheit. Die Zahl der Cyber-Angriffe auf Unternehmen ist aufgrund der zunehmenden Attraktivität der Sicherheitsziele in den letzten Jahren drastisch angestiegen. Mit zunehmend komplexeren IT-Strukturen in der vernetzten Fabrik steigen auch die Anforderungen an Sicherheitsarchitekturen. Hier mangelt es derzeit an einem sehr viel proaktiveren Vorgehen im Sinne von Security-by-Design sowie einheitlichen Sicherheitsstandards. (Braun 2017, S. 39; Kagermann 2017, S. 242; acatech, Forschungsunion 2013, S. 27)

Nicht zuletzt stellt auch die mangelnde gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber den technologischen Neuerungen ein starkes Hemmnis bei deren Implementierung dar. Big Data generiert nicht nur Informationen über Produkte und Maschinen, sondern auch über Menschen und ihr

Verhalten. Es entsteht ein Zielkonflikt zwischen dem Wunsch nach Privatsphäre und den enormen wirtschaftlichen Potenzialen. Beschäftigte befürchten, durch die Technologien überwacht zu werden und dass ihre persönlichen Daten nicht ausreichend geschützt werden. (Kagermann 2017, S. 243; Menig et al. 2019, S. 34)

Um diesen Hemmnissen begegnen zu können, mangelt es aus Sicht vieler KMU an geeigneten Unterstützungsangeboten. Die Unterstützungskette ist nicht durchgängig und weist insbesondere bei der Umsetzungsunterstützung Defizite auf. Die Angebote sind ebenso unübersichtlich wie vielzählig, werden unzureichend kommuniziert, zeigen keine konkreten Anwendungsbeispiele und unterstützen auch nicht beim innerbetrieblichen Wandel. (Fechtelpeter et al. 2019, 17-15)

Ungehindert davon steht jedoch fest, dass Industrie 4.0 die Chance bietet, die Wettbewerbsfähigkeit des Hochlohn-Produktionsstandortes Deutschland sicherzustellen (acatech, Forschungsunion 2013, S. 19). Daher gilt es laut Bauernhansl et al. (2016, S. 4), sich nicht auf die Risiken, sondern auf die Potenziale zu fokussieren und so die „nächste Innovationswelle anzustoßen und aktiv zu gestalten“ (Kagermann 2017, S. 236).

## 2.2 Kleine und mittlere Unternehmen

Um im weiteren Verlauf dieser Arbeit eine Einschätzungsmethode zur Unternehmenssituation im Kontext der Industrie 4.0, die sich insbesondere zur Anwendung in KMU eignet, entwickeln zu können, müssen zuerst die notwendigen theoretischen Grundlagen bezüglich dieser Unternehmen betrachtet werden. Hierfür sollen KMU definiert und ihre Bedeutung für die deutsche Industrie sowie ihre Eigenschaften und charakteristischen Geschäftsprozesse erläutert werden.

### 2.2.1 Definition

Die Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2003) teilt Unternehmen wie in Tabelle 2-1 dargestellt anhand der Anzahl ihrer Mitarbeiter, ihres Jahresumsatz und ihrer Bilanzsumme in vier Größenklassen ein.

*Tabelle 2-1: Größenklassen von Unternehmen*

| Unternehmensgröße    | Anzahl Beschäftigte |     | Jahresumsatz  |      | Bilanzsumme   |
|----------------------|---------------------|-----|---------------|------|---------------|
| Kleinstunternehmen   | bis 9               | und | bis 2 Mio. €  | oder | bis 2 Mio. €  |
| Kleine Unternehmen   | bis 49              |     | bis 10 Mio. € |      | bis 10 Mio. € |
| Mittlere Unternehmen | bis 249             |     | bis 50 Mio. € |      | bis 43 Mio. € |

Demnach gilt ein Unternehmen als KMU, wenn es weniger als 250 Beschäftigte hat und zugleich entweder sein Jahresumsatz unter 50 Mio. € oder seine Bilanzsumme unter 43 Mio. € liegt.

## 2.2.2 Bedeutung des Mittelstandes

Wie bereits eingangs erwähnt, gilt der Mittelstand gemeinhin als das „Fundament“ (Bosse, Zink 2019, S. 8) beziehungsweise „Rückgrat der deutschen Wirtschaft“ (Fechtelpeter et al. 2019, S. 3) (vgl. Abschnitt 1.1). Quantitativ lässt sich die hierbei implizierte „überragende [volkswirtschaftliche] Bedeutung“ der KMU (Reinemann 2019, S. 16) leicht durch die Daten des Statistischen Bundesamtes belegen. Hierbei sei zunächst erwähnt, dass der Begriff des Mittelstandes streng genommen über den KMU-Begriff hinausgeht, da er nicht an die in Abschnitt 2.2.1 genannte Definition gebunden ist und auch Unternehmen, die diese Größengrenzen zwar überschreiten, aber dennoch in ihren Strukturen einem KMU ähneln, miteinbezieht (Reinemann 2019, S. 17).

Im Jahr 2017 existierten in Deutschland rund 2,5 Mio. KMU und bildeten damit einen Anteil von 99,3 % an der Gesamtanzahl der Unternehmen (siehe Abbildung 2-5). Zudem entfielen 71,9 % aller Arbeitsplätze auf KMU. Mit 59,9 % fällt der Anteil der KMU am Gesamtumsatz deutscher Unternehmen proportional allerdings geringer aus, was dadurch begründet ist, dass sie eher in den arbeitsintensiveren Branchen wie dem Dienstleistungssektor tätig sind, wohingegen große Unternehmen kapitalintensiver wirtschaften (Reinemann 2019, S. 16). (Statistisches Bundesamt 2019, S. 2, 10, 16)

Hinzu kommt, dass KMU laut IfM Bonn (2018) 81,6 % der Ausbildungsplätze stellen und somit einen erheblichen Beitrag zur Ausbildungsleistung in Deutschland beitragen. Hierbei muss allerdings beachtet werden, dass das IfM Bonn (2016) eine eigene KMU-Definition verwendet und Unternehmen mit bis zu 500 Beschäftigten in diese Kategorie miteinbezieht.

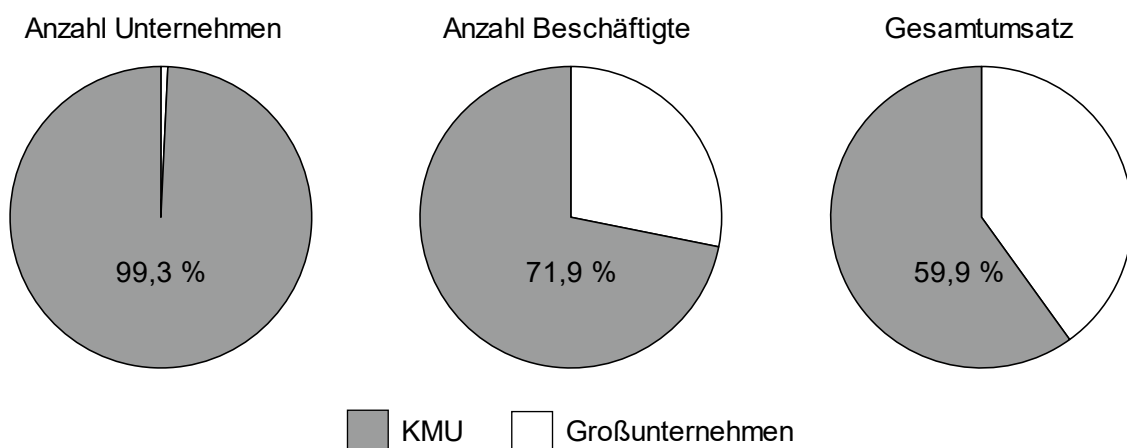


Abbildung 2-5: Volkswirtschaftliche Bedeutung der KMU in Deutschland (in Anlehnung an Statistisches Bundesamt 2019, S. 2, 10, 16)

Ähnliche Verhältnisse bestehen in der gesamten Europäischen Union; von den 2018 erfassten 21 Mio. Unternehmen ließen sich gerade einmal rund 100.000 nicht den KMU zuordnen (Reinemann 2019, S. 17). Bezogen auf ihre Marktposition nehmen deutsche KMU jedoch weltweit eine ganz besondere Vorbildrolle ein: Während der „German Mittelstand“ 1.507 sogenannte Hidden Champions – Weltmarktführer auf Nischenmärkten – stellt und damit klarer globaler Spitzenreiter ist, kommen die USA als Zweitplatzierte lediglich auf 421 und Japan an dritter Stelle auf 253 weltmarktführende KMU (Lindner 2019, S. 1 f.). Es verwundert daher nicht, dass „in manchen Regionen Deutschlands“ (Ihlau, Duscha 2019, S. 11) ganze „Industriezweige [...] ausschließlich von mittelständischen Unternehmen geprägt sind“ (ebd.).

Insgesamt trägt der deutsche Mittelstand maßgeblich „zu den volkswirtschaftlichen Zielen Beschäftigung, Wachstum, Strukturwandel sowie Innovation“ (Reinemann 2019, S. 19) bei. Gemäß der sogenannten Mittelstandshypothese leisten KMU aufgrund ihrer Beschäftigungsdynamik einen relativ betrachtet größeren Beitrag zur „Schaffung neuer sozialversicherungspflichtiger Arbeitsplätze“ (ebd.) als Großunternehmen.

KMU, insbesondere Klein- und Kleinstunternehmen, sind oft in Nischenmärkten und Hightechbranchen tätig, wo sie dank ihrer Innovationskraft alte Unternehmen ersetzen können und so maßgeblich zum wirtschaftlichen Strukturwandel und einer ausgeglichenen Unternehmenslandschaft beitragen. Zusätzlich üben sie durch ihre schiere Anzahl einerseits und ihre stabilen Kundenbeziehungen sowie ihren flexiblen Produktionsapparat andererseits oft signifikanten Wettbewerbsdruck auf andere Unternehmen aus. Dieser ist insofern wichtig, als dass er Konzentrationsprozesse unterbindet und die Unternehmen zur Innovation zwingt. (Reinemann 2019, S. 19; Ihlau, Duscha 2019, S. 10 ff.)

### **2.2.3 Eigenschaften kleiner und mittlerer Unternehmen**

In der Wirtschaftstheorie fanden KMU lange Zeit keinerlei Beachtung, da ihnen, verglichen mit Großunternehmen, keine Besonderheiten zugeschrieben wurden. Heutzutage ist man sich dagegen nicht nur der volkswirtschaftlichen Bedeutung, sondern auch der spezifischen Merkmale des Mittelstands, die hiermit in Verbindung stehen, bewusst. (Ihlau, Duscha 2019, S. 3; Lindner 2019, S. 1). Im Folgenden soll ein vereinfachter, pauschaler Überblick über die wichtigsten Merkmale von KMU gegeben werden. Die Aussagen sind dabei nicht als allgemeingültig anzusehen, denn die konkrete individuelle Struktur eines Unternehmens hängt neben der Unternehmensgröße auch von vielen weiteren Faktoren, beispielsweise der Branche, ab und kann von den genannten Ausprägungen abweichen (Bischoff 2015, S. 42).

Wichtigstes Merkmal mittelständischer Unternehmen ist, dass sie, im Gegensatz zu den in der Regel fremdgeführten Großunternehmen, meist eigentümergeführt und teils seit vielen Gene-

rationen im Familienbesitz sind (Reinemann 2019, S. 12 ff.). Die Orientierung an und Abhängigkeit von einer zentralen Unternehmerperson beeinflusst die gesamte Unternehmensführung und -struktur (ebd.). Der meist technisch ausgebildeten Geschäftsführung mangelt es gegenüber den betriebswirtschaftlich ausgebildeten Managern großer Unternehmen an Führungs- und Methodenkompetenzen, weshalb ihr Führungsstil eher patriarchalisch ist und Gruppenentscheidungen eine Seltenheit sind. Zwar haben KMU „aufgrund von Wachstum oftmals Betriebsgrößen erreicht, die theoretisch eine wesentlich personenunabhängigere Struktur benötigen würden, besitzen diese aber in der Praxis [...] nicht“ (Bischoff 2015, S. 42). Die Unternehmer sind folglich meist stark in das operative Tagesgeschäft eingebunden. Die daraus resultierende Überlastung sowie das Nichtvorhandensein ausgeprägter Informationssysteme führen zu Defiziten hinsichtlich einer formellen, gezielten und methodisch unterstützten Planung. Entscheidungen fußen oft auf „Intuition und Improvisation“ (Reinemann 2019, S. 15). (Bischoff 2015, S. 42; Ihlau, Duscha 2019, S. 6 ff.; Reinemann 2019, S. 12 ff.; Wiesner et al. 2018, S. 83; Mittal et al. 2018, S. 195)

Gleichzeitig führt die „Organisation als Familienbetrieb mit flachen Hierarchien“ (Bischoff 2015, S. 44) und entsprechend kurzen und direkten Informations-, Weisungs- und Kontrollwegen zu einer Reduzierung des Verwaltungsaufwands. Auch auf das Sozialklima wirkt sich die persönliche Bindung zwischen Geschäftsführung und Mitarbeitern positiv aus. Entscheidungen können schnell getroffen werden, was gegenüber Großunternehmen Vorteile in puncto Flexibilität und Wandlungsfähigkeit bringt. Ein weiteres Resultat der Besitz- beziehungsweise Führungsstruktur ist die Orientierung an langfristigem Erfolg und nachhaltigem Wachstum (Lindner 2019, S. 6). Dies gilt jedoch vornehmlich für die strategische Perspektive; auf operativer Ebene wird aufgrund der kurzfristigen, spontanen Entscheidungen meist weniger nachhaltig agiert (Bischoff 2015, S. 45). (Bischoff 2015, S. 42 ff.; Ihlau, Duscha 2019, S. 8; Mittal et al. 2018, S. 195)

Auch auf Mitarbeiterseite lässt sich eine deutlich höhere Bindung an das Unternehmen feststellen. Für die Produktqualität, die für KMU oft ein wichtiges Differenzierungsmerkmal darstellt und somit als Wettbewerbsvorteil für den Unternehmenserfolg entscheiden ist, sind meist einige wenige, langjährige Mitarbeiter maßgeblich verantwortlich (Bischoff 2015, S. 44; Lindner 2019, S. 6). Aufgrund der geringen Unternehmensgröße werden die Mitarbeiter zudem meist deutlich vielseitiger eingesetzt als in großen Unternehmen, sind dadurch aber auch weniger spezialisiert (Mittal et al. 2018, S. 196). Entsprechende Weiterbildungsmaßnahmen werden eher selten angeboten (ebd.).

Ebenfalls kennzeichnend für viele KMU sind ihre knappen finanziellen Ressourcen und ihre Schwierigkeiten bei der Kapitalbeschaffung, weshalb Investitionen meist innenfinanziert werden müssen (Bischoff 2015, S. 43; Ihlau, Duscha 2019, S. 5 f.). Entsprechend verwendete finanzielle Mittel stehen dann beispielsweise zur Überbrückung von Krisenzeiten nicht mehr zur

Verfügung, sodass Fehlentscheidungen kaum oder nur schwer abgefangen werden können (ebd.). Entsprechend groß sind die Hemmnisse gegenüber Investitionen in innovative Technologien und Umstrukturierungsmaßnahmen (Bischoff 2015, S. 44; Wiesner et al. 2018, S. 83; Mittal et al. 2018, S. 196). Daher sind die Bestrebungen des Mittelstands in Forschung und Entwicklung gering, ihr technologischer Stand ist rückschrittlich gegenüber Großunternehmen und moderne Standards, beispielsweise im Bereich Qualitätsmanagement, sind selten umgesetzt (Bischoff 2015, S. 55; Mittal et al. 2018, S. 195).

Hinsichtlich ihres Geschäftsmodells lässt sich sagen, dass KMU oft in Marktnischen agieren und mit entsprechend niedrigem Diversifizierungsgrad und/oder in entsprechend kleinen Stückzahlen kundenspezifische Produkte fertigen (Bischoff 2015, S. 43; Ihlau, Duscha 2019, S. 6; Lindner 2019, S. 6; Mittal et al. 2018, S. 195). Die Bindung zum Kunden ist daher eng und beruht analog zur internen Organisation auf informellen, persönlichen Kontakten und gegenseitigem Vertrauen (Reinemann 2019, S. 6). So entstehen besonders auf regionaler Ebene leistungsfähige Wertschöpfungsnetzwerke, sogenannte regionale Cluster (ebd.). Gleichzeitig besteht folglich aber auch eine starke Abhängigkeit im negativen Sinne von einigen wenigen Kunden und Zulieferern (Mittal et al. 2018, S. 196).

Insgesamt können die genannten Merkmale selbstverständlich nicht die Vielschichtigkeit des Mittelstands abbilden. Besonders junge, wachstumsstarke Unternehmen, beispielsweise IT-Start-ups, weisen in den seltensten Fällen die beschriebenen patriarchalischen Strukturen auf. Nichtsdestotrotz sind KMU in ihrer Gesamtheit immer noch vorwiegend durch traditionelle Strukturen geprägt und lassen sich folglich in den meisten Fällen durch die in diesem Abschnitt beschriebenen Eigenschaften einordnen (Reinemann 2019, S. 15).

### **2.2.4 Charakteristische Geschäftsprozesse**

Industrie 4.0 meint „nicht allein die nächste Stufe der Automatisierung in den Werkshallen“, sondern postuliert vor allem die inner- und überbetriebliche Vernetzung durch den Einzug des Internets der Dinge und Dienste in alle Unternehmensprozesse (Bischoff 2015, S. 15; Sames, Diener 2018, S. 6). Folglich müssen bei Betrachtungen im Kontext der Digitalen Transformation nicht nur die Produktion, sondern auch alle vorgelagerten, begleitenden oder unterstützenden Prozesse einbezogen werden. Bischoff (2015, S. 48) nennt hierzu zwanzig „Kern- und Unterstützungsprozesse industrieller Wertschöpfung“, die er zu sieben Unternehmensbereichen zusammenfasst (siehe Tabelle 2-2).

Für den Bereich der Forschung und Entwicklung besteht in den meisten mittelständischen Unternehmen keine eigene Abteilung. Stattdessen findet die Entwicklung kurzfristig und allein am Kundenwunsch orientiert statt. Sie fokussiert sich dabei Produkte beziehungsweise Ver-

fahren, die schnelle finanzielle Rückflüsse versprechen; Grundlagenforschung sowie eine Produktlebenszyklusbetrachtung werden eher selten betrieben. Das bedeutet allerdings nicht, dass KMU nicht innovativ sind. (Bischoff 2015, S. 49)

*Tabelle 2-2: Kern- und Unterstützungsprozesse (in Anlehnung an Bischoff 2015, S. 48)*

| Unternehmensbereich                             | Kern- und Unterstützungsprozess                                                                                              |
|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Forschung und Entwicklung</b>                | Forschung und Entwicklung<br>Produktentwicklung<br>Anlagen- und Verfahrenstechnik<br>Produktionsengineering<br>Fabrikplanung |
| <b>Intralogistik</b>                            | Logistik                                                                                                                     |
| <b>Produktion</b>                               | Produktion<br>Auftragsabwicklung<br>Planung und Steuerung                                                                    |
| <b>Instandhaltung &amp; Qualitätsmanagement</b> | Instandhaltung<br>Qualitätsmanagement                                                                                        |
| <b>Supply Chain Management</b>                  | Supply Chain Management<br>Beschaffung<br>Zulieferer                                                                         |
| <b>Vertrieb &amp; After Sales</b>               | Geschäftsmodelle und Strategie<br>After-Sales Services<br>Nutzung<br>Vertrieb<br>End-of-Life                                 |
| <b>Personal</b>                                 | Wissen und Bildung                                                                                                           |

Auch die innerbetrieblichen Logistikprozesse sind selten systematisch konzipiert, sondern werden vielmehr von Mitarbeitern der Produktion organisiert und ausgeführt (Bischoff 2015, S. 51). Sames, Diener (2018, S. 17 f., 22 f.) zeigen in ihrer Evaluationsstudie zum Umsetzungsstand der Digitalisierung der Geschäftsprozesse hessischer Mittelständler auf, dass rund ein Drittel der befragten KMU Buchungsvorgänge in Ein- und Ausgangslogistik rein manuell durchführt. Während Barcodescanner bereits in einigen Unternehmen Anwendung finden, werden beispielsweise RFID oder „pick-by-light“-Systeme noch nahezu gar nicht genutzt (ebd.).

Die Produktionsprozesse sind durch „umfangreiche manuelle Arbeitsabläufe und eine geringe Arbeitsteilung“ (Bischoff 2015, S. 53) geprägt. Die Mitarbeiter werden variabel eingesetzt und weisen vielfältige Kenntnisse auf, sind aber entsprechend weniger spezialisiert (ebd.).

Instandhaltung und Qualitätsmanagement umfassen die Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Optimierung (hinsichtlich ihrer Qualität und Effizienz) respektive die Produkt- und Prozessqualität. KMU verfügen nur selten über ein systematisches und im Optimalfall standardisiertes

beziehungsweise zertifiziertes Qualitätsmanagement mit einer umfangreichen Datenerfassung und festen Qualitätsregelkreisen. Ausgenommen sind hiervon Unternehmen der Zulieferindustrie, deren Kunden geregelte Qualitätsprozesse fordern. Condition Monitoring, also eine digital unterstützte Zustandsüberwachung, findet gerade einmal in etwa einem Viertel der von Sames, Diener (2018, S. 14) befragten KMU weitreichende Anwendung. (Bischoff 2015, S. 44, 55 f.)

Mittelständische Unternehmen fungieren oft als Zulieferer für größere Unternehmen oder Konzerne und sind somit in deren Lieferketten eingebunden und müssen sich den sich verändernden Anforderungen der Kunden anpassen. Eine wirkliche Integration und der dafür notwendige Aufbau von Logistikkompetenzen findet jedoch nur selten statt; es mangelt an Transparenz, Kommunikation und Informationsaustausch entlang der Lieferkette. (Bischoff 2015, S. 57 f.)

Dem Vertrieb kommt bei KMU eine untergeordnete Rolle zu, er wird oft von der Geschäftsführung übernommen oder unterstützt und beschränkt sich auf den Verkauf von Produkten. Der Wandel hin zum Verkauf von Services hat kaum stattgefunden. So bieten die wenigsten Mittelständler ihren Kunden die Möglichkeit, sich mittels eCommerce an das eigene ERP-System anzubinden beziehungsweise übernehmen die Kundenaufträge nicht einmal selbst ins ERP-System (Bischoff 2015, 59–60; Sames, Diener 2018, S. 20 f.).

Im Bereich Personal ist zu verzeichnen, dass die Mehrheit der KMU zwar schon Konzepte wie das mobile Arbeiten zumindest in Teilen anbieten, aber trotzdem noch zumeist traditionell Einzel- an Stelle von Gruppenarbeit stattfindet. Die Beschäftigten weisen breites Fachwissen auf, an Experten vor allem im Bereich der Digitalisierung mangelt es jedoch erheblich und die Gewinnung sowie Bindung von Fachkräften fällt schwer. (Bischoff 2015, 61–62; Sames, Diener 2018, S. 13 f.)

### **2.3 Literaturrecherche und -analyse**

Um im dritten Kapitel den aktuellen Forschungsstand hinsichtlich bestehender Methoden zur Einschätzung des Digitalisierungsgrades von Unternehmen darstellen zu können, bedarf es einer umfangreichen Literaturrecherche. Neben der Digitalen Transformation und den Eigenschaften der KMU muss daher auch das Vorgehen bei einer systematischen Literaturrecherche und -analyse eingeführt werden. Hierzu werden zunächst die verschiedenen Möglichkeiten der Ermittlung von Fachliteratur aufgezeigt und anschließend mehrere Vorgehensmodelle zur Durchführung einer Literaturrecherche beziehungsweise -analyse betrachtet. Abschließend werden Möglichkeiten zur Bewertung der Rechercheergebnisse vorgestellt, sodass alle theoretischen Grundlagen zur anschließenden Durchführung einer systematischen Recherche gelegt werden.

### 2.3.1 Systematiken zur Recherche

Der Prozess der Literaturrecherche spielt eine elementare Rolle bei der Erschließung eines wissenschaftlichen Themas, denn neues Wissen wird zumeist durch die Interpretation und Kombination bestehenden Wissens generiert (vom Brocke et al. 2009, S. 1). Das Ziel einer systematischen Recherche ist es daher zunächst, mittels einer zuverlässigen, präzisen und nachprüfbaren Methodik einen objektiven und angemessen umfangreichen Überblick über den betrachteten Forschungsgegenstand zu geben (Kitchenham 2004, S. iv). Hierzu müssen die relevanten Literaturquellen systematisch identifiziert und durchsucht werden und das eigene Vorgehen stets dargelegt und begründet werden (Fink 2020, S. 16).

Franke et al. (2014, S. 10 ff.) zeigen unterschiedliche Recherchemedien, in welchen systematisch nach Literatur gesucht werden kann, auf. Durch die Betrachtung verschiedener Medien soll der „tote Winkel“, also die Menge an relevanten Ergebnissen, die im Rahmen der Recherche nicht identifiziert werden, möglichst geringgehalten und so ein ganzheitlicher Überblick über das Recherchethema gegeben werden.

Ein wichtiges Recherchemedium bilden **Bibliothekskataloge**. Sie sind heutzutage meist online verfügbar und lassen sich auf vier miteinander verknüpfte Ebenen aufteilen. Während ein lokaler Katalog – auch Online Public Access Catalogue (OPAC) genannt – die Bibliotheksbestände einer Institution, beispielsweise der Universität Kassel, verzeichnet, bündeln regionale Kataloge (Verbundkataloge) die lokalen Einzelkataloge einer Region. Die sechs deutschen Verbundkataloge können gemeinsam per Metasuche im nationalen Katalog „Karlsruher Virtueller Katalog“ (KVK) durchsucht werden. Darüber hinaus können über den KVK auch internationale Bibliothekskataloge, wie beispielsweise der mit über 300 Millionen Titeln weltgrößte Katalog „WorldCat“ durchsucht werden (Franke et al. 2014, S. 12 ff.).

Das neben den Bibliothekskatalogen wichtigste Recherchemedium stellen **Datenbanken** dar. Datenbanken sind elektronische Medien, in denen Informationen strukturiert abgelegt und kategorisiert werden können. Durch das Eingeben von Suchbegriffen in eine Suchmaske können die aus den einzelnen Einträgen einer Kategorie gebildeten Listen (die sogenannten Indizes) durchsucht werden. Der Zugriff auf wissenschaftliche Datenbanken ist zumeist nicht öffentlich, sondern beispielsweise über eine Universitätsbibliothek, die die besagte Datenbank für ihre Studierenden und Lehrenden für einen bestimmten Zeitraum lizenziert hat, möglich.

Die gängigste Form von Datenbanken stellen **Bibliographische Datenbanken** dar, die standortungebunden für ein jeweils mehr oder weniger spezifisches Themengebiet Publikationen beziehungsweise deren Literaturangaben enthalten. Eine Sonderform der bibliographischen Datenbanken bilden **Zitationsdatenbanken**. Sie werten bei der Aufnahme einer Publikation stets auch deren Literaturverzeichnis aus, sodass beispielsweise für einen Artikel nach Publikationen, die mindestens eine identische Literaturquelle aufweisen, gesucht werden kann.

Um trotz der großen Fülle die für die eigene Recherche relevante(n) Datenbank(en) zu finden, kann vor allem das **Datenbank-Informationssystem (DBIS)** dienen. DBIS ist ein Zugangsportal für Datenbanken, das von nahezu allen deutschen Universitätsbibliotheken genutzt wird und einen systematischen Überblick über die von einer Bibliothek lizenzierten beziehungsweise frei verfügbaren Datenbanken gibt. Dabei werden zu jeder Datenbank relevante Informationen, wie beispielsweise eine kurze Inhaltsbeschreibung, bereitgestellt (Franke et al. 2014, S. 15 ff.).

Sollte die Recherche in einer Datenbank den Hinweis auf einen konkreten Zeitschriftenaufsatz liefern, empfiehlt sich die Nutzung der **Elektronischen Zeitschriftenbibliothek (EZB)**. Dieses Portal, das ebenfalls über die eigene Hochschulbibliothek abrufbar ist, bietet Zugang zu allen von der jeweiligen Bibliothek lizenzierten elektronischen Zeitschriften im Volltext.

Ein weiteres Recherchemedium bilden **Discovery Services**, die mittels moderner Suchmaschinenteknologie das gemeinsame Durchsuchen des gesamten digitalen und physischen Bestandes einer Bibliothek ermöglichen. Anders als bei Bibliothekskatalogen können hier nicht nur selbstständige Werke, also eigenständige Bücher, sondern auch unselbstständige Publikationen, also Werke in einem Sammelband oder einer Zeitschrift, recherchiert werden. Damit stellen sie einen guten ersten Anlaufpunkt für eine Literaturrecherche dar, mit der Präzision und dem Informationsgehalt von Fachdatenbanken können sie jedoch nicht mithalten (Franke et al. 2014, S. 20 f.).

Zuletzt werden **Suchmaschinen im Internet** als Recherchemedium beleuchtet. Während Internet-Suchmaschinen für Recherchetätigkeiten des alltäglichen Lebens die zentrale Anlaufstelle bilden, sind sie für den Einsatz im wissenschaftlichen Kontext meist ungeeignet. Einer ihrer Nachteile besteht in der fehlenden inhaltlichen Kontrolle privater und kommerzieller Webseiten. Noch schwerwiegender ist allerdings die Tatsache, dass Suchmaschinen nur einen geringen Teil aller theoretisch verfügbaren Informationen aufzeigen und so für einen besonders großen toten Winkel bei der Recherche sorgen. Das liegt daran, dass Suchmaschinen nur Links, also Verweise auf feste Adressen, aufzeigen können. Die große Mehrheit der Informationen ist jedoch ohne eine feste Adresse in zum Beispiel Datenbanken abgelegt und wird dem Nutzer erst auf Abfrage dynamisch zur Verfügung gestellt. Diese Informationen bilden das sogenannte „deep web“, das beispielsweise über die bereits genannten Portale einer Hochschulbibliothek zugänglich wird. Nichtsdestotrotz können Suchmaschinen auch im Zuge der wissenschaftlichen Recherche sinnvoll sein, etwa für eine erste, schnelle Faktenrecherche. Interessant sind dabei besonders Metasuchmaschinen, die die Ergebnisse mehrerer Suchmaschinen vereinen und vergleichen und wissenschaftliche Suchmaschinen, die die Online-Repositorien wissenschaftlicher Einrichtungen nach frei zugänglichen Publikationen

durchsuchen sowie virtuelle Fachbibliotheken, die die Zugänge zu verschiedenen Recherchemedien bündeln. Alle diese Suchmaschinen liefern unterschiedliche Ergebnisse, was bei der Auswahl berücksichtigt werden muss (Franke et al. 2014, S. 21 ff.).

Insgesamt wird deutlich, dass die Literaturrecherche mithilfe verschiedener Medien durchgeführt werden kann, wobei die Medienauswahl die Rechercheergebnisse maßgeblich beeinflusst und mit entsprechender Sorgfalt geschehen muss.

Bei der Literaturrecherche kann aber nicht nur aus einer Vielzahl an Medien, sondern auch aus verschiedenen Systemen, vornehmlich der Vorwärts- und Rückwärtsrecherche gewählt werden. Bei der Rückwärtsrecherche (Rückwärtssuche), die Franke et al. (2014, S. 7) als „Schneeballsystem“ bezeichnen, betrachtet man neben der als relevant eingestuften Quelle selbst auch die von ihr zitierte Literatur. Die Rückwärtssuche hingegen beruht auf Zitationsdatenbanken wie dem „Web of Science“ und ermittelt Publikationen, die eine bereits gefundene, relevante Quelle zitieren (Webster, Watson 2002, S. xvi). Dies hat den Vorteil, dass man tendenziell neuere und entsprechend oft relevantere Publikationen findet.

Außerdem müssen im Rahmen einer systematischen Literaturrecherche Entscheidungen hinsichtlich der in die verschiedenen Suchmasken einzugebenden Suchbegriffe getroffen werden, da diese für das Erzielen präziser Rechercheergebnisse essenziell sind. Für eine inhaltliche Suche bietet sich dabei grundsätzlich die Verwendung von Schlagwörtern an. Dies sind definierte Begriffe, die von Fachleuten für Publikationen auf Basis einer inhaltlichen Analyse vergeben werden. Die normierte Schlagwortvergabe soll gewährleisten, dass gleiche Inhalte stets gleich beschrieben und entsprechend einfach gefunden werden können. In der Realität gestaltet sich die Schlagwortsuche jedoch schwierig, da die Schlagwortvergabe trotz Normung in gewissem Maße subjektiv ist und zudem meist viele Publikationen einer Datenbank gar nicht erst mit Schlagwörtern versehen sind. Eine wichtige Alternative bildet daher die Stichwortsuche. Hierbei muss das gesuchte Wort beziehungsweise die gesuchten Wörter in exakt der eingegebenen Form in den formalen Angaben, vorrangig im Titel, der Suchergebnisse enthalten sein. Enthält der Titel einer Publikation das Stichwort beispielsweise in einer anderen grammatikalischen Form oder Sprache, fließt diese Publikation nicht in die Ergebnisliste ein. Folglich wird bei der reinen Stichwortsuche ein hoher Prozentsatz der relevanten und in der durchsuchten Datenbank vorhandenen Literatur nicht gefunden. Abhilfe können hierbei die Verwendung Boolescher Operatoren und die Methode der Trunkierung schaffen.

Trunkierung bezeichnet die „Verwendung eines Platzhalters, der beliebige andere Zeichen [im Suchstring] ersetzt“ (Franke et al. 2014, S. 45). Die gängigste Form der Trunkierung ist die Rechtstrunkierung, bei der der Platzhalter am Wortende eingefügt wird, sodass verschiedene Wortendungen in die Suche miteingeschlossen werden. Dadurch können Singular und Plural

sowie verschiedene grammatikalische Formen eines Wortes abgedeckt werden. Das Trunkierungszeichen ist datenbankspezifisch; gängig sind folgende Zeichen: „\*, ?, %, \$“.

Boolesche Operatoren dienen der richtigen Kombination von Suchbegriffen innerhalb eines Suchstrings, was eine Präzision der Suchergebnisse ermöglicht. Die wichtigsten und in nahezu jeder Datenbank verwendbaren Operatoren sind AND (UND), OR (ODER) und NOT (NICHT). (Franke et al. 2014, S. 45 ff.)

Der Operator AND verknüpft zwei Begriffe derart, dass die Titel der Datenbankeinträge zwangsläufig beide Begriffe enthalten müssen, um in die Ergebnisliste zu gelangen. Dabei spielt die Reihenfolge der beiden Begriffe zunächst keine Rolle. Soll diese jedoch explizit beachtet werden, empfiehlt sich die Phrasensuche. Hierfür muss der Suchstring in Anführungszeichen gesetzt werden. (ebd.)

Verknüpft man die Begriffe hingegen mit dem OR-Operator, so enthält die Ergebnismenge alle Publikationen, deren Titel mindestens einen der gesuchten Begriffe enthält. Folglich führt dieser Operator zu einer Ausweitung der Ergebnismenge im Vergleich zur AND-Verknüpfung respektive zur Phrasensuche. Er ist besonders praktisch, um bei der Suche mehrere synonyme beziehungsweise sinnverwandte Begriffe gleichzeitig abzudecken. (ebd.)

Mithilfe des NOT-Operators können bestimmte Begriffe von der Suche ausgeschlossen werden; er ist folglich mit besonderer Vorsicht zu verwenden. (ebd.)

### 2.3.2 Vorgehensmodelle zur Durchführung

Nachdem die verschiedenen Medien und Möglichkeiten zum Auffinden von Literatur dargelegt wurden, sollen im Folgenden bestehende Modelle für ein systematisches Vorgehen bei der Durchführung einer Literaturrecherche aufgezeigt werden.

Eines der meist zitierten Modelle stammt dabei von Fink (2020) (Vorgehensmodell 1), die systematische Literaturanalysen von eher subjektiven, unsystematischen Untersuchungen durch ihre Eindeutigkeit, ihren Umfangreichtum und ihre Reproduzierbarkeit durch Dritte abgrenzt (Fink 2020, S. 16). Auf diesen Maximen fußt das in Abbildung 2-6 dargestellte Vorgehensmodell, das sieben Schritte umfasst. Der Rechercheprozess beginnt dabei mit der präzisen Definition der Forschungsfrage und der anschließenden Auswahl geeigneter Recherchemedien, vornehmlich bibliographischer Datenbanken und Webseiten, passend zum Forschungsgebiet. Hierauf folgen die Festlegung geeigneter Suchbegriffe und -strings sowie die Durchführung der Recherche. Die hierdurch erhaltene Ergebnisliste ist nun zunächst mittels praktischer Kriterien wie Sprache, Art, Erscheinungsjahr und Finanzierungsquelle und anschließend mittels methodischer Kriterien wie der Qualität einer Studie zu filtern. Damit ist der Rechercheprozess

abgeschlossen und es gilt, die vorliegenden, als relevant identifizierten Ergebnisse zu analysieren, also die Daten aus den Quellen auf standardisierte Art und Weise zu abstrahieren. Abschließend folgt die zusammenführende Darstellung (Synthese) der Ergebnisse; diese kann je nach Anwendungsfall entweder rein deskriptiv und eher qualitativ oder quantitativ und unter Zuhilfenahme statistischer Methoden in Form einer Meta-Analyse erfolgen.

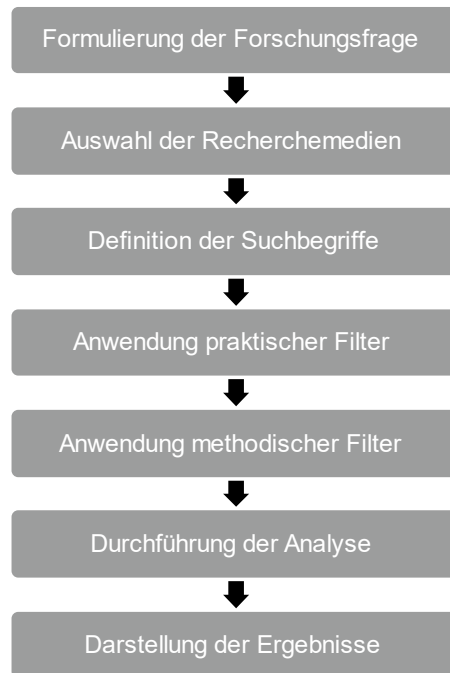


*Abbildung 2-6: Vorgehensmodell zur Literaturrecherche (in Anlehnung an Fink 2020, S. 5)*

Ein weiteres Vorgehensmodell zur Durchführung einer systematischen Literaturanalyse stammt von Kitchenham (2004) (Vorgehensmodell 2). Es wurde aus existierenden Modellen des Forschungsbereichs Medizin abgeleitet und speziell an die meist weniger empirischen Recherchebedarfe von Softwareentwicklern angepasst, ist allerdings auch als generelle Richtlinie anwendbar.

Das Modell unterteilt die Literaturanalyse in drei Phasen:

1. Planung des Reviews
  - 1.1. Ermittlung des Bedarfs einer systematischen Literaturanalyse
  - 1.2. Entwicklung eines Analyseprotokolls („review protocol“)
2. Durchführung des Reviews
  - 2.1. Identifikation des Forschungsstandes
  - 2.2. Identifikation relevanter Quellen (Primärstudien)
  - 2.3. Bewertung der Quellen hinsichtlich ihrer Qualität
  - 2.4. Datenextraktion und -kontrolle
  - 2.5. Datensynthese
3. Berichterstattung

Der Bedarf einer systematischen Literaturanalyse besteht, wenn existierendes Wissen bezüglich eines Phänomens vollständig und unverzerrt zusammengefasst werden soll. Ein „review protocol“ definiert die während der Recherchedurchführung zu verwendenden Methoden und ist notwendig, um die Objektivität des Reviews gewährleisten zu können. Neben dem Hintergrund der Literaturanalyse sollte das Protokoll die Forschungsfrage sowie den (die) daraus abgeleiteten Suchstring(s) und die zu verwendenden Recherchemedien definieren. Außerdem sollten Kriterien zum Einbezug respektive zum Ausschluss von Quellen und zur Bewertung ihrer Güte sowie der zeitliche Rahmen des Projekts enthalten sein. Um den Forschungsstand vollumfänglich darstellen zu können, müssen anschließend unter Verwendung des definierten Suchstrings und einer neutralen Suchstrategie möglichst viele auf die Forschungsfrage bezogene Primärstudien akquiriert werden. Die als potenziell relevant identifizierten Quellen müssen nun zunächst mit Hilfe der festgelegten Aufnahme- beziehungsweise Ausschlusskriterien gefiltert und anschließend hinsichtlich ihrer Qualität untersucht werden. Dabei wird unter anderem betrachtet, welche Quellen besonders valide sind und ob sich Unterschiede in den Studienergebnissen durch Qualitätsunterschiede begründen lassen. Um die Extraktion der in den als relevant identifizierten Quellen enthaltenen Daten möglichst akkurat und neutral zu gestalten, sollte ein Formular („data extraction form“) definiert werden, in das die erlangten Informationen auf standardisierte Weise eingetragen werden. Das Formular sollte standardmäßige Angaben zu den einzelnen Quellen, wie Titel, Autor, Zeitpunkt der Veröffentlichung und Notizen zum Inhalt enthalten. Die abschließende Datensynthese dient der Sammlung und Zusammenfassung der einbezogenen Studienergebnisse und kann deskriptiv (qualitativ) oder quantitativ im Rahmen einer Meta-Analyse erfolgen. (Kitchenham 2004, S. 1 ff.)

Machi, McEvoy (2016) definieren ein Literatur-Review als ein Dokument, in dem eine Forschungsfrage gestellt und durch eine These, die mittels logischer Argumentation auf Basis einer umfangreichen Untersuchung des entsprechenden aktuellen Forschungsstandes aufgestellt wird, beantwortet wird (Machi, McEvoy 2016, S. 28). Den zur Erstellung dieses Dokumentes notwendigen Prozess der systematischen Literaturanalyse gliedern die Autoren in die in Abbildung 2-7 dargestellten sechs Schritte (Vorgehensmodell 3).

Im ersten Schritt gilt es, eine Forschungsfrage zu definieren und dabei das bestehende Interesse angemessen, also wissenschaftlich exakt, zu formulieren. Der folgende Schritt ist in erster Linie für Reviews, deren Ziel in der Verifizierung einer zuvor aufgestellten These besteht, relevant und umfasst die Festlegung von Werkzeugen zur logischen, evidenzbasierten Entwicklung von Argumentationsketten und Thesen. Allgemeiner lässt sich dieser Schritt als das Festlegen einer systematischen Arbeitsweise für den folgenden Recherche- und Analyseprozess interpretieren. Den dritten Schritt bildet die Literatursuche; diese umfasst hier allerdings nicht nur die reine Recherche, sondern auch das Treffen einer (Vor-)Auswahl mittels Skimming und Scanning und die Sortierung (Mapping) der Daten. Im vierten Schritt gilt es, die gefundene

Literatur tabellarisch zusammenzutragen, durch das Bilden von Kategorien und das Herausarbeiten von Kerninhalten zu organisieren und anschließend im Hinblick auf bestehende Muster zu analysieren, um so die Frage zu beantworten, was aktuell über das Forschungsthema bekannt ist (Machi, McEvoy 2016, S. 176). In der darauffolgenden kritischen Betrachtung werden die Ergebnisse interpretiert und es wird untersucht, inwiefern sie die Forschungsfrage beantworten können und ob beziehungsweise wo Lücken, Widersprüche und Debatten bestehen. Abschließend ist auf Basis der bisherigen Erkenntnisse und Niederschriften ein akkurates, vollständiges und zielgruppenspezifisches Review zu erstellen. (Machi, McEvoy 2016, S. 29 ff.)

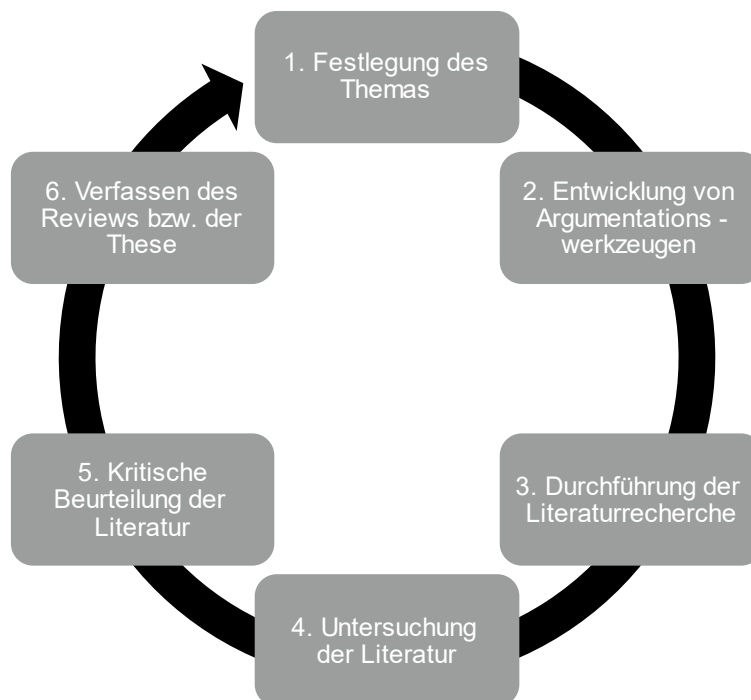


*Abbildung 2-7: Die sechs Schritte der Literaturanalyse (in Anlehnung an Machi, McEvoy 2016, S. 30)*

Auch vom Brocke et al. (2009, S. 1) betonen die wissenschaftliche Bedeutung systematischer Literaturanalysen als essenziellen ersten Schritt eines jeden Rechercheprojekts und als Basis zur Generierung neuen Wissens durch Interpretation und Kombination des Vorhandenen. Zugleich heben sie aber auch die durch die stetig wachsende Menge wissenschaftlicher Publikationen bedingte Komplexität einer Literaturrecherche hervor und sprechen sich daher für besondere Präzision bei der Recherche aus. Um eben jene Präzision zu erreichen, schlagen sie ein fünfphasiges Modell (Vorgehensmodell 4) vor, das sich zyklisch wiederholt:

- I. Festlegung des Umfangs des Reviews
- II. Konzeptualisierung des Recherchethemas
- III. Literaturrecherche
- IV. Literaturanalyse und -synthese
- V. Forschungsplanung

Reviews unterscheiden sich hinsichtlich ihres Schwerpunkts, ihrer Aufgabe, ihres Blickwinkels (neutral oder positionierend), ihrer Zielgruppe und ihres Umfangs stark, weshalb es entscheidend ist, zunächst all diese Variablen zu definieren. Bei der anschließenden Konzeptualisierung des Recherchethemas gilt es, sich mittels eher allgemeiner, oberflächlicher Quellen, wie beispielsweise Enzyklopädien, und Methoden wie dem Konzept-Mapping einen ersten Überblick über die Thematik zu verschaffen, um so relevante Suchbegriffe und zugehörige Synonyme zu identifizieren.

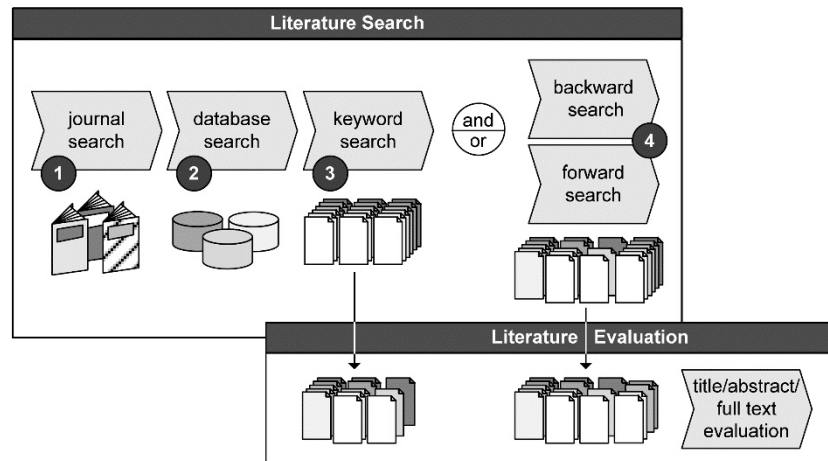


Abbildung 2-8: Prozess der Literatursuche (vom Brocke et al. 2009, S. 8)

Besonderen Fokus legen vom Brocke et al. auf den in Abbildung 2-8 dargestellten Rechercheprozess. Dieser umfasst sowohl die die Stichwortsuche in geeigneten (Journal-)Datenbanken und/oder die Vorwärts- beziehungsweise Rückwärtssuche (vgl. Abschnitt 2.3.1) als auch die gleichzeitige Evaluation der Suchergebnisse anhand ihres Titels beziehungsweise Abstracts, um irrelevante Publikationen direkt auszuschließen. Um die eingangs geforderte Genauigkeit des Reviews zu gewährleisten, müssen die Suchbegriffe und zu durchsuchenden Datenbanken sorgfältig definiert und ebenso wie die Suchergebnisse präzise dokumentiert werden, sodass der gesamte Prozess problemlos nachvollzogen werden kann. Die anschließende Analyse und Synthese der Literatur deckt bestehende Forschungslücken auf und resultiert daher meist in der Planung weiterer Forschungsaktivitäten und der Formulierung tiefergehender Fragen. (vom Brocke et al. 2009, S. 6 ff.)

Zuletzt wird das Vorgehensmodell von Boland et al. (2017, S. 9) (Vorgehensmodell 5) betrachtet. Hier wird der Rechercheprozess in zehn aufeinanderfolgende Schritte unterteilt:

1. Planen des Reviews: Hier wird festgelegt, wie die zur Verfügung stehende Zeit und die Ressourcen eingesetzt werden sollen.
2. Hintergrundrecherche: Im Rahmen einer Hintergrundrecherche wird Literatur ermittelt, mit deren Hilfe das Recherchethema eingegrenzt und ein Protokoll mitsamt Aufnahme- und Ausschlusskriterien erstellt werden kann.

3. Literaturrecherche: Auf Basis der Recherchefrage wird in bibliographischen Datenbanken und anderen Quellen nach potenziell relevanten Quellen gesucht.
4. Durchsicht der Quellen: Anhand ihrer Titel und Abstracts werden Quellen, die auf keinen Fall relevant sind, vom Review ausgeschlossen.
5. Beziehen der Volltexte
6. Selektion der Volltexte mittels der festgelegten Aufnahmekriterien
7. Datenextraktion: Aus den verbleibenden Quellen werden die relevanten Daten extrahiert und in der Regel in Tabellen zusammengefasst.
8. Qualitätsprüfung: Die einbezogenen Volltext-Quellen werden unter Verwendung eines Instruments zur Qualitätsprüfung und eines methodischen Vorgehens beurteilt.
9. Analyse und Synthese: Die extrahierten und überprüften Daten werden qualitativ oder quantitativ mittels Meta-Analyse beschrieben und durch Synthese zusammengefasst.
10. Verfassen des Reviews. Hierbei werden Hintergrund, Methoden und Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

### **2.3.3 Bewertungsmethoden von Rechercheergebnissen**

Den in Abschnitt 2.3.2 aufgezeigten Vorgehensmodellen zur Durchführung einer Literaturrecherche ist es gemein, dass auf die Literatursuche stets eine Bewertung in Form einer Filterung, kritischen Beurteilung oder Evaluation folgt.

Die Ergebnisse einer Literatursuche lassen sich zunächst durch die Genauigkeits- (Precision) und Trefferquote (Recall) einordnen. Die Precision drückt aus, wie hoch der Anteil der für den eigenen Forschungszweck interessanten Quellen an der gesamten Ergebnisliste ist. Der Recall gibt dagegen an, wie viele der insgesamt in der weltweiten Literatur existierenden relevanten Quellen tatsächlich im Rahmen der Literatursuche gefunden wurden. In der Praxis stehen diese beiden Kennzahlen im Zielkonflikt und es gilt, einen Kompromiss zwischen Genauigkeit (Vollständigkeit) und einem händelbaren Arbeitsaufwand zu erzielen. Entscheidend hierfür ist, wie vage oder konkret der Suchstring formuliert wird. (Franke et al. 2014, S. 78 f.)

Soll ein hoher Recall erzielt, also der aktuelle Forschungsstand zum Untersuchungsgegenstand möglichst vollständig dargestellt werden, wird die Precision zwangsläufig geringer ausfallen (ebd.). Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, Suchergebnisse nicht nur hinsichtlich ihrer Qualität, sondern auch bezüglich ihrer Relevanz zu beurteilen.

Zunächst sollte dabei die reine Zuverlässigkeit der Quelle überprüft werden. Wichtige Kriterien sind hier die Professionalität des Verfassers beziehungsweise der Institution sowie die Verbreitung, Art, Akzeptanz und Aktualität der Information. Besonders Internetquellen sollten einer weitreichenden Qualitätsprüfung unterzogen werden; zusätzliche Anhaltspunkte können hier sein, ob der Verfasser klar erkennbar ist, welches Interesse hinter der Internetseite steht und

ob die persönliche Meinung der Autoren klar von Fakten getrennt wird. Auch der sprachliche Stil und die Rechtschreibung können diesbezüglich schnell Aufschluss geben. Bei Artikeln in wissenschaftlichen Zeitschriften (Journals) wurde solch eine Bewertung bereits vor der Veröffentlichung im Rahmen eines Peer-Review-Prozesses von anderen Wissenschaftlern durchgeführt. (Franke et al. 2014, S. 82 ff.)

Bei der Bewertung bezüglich der Qualität und allgemeinen Relevanz der wissenschaftlichen Leistungen können der Impact-Faktor und der Science Impact Index helfen. Der Impact-Faktor setzt die Summe der Zitationen durch Dritte aller Artikel einer Zeitschrift in den letzten zwei Jahren ins Verhältnis zur Anzahl der veröffentlichten Artikel der Zeitschrift im selben Zeitraum. Er bezieht sich folglich allein auf eine Zeitschrift und nicht auf die konkret darin enthaltenen Artikel und ist entsprechend umstritten. Der Impact-Faktor gibt analog dazu die Zitierhäufigkeit eines konkreten Autors an. (Franke et al. 2014, S. 87)

In jedem Fall sollte die Bewertung der gefundenen Quellen einer definierten und systematischen Methode folgen, um sicherzustellen, dass keine relevanten Quellen von der späteren Analyse ausgeschlossen werden (Booth et al. 2012, S. 142 f.). Ein klares Verständnis der Forschungsthematik und damit der Frage, welche Aspekte wirklich relevant für das eigene Review sind, ist hier essenziell (ebd.). Zur effizienten Bewertung der Quellen hinsichtlich ihrer Aufnahme in die finale Ergebnis- beziehungsweise Analyseliste schlagen Booth et al. (2012, S. 143 f.) ein mehrstufiges Vorgehen vor (siehe Abbildung 2-9). Erste Literaturquellen können demnach oftmals schon anhand ihres Titels als irrelevant identifiziert werden. Für alle übrigen Veröffentlichungen folgt eine Auswahl anhand ihres Abstracts und schließlich ihres Volltexts.

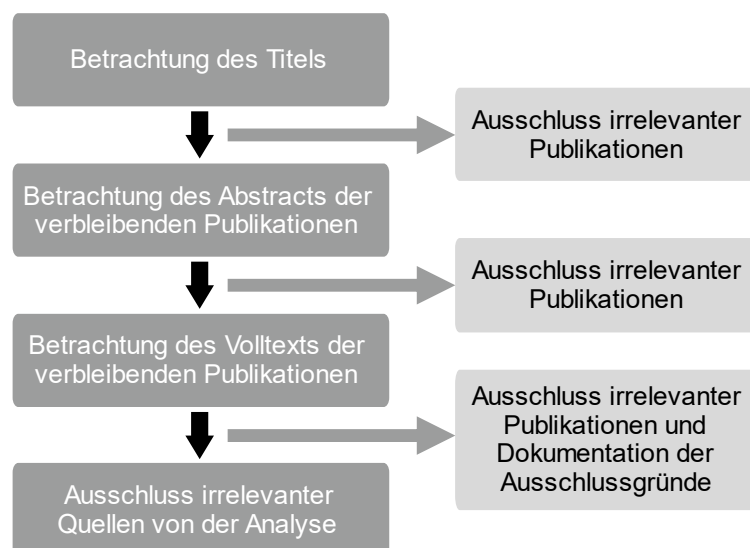


Abbildung 2-9: Prozessschritte zur Auswahl von Quellen (in Anlehnung an Booth et al. 2012, S. 143)

Sind eine Vielzahl von Faktoren für die Aufnahme einer Quelle in das Review entscheidend, kann die von Webster, Watson (2002, S. xvii) und vom Brocke et al. (2009, S. 10) vorgestellte Konzept-Matrix (siehe Abbildung 2-10) helfen, die Analyse übersichtlich zu gestalten. In dieser

werden die Quellen zeilenweise aufgelistet und können dann hinsichtlich des Vorhandenseins der in den Spalten definierten Konzepte/Kriterien untersucht werden. Falls es im Rahmen der konkreten Untersuchung sinnvoll ist, können die einzelnen Konzepte (A, B, ...) noch in weitere Analyseeinheiten (O, G, I) unterteilt werden.

| <b>Table 3. Concept Matrix Augmented with Units of Analysis</b> |          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |
|-----------------------------------------------------------------|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|---|---|
| Articles                                                        | Concepts |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |   |   |
|                                                                 | A        |   |   | B |   |   | C |   |   | D |   |   | ... |   |   |
| Unit of analysis                                                | O        | G | I | O | G | I | O | G | I | O | G | I | O   | G | I |
| 1                                                               |          |   |   |   | × |   |   |   | × |   |   |   |     |   | × |
| 2                                                               | ×        |   |   |   | × | × |   | × |   |   |   |   |     |   |   |
| ...                                                             |          |   |   |   |   |   |   | × | × |   |   | × |     |   |   |

Abbildung 2-10: Erweiterte Concept Matrix (Webster, Watson 2002, S. xvi)

Die vorgestellten Methoden können für die Bewertung der Quellen hinsichtlich einer Aufnahme in das Review genutzt werden. Meier (2002, S. 4 f.) unterscheidet grundsätzlich zwischen Auswählen und Bewerten. Während beim Auswählen lediglich „die prinzipielle Eignung von Varianten untersucht und ungeeignete Varianten ausgeschlossen [werden]“ (Meier 2002, S. 3), werden ebendiese ausgewählten Varianten beim Bewerten „hinsichtlich ihrer Qualität für das Erfüllen [festgelegter] Anforderungen“ untersucht. Für die in Kapitel 4 erfolgende Bewertung der Ergebnisse der Literaturanalyse hinsichtlich ihrer Eignung für KMU müssen folglich weitere Verfahren aufgezeigt werden. Im Allgemeinen kann hierbei zwischen einer quantitativen und einer qualitativen Betrachtung unterschieden werden (Fink 2020, S. 5). Diese Bewertung der Eignung wird sich aller Wahrscheinlichkeit nach nicht anhand konkreter Kennzahlen messen lassen und folglich auf Basis einer qualitativen Methode erfolgen. Das BMI (2020) unterscheidet mit der Nutzwert-, Prioritäten- und Portfolioanalyse grundsätzlich drei qualitative Bewertungsverfahren.

| Kriterium   | Gewichtung | Option 1  |          | Option 2  |          | Option 3  |          |
|-------------|------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|             |            | Bewertung | Nutzwert | Bewertung | Nutzwert | Bewertung | Nutzwert |
| Kriterium 1 | 20%        | 10        | 2        | 8         | 1,6      | 7         | 1,4      |
| Kriterium 2 | 50%        | 5         | 2,5      | 3         | 1,5      | 7         | 3,5      |
| Kriterium 3 | 30%        | 8         | 2,4      | 7         | 2,1      | 4         | 1,2      |
| Score       |            | 6,9       |          | 5,2       |          | 6,1       |          |
| Rang        |            | 1.        |          | 3.        |          | 2.        |          |

Abbildung 2-11: Beispielhafte Darstellung einer Nutzwertanalyse

Bei der Nutzwertanalyse werden die zu bewertenden Objekte (Optionen) in den Spalten und die zuvor festgelegten Bewertungskriterien in den Zeilen einer Matrix abgebildet, wie beispielhaft in Abbildung 2-11 zu sehen ist. Für jede Kombination aus Objekt und Kriterium wird eine Bewertung entsprechend einer definierten Bewertungsskala vorgenommen. Aus der Multiplikation von Bewertung und Gewichtung der Kriterien ergeben sich die sogenannten Nutzwerte. Abschließend werden die Nutzwerte der verschiedenen Kriterien für jede Option summiert, wodurch diese in eine Rangliste eingeordnet werden können. (Hüsselmann et al. 2020, S. 2)

Der Prioritätenliste liegt das Prinzip des Paarvergleichs zugrunde. Bei dieser Bewertungsmethode werden die einzelnen Objekte (Optionen) gegenübergestellt und in Relation zueinander bewertet. Hierfür wird eine quadratische Matrix aufgestellt, in der sowohl entlang der Zeilen als auch der Spalten die zu bewertenden Optionen aufgelistet werden. Anschließend wird ermittelt, ob die Option in einer Spalte besser oder schlechter geeignet ist, also den Anforderungen mehr oder weniger entspricht, als die in den darunter liegenden Zellen aufgeführten Optionen. In dem in Abbildung 2-12 dargestellten Beispiel erfolgt die Bewertung nur mittels der Antwortoptionen „besser (1)“ beziehungsweise „schlechter (0)“. Im Allgemeinen kann hier aber auch eine andere, umfangreichere Bewertungsskala verwendet werden, die beispielsweise zusätzlich die Optionen „viel besser/schlechter“ und „gleichwertig“ umfasst. Am Ende der Bewertung werden die vergebenen Kennzahlen spaltenweise aufsummiert und so eine Rangfolge der bewerteten Objekte gebildet.

|                 |   | Option |    |    |    |    |
|-----------------|---|--------|----|----|----|----|
|                 |   | 1      | 2  | 3  | 4  | 5  |
| Im Vergleich zu | 1 | –      | 1  | 0  | 1  | 0  |
|                 | 2 | 1      | –  | 1  | 0  | 1  |
|                 | 3 | 0      | 1  | –  | 1  | 0  |
|                 | 4 | 1      | 0  | 1  | –  | 0  |
|                 | 5 | 0      | 1  | 0  | 0  | –  |
| Score           |   | 2      | 3  | 2  | 2  | 1  |
| Rang            |   | 2.     | 1. | 2. | 2. | 3. |

Abbildung 2-12: Schematische Darstellung des Paarvergleichs

Die Portfolioanalyse dient in erster Linie der Bewertung der strategischen Perspektive verschiedener Handlungsalternativen im unternehmerischen Kontext. Daher wird sie im Rahmen dieser Arbeit keine Rolle spielen und wird folglich nicht weiter erläutert.

### **3 Bestehende Methoden zur Einschätzung des Digitalisierungsgrades von Unternehmen**

Die in dieser Arbeit als Ziel deklarierte Entwicklung einer KMU-spezifischen Einschätzungsmethode der Unternehmenssituation im Kontext von Industrie 4.0 soll auf Grundlage bereits in der Literatur und Forschung bestehender Industrie 4.0-Reifegradmodelle erfolgen. Daher gilt es zunächst, ebendiese im Rahmen einer umfangreichen, systematischen Literaturrecherche zu ermitteln, anschließend zu beschreiben, hinsichtlich ihrer Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu analysieren und die Ergebnisse übersichtlich darzustellen.

#### **3.1 Systematik für die Recherche**

Um die Objektivität und Nachvollziehbarkeit des Rechercheprozesses zu gewährleisten, folgt die Literaturrecherche einer definierten Systematik, die anhand der in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten Vorgehensmodelle abgeleitet wird. Da die meisten der vorgestellten Vorgehensmodelle sich auf die Betrachtung von Studien beziehen, müssen einige Schritte hierbei jedoch differenziert betrachtet beziehungsweise ausgelassen werden. Zudem wird die in Abschnitt 2.3.2 eingeführte Benennung der Modelle in „Vorgehensmodell 1-5“ in diesem Kapitel der Einfachheit halber beibehalten und auf eine Nennung der Autorennamen verzichtet.

Zu Beginn des Rechercheprozesses wird, wie durch die Vorgehensmodelle 1, 2, 3 und 5 vorgeschlagen, eine Forschungsfrage formuliert. Eine Ermittlung des Bedarfs (vgl. Vorgehensmodell 2) ist nicht notwendig, da dieser durch die Problem- beziehungsweise Zielstellung dieser Arbeit bereits impliziert wird. Auch auf eine Festlegung des inhaltlichen und zeitlichen Umfangs (vgl. Vorgehensmodell 4 und 5) kann hier verzichtet werden, da zunächst alle Rechercheergebnisse betrachtet und hinsichtlich ihrer Relevanz untersucht werden sollen. Mit dieser Definition einer Recherchesystematik erübrigt sich zudem die in den Vorgehensmodellen 2 und 5 geforderte Erstellung eines Rechercheprotokolls.

Entsprechend folgt unmittelbar auf die Festlegung der Forschungsfrage die Auswahl geeigneter Recherchemedien, in diesem Fall Datenbanken (vgl. Vorgehensmodell 1 und 2). Anschließend werden in Anlehnung an Vorgehensmodell 4 geeignete Suchbegriffe ermittelt und aus diesen ein Suchstring abgeleitet (vgl. Vorgehensmodell 1 und 2). Dieser sollte dabei einerseits eine möglichst umfangreiche Ergebnismenge erzielen, um keine relevanten Publikationen zu vernachlässigen und andererseits so präzise sein, dass möglichst wenig irrelevante Quellen in der Ergebnisliste auftauchen. Da es sich im Umkehrschluss nicht vermeiden lässt, auch einige irrelevante Ergebnisse zu erzielen, besteht der vierte Schritt der Systematik in der Definition von Aufnahme- beziehungsweise Ausschlusskriterien, wie es von allen genannten Vorgehensmodellen vorgeschlagen wird. Eine Unterteilung in praktische und methodische Filter,

wie sie in Vorgehensmodell 1 vorgenommen wird, ist hier nicht notwendig, da sich methodische Filter in erster Linie auf die Qualität von Studien beziehen und diese hier nicht Ziel der Recherche sind.

An die Vorbereitung der Literaturrecherche schließt sich die in allen fünf Vorgehensmodellen beschriebene Durchführung der Recherche, also die Eingabe des definierten Suchstrings in die Datenbanken und das Bilden einer vorläufigen Ergebnisliste anhand der Aufnahme- und Ausschlusskriterien, an. Abschließend werden die Ergebnisse mit Hilfe ihres Abstracts weiter gefiltert und so irrelevante Quellen von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Sollte das Studieren des Abstract nicht die gewünschte Klarheit hinsichtlich des Inhalts der Publikation verschaffen, wird zudem der Volltext grob betrachtet (vgl. Abbildung 2-9).

Da die Recherchethematik sich, wie bereits beschrieben, nur schwer in einer gewissen Anzahl von Suchbegriffen beziehungsweise in einem überschaubaren Suchstring vollumfänglich und abschließend erfassen lässt, soll die oben beschriebene Primärrecherche ähnlich wie in Vorgehensmodell 4 durch eine Rückwärtssuche ergänzt werden. Dabei werden die im Rahmen der Primärrecherche als relevant identifizierten Quellen darauf untersucht, welche Reifegradmodelle sie selbst zitieren. Die auf diese Weise etwaigen neu identifizierten Publikationen werden zunächst der vorläufigen Ergebnisliste hinzugefügt und anschließend mittels der bereits bekannten Aufnahme- und Ausschlusskriterien sowie ihres Abstracts beziehungsweise Volltexts gefiltert. Aus den kombinierten Ergebnissen von Primärrecherche und Rückwärtssuche wird schließlich eine finale Ergebnisliste relevanter Publikationen, die in den Abschnitten 3.3 bis 3.5 beschrieben und analysiert (vgl. Vorgehensmodell 1-5) werden, gebildet. Die vollständige Systematik ist in Abbildung 3-1 übersichtlich dargestellt.

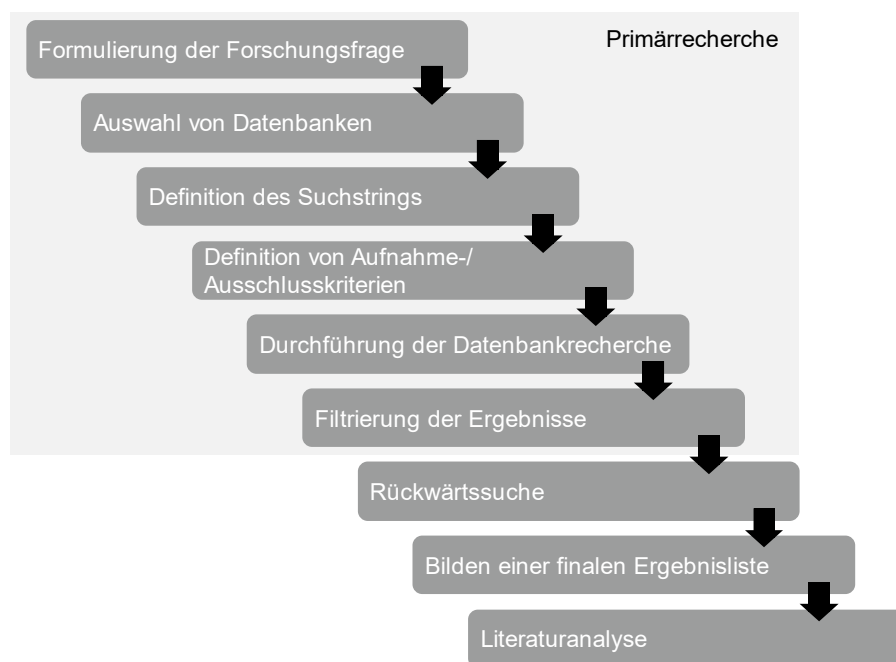


Abbildung 3-1: Systematik zur Durchführung der Literaturrecherche

Die vier vorbereitenden Schritte der Literaturrecherche sollen im Folgenden erläutert werden:

### **Formulierung der Forschungsfrage**

Die im weiteren Verlauf dieser Arbeit zu entwickelnde Einschätzungsmethode soll zwar speziell für die Anwendung in KMU geeignet sein, die als Grundlage dienenden, zu recherchierenden Methoden müssen diesen Fokus jedoch nicht zwangsläufig aufweisen. Daher muss die Leitfrage des Rechercheprozesses deutlich allgemeiner formuliert werden und kann beispielsweise lauten: „Welche Methoden und Modelle zur Einschätzung der Unternehmenssituation im Kontext der Industrie 4.0 existieren in der Literatur?“.

### **Auswahl von Datenbanken**

Aufgrund der fehlenden inhaltlichen Kontrolle und des besonders großen „toten Winkels“ (vgl. Abschnitt 2.3.1) soll im Rahmen dieser Arbeit auf eine Internetrecherche verzichtet und sich stattdessen auf die Suche in Datenbanken beschränkt werden. Geeignete Datenbanken werden hierbei mittels des DBIS der Universität Kassel, das in 41 Fachgebiete unterteilt ist, ausgewählt. Im Fachgebiet „Technik allgemein“ sind dabei 149 Fachdatenbanken verzeichnet, die in Anhang 0 aufgelistet sind. Viele dieser Datenbanken sind nur für spezielle Themenbereiche, wie beispielsweise Mechanik, Bauwesen oder Forstwirtschaft, bestimmt. Weitere Datenbanken beschränken sich auf Literatur des vergangenen Jahrtausends, auf Normen und Patente oder auf nicht englisch- beziehungsweise deutschsprachige Literatur. Einige Datenbanken sind zudem rein bibliographischer Natur, bieten also keine Volltextzugriffe für die gelisteten Quellen. Folglich kann ein Großteil der 149 Datenbanken von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden. Die verbliebenen Datenbanken werden schließlich einer ersten Suchprobe unterzogen und diejenigen, die hierbei keine Ergebnisse liefern, ebenfalls ausgeschlossen. Daraus ergeben sich insgesamt fünf relevante Datenbanken:

- Academic Search Ultimate
- IEEE Xplore / Electronic Library Online
- ScienceDirect
- Web of Science Core Collection
- WISO

### **Definition des Suchstrings**

Das Konzept der Einschätzungsmethoden beziehungsweise Reifegradmodelle ist im Vergleich zu anderen Recherchethemen begrifflich weiter gefasst; es existiert kein definierter Oberbegriff, der für die Recherche verwendet werden kann. Daher werden zunächst, ähnlich wie in Vorgehensmodell 4 durch den Schritt des Konzept-Mappings beschrieben, relevante Suchbegriffe zusammengetragen (siehe Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Mögliche Suchbegriffe für die Literaturrecherche

|                | Deutsch                                                      | Englisch                                                                                                                                                                                          |
|----------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Methode</b> | Reifegradmodell<br>Einschätzungsmethode<br>Bewertungsmethode | Readiness Assessment/Evaluation/Index<br>Maturity Model/Grid/Index<br>Capability Model<br>Digitalization Degree<br>Roadmap<br>Assessment Model/Tool<br>Self-Assessment<br>Implementation Strategy |
| <b>Kontext</b> | Industrie 4.0                                                | Industry 4.0                                                                                                                                                                                      |

Mittels Trunkierung und Boolescher Operatoren (vgl. Abschnitt 2.3.1) wird hieraus ein Suchstring gebildet. Da die Suchmaske der Datenbanken zumeist auf die Verwendung von acht Booleschen Operatoren beschränkt ist, können nicht alle der oben genannten Begriffe in die Suche eingeschlossen werden und es erfolgt eine Beschränkung auf die relevantesten Termini. Da alle zu durchsuchenden Datenbanken hauptsächlich oder ausschließlich englischsprachige Literatur enthalten, werden die englischen Suchbegriffe dabei als relevanter angesehen. Aus diesen Überlegungen heraus wird schlussendlich folgender Suchstring definiert:

*(“Industrie 4.0” OR “Industry 4.0”) AND (Reifegrad\* OR Readiness OR Maturity OR Capability Model OR “Assessment Model” OR “Assessment Tool” OR “Process Improvement Model”)*

Gesucht wird ausschließlich im Titel der Publikationen, was über die Suchmaske der Datenbanken eingestellt werden muss. Die Verwendung der Phrasensuche mittels Anführungszeichen stellt dabei sicher, dass Ausdrücke wie beispielsweise „Industrie 4.0“ im Gesamten und nicht die einzelnen Bestandteile getrennt an unterschiedlicher Stelle des Titels enthalten sind.

### Aufnahme- und Ausschlusskriterien

Um die Suchergebnisse tatsächlich auch nutzen zu können, ist es zunächst unabdingbar, dass diese als Volltext frei oder mittels der Universitätslizenz zugänglich sind. Publikationen, bei denen kein Volltextzugriff vorhanden ist, werden folglich nicht weiter betrachtet. Weiterhin können Publikationen, die vor 2011 veröffentlicht wurden, von der Betrachtung ausgeschlossen werden, da erst in diesem Jahr der Begriff Industrie 4.0 ausgerufen wurde (vgl. Abschnitt 2.1.1). Auch Ergebnisse, die trotz des verwendeten Suchstrings nicht in deutscher oder englischer Sprache verfasst sind, werden nicht weiter untersucht.

## 3.2 Durchführung und Ergebnisse der Recherche

Die Literaturrecherche wird wie beschrieben in den fünf genannten Datenbanken durchgeführt. Der Suchprozess sowie die ungefilterte Ergebnismenge werden im Folgenden exemplarisch

für die erste Datenbank „Academic Search Ultimate“ (ASU) dargestellt und sind analog für die anderen Datenbanken in Anhang B zu finden.

Der Suchprozess in ASU erfolgt mit Hilfe der erweiterten Suchmaske (siehe Abbildung 3-2) und des in Abschnitt 3.1 definierten Suchstrings. Die Suche wird auf den Titel der Publikationen eingeschränkt und der Suchmodus wird entsprechend auf „Boolean/Phrase“ eingestellt. Der Suchbereich wird auf die Jahre ab 2011 eingegrenzt; eine Einschränkung auf bestimmte Publikationsformen wird dagegen nicht vorgenommen.

U N I K A S S E L  
B I B L I O T H E K

Searching: Academic Search Ultimate | [Choose Databases](#)

"Industrie 4.0" OR "Industry 4.0" TI Title ▾ Search

AND ▾ Reifegrad OR Readiness OR Maturity OR Capability Mo TI Title ▾ Create Alert

AND ▾ Select a Field (optional) ▾ Clear ?

Basic Search Advanced Search Search History

Search Options

Search Modes and Expanders

Search modes ?

☒ Boolean/Phrase

☐ Find all my search terms

☐ Find any of my search terms

☐ SmartText Searching [Hint](#)

Limit your results

Full Text

☐

Scholarly (Peer Reviewed) Journals

☐

Published Date

Month ▾ Year: 2011 — Month ▾ Year: 2020

Abbildung 3-2: Suchprozess in "Academic Search Ultimate"

Aus dieser Suche resultieren neun Publikationen, die allesamt als Volltext verfügbar sind und auch die anderen in Abschnitt 3.1 festgelegten Aufnahmekriterien erfüllen. Folglich werden sie in die vorläufige, ungefilterte Ergebnisliste, die im Auszug in Tabelle 3-2 dargestellt ist, aufgenommen.

Analog wurden durch die Suche in den Datenbanken „IEEE Xplore / Electronic Library Online“, „ScienceDirect“, „Web of Science Core Collection“ und „WISO“ 12, 14, 42 und 38 Publikationen identifiziert und zur vorläufigen Ergebnisliste hinzugefügt. Diese umfasst somit insgesamt 115

Publikationen, denen eine eindeutige Kennziffer von [1] bis [115] zugeteilt wird, und ist in Anhang C aufgeführt. Im nächsten Schritt wird diese umfangreiche Liste gefiltert, um die für diese Arbeit relevanten Quellen zu identifizieren.

*Tabelle 3-2: Vorläufige Ergebnisliste aus "Academic Search Ultimate"*

| Nr. | Titel                                                          |
|-----|----------------------------------------------------------------|
| 1   | Rapidly Arriving Futures: Future Readiness For Industry 4.0    |
| ... | ...                                                            |
| 5   | Industry 4.0 Readiness Assessment For South African Industries |
| ... | ...                                                            |
| 9   | Human Resources Readiness for Industry 4.0                     |

### **Filtrierung der Ergebnisse**

Durch die Suche in fünf Datenbanken ist es möglich, dass Publikationen in der ungefilterten Ergebnisliste doppelt erscheinen. In einem ersten Schritt wird diese Liste daher zunächst anhand des Titels der Publikationen alphabetisch sortiert und Doppelungen werden eliminiert, wonach 76 Publikationen verbleiben. Im nächsten Schritt werden diese Publikationen anhand ihres Abstracts und falls notwendig durch eine oberflächliche Betrachtung ihres gesamten Inhalts untersucht. Dabei zeigt sich, dass die Liste zum einen Publikationen enthält, die, wie erwartet und gewünscht, eigenständige Reifegradmodelle – einige davon bereits speziell mit Fokus auf KMU – beschreiben. Zum anderen stellen einige Publikationen ein Review bestehender Methoden und Modelle zur Reifegradermittlung dar. Diese Reviews sind entweder allgemein gehalten oder fokussieren einen bestimmten Aspekt der Industrie 4.0 oder eine bestimmte Zielgruppe, wie beispielsweise KMU. All diese Publikationen sind grundsätzlich für eine weitere Betrachtung relevant.

Als irrelevant eingestuft werden hingegen Quellen, die lediglich einen Anwendungsfall darstellen, die also beispielsweise die Industrie 4.0-Reife in einem bestimmten Sektor oder einer bestimmten Region messen, ohne dabei konkret auf eine Einschätzungs-/Bewertungsmethode einzugehen. Dasselbe gilt für Publikationen, die einen Spezialfall darstellen, weil sie nur einen kleinen Teilbereich der Industrie 4.0 betrachten. Einige Quellen stellen zudem lediglich eine Art Kommentar oder Kurzfassung eines in einer anderen Quelle ausführlicher beschriebenen Modells dar, bilden das englische Pendant zu einer deutschen Publikation oder sind gar vollständig themenfremd. All diese Publikationen werden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Damit verbleiben in der finalen Ergebnisliste der Primärrecherche 31 Publikationen, die in Tabelle 3-3 aufgeführt sind.

*Tabelle 3-3: Filtrierte Ergebnisliste der Primärrecherche*

| [Nr.] | Autor, Jahr                     | Inhalt/Kategorie                                                                                           |
|-------|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [2]   | Li, Lau 2019                    | Review (Fokus: IT und HR-Perspektive)                                                                      |
| [3]   | Mittal et al. 2018              | Review (Fokus: KMU)                                                                                        |
| [6]   | Colli et al. 2019               | Eigenständiges Modell (Fokus: Roadmaps anhand der Einstufung)                                              |
| [8]   | Rauch et al. 2020               | Eigenständiges Modell (Fokus: KMU)                                                                         |
| [9]   | Schumacher et al. 2016          | Eigenständiges Modell (allgemein), s. hierzu auch Quelle [95]                                              |
| [11]  | Basl, Doucek 2019               | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                          |
| [17]  | Trotta, Garengo 2019            | Eigenständiges Modell (Fokus: KMU)                                                                         |
| [22]  | Rajnai, Kocsis 2018             | Review (allgemein)                                                                                         |
| [26]  | Nausch et al. 2020              | Eigenständiges Modell (Fokus: Betriebliche Datennutzung)                                                   |
| [31]  | Landwehr-Zloch, Eichfelder 2019 | Eigenständiges Modell (Fokus: KMU)                                                                         |
| [32]  | Leineweber et al. 2018          | Eigenständiges Modell (Fokus: KMU)                                                                         |
| [35]  | Colli et al. 2018               | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                          |
| [38]  | Bibby, Dehe 2018                | Eigenständiges Modell (Fokus: Großunternehmen)                                                             |
| [40]  | Kolla et al. 2019               | Review und Modell-Vorstufe: Mapping von KMU-Eigenschaften und Industrie 4.0/Lean Technologien (Fokus: KMU) |
| [42]  | Brozzi et al. 2018              | Eigenständiges Modell (Fokus: Handwerksbetriebe)                                                           |
| [44]  | Gökalp et al. 2017              | Eigenständiges Modell (Fokus: allgemein)                                                                   |
| [46]  | Asdecker, Felch 2018            | Eigenständiges Modell (Fokus: Supply Chain Management)                                                     |
| [47]  | Modrák, Šoltysová 2020          | Eigenständiges Modell (Fokus: Mass Customization)                                                          |
| [48]  | Wagire et al. 2020              | Eigenständiges Modell (Fokus: produzierendes Gewerbe in Indien)                                            |
| [55]  | Schuh et al. 2017               | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                          |
| [58]  | Issa et al. 2018                | Eigenständiges Modell (Fokus: Roadmap-Entwicklung)                                                         |
| [61]  | Lichtblau et al. 2015           | Eigenständiges Modell (Fokus: Maschinen- & Anlagenbau in DE)                                               |
| [67]  | Trstenjak et al. 2019           | Eigenständiges Modell (Fokus: Gewichtung der Modellfaktoren)                                               |
| [73]  | Unterhofer et al. 2018          | Review (Fokus: KMU) & Grundlage für Quelle [8]                                                             |
| [77]  | Akdil et al. 2018               | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                          |
| [79]  | Lucato et al. 2019              | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                          |
| [88]  | Botha 2018                      | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                          |
| [95]  | Schumacher et al. 2019          | Eigenständiges Modell (Weiterentwicklung von Quelle [9])                                                   |
| [100] | Leyh et al. 2016b               | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                          |
| [101] | Pacchini et al. 2019            | Eigenständiges Modell (Fokus: Bereitschaft zur Umsetzung)                                                  |
| [104] | Ganzarain, Errasti 2016         | Eigenständiges Modell (Fokus: KMU)                                                                         |

## Rückwärtssuche

Im Anschluss an die damit abgeschlossene Primärrecherche werden die 31 verbleibenden Publikationen darauf untersucht, ob sie selbst eine explizite Betrachtung bestehender Industrie 4.0-Reifegradmodelle vornehmen. Für alle Publikationen, für die dies zutrifft, werden eben diese zitierten Reifegradmodelle – sowohl die bereits aus der Primärrecherche bekannten als auch bisher unbekannte - tabellarisch notiert, wie in Anhang E zu sehen ist. Hierbei werden 59 neue Publikationen erfasst, die an die vorläufige Ergebnisliste angehängt werden und somit die Einträge [116] bis [174] bilden. Diese Publikationen werden nun, wie in Anhang D dargestellt, analog zum Vorgehen bei der Primärrecherche gefiltert und kategorisiert, wobei insgesamt 20 relevante Quellen, also eigenständige Modelle oder Reviews, identifiziert werden (siehe Tabelle 3-4).

*Tabelle 3-4: Filtrierte Ergebnisliste der Rückwärtssuche*

| [Nr.] | Autor, Jahr                 | Inhalt/Kategorie                                            |
|-------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------|
| [116] | Pessl et al. 2017           | Eigenständiges Modell (allgemein)                           |
| [118] | Geissbauer et al. 2016      | Eigenständiges Modell (allgemein)                           |
| [119] | Rockwell Automation 2014    | Eigenständiges Modell (allgemein)                           |
| [120] | Qin et al. 2016             | Eigenständiges Modell (allgemein)                           |
| [123] | Jung et al. 2016            | Eigenständiges Modell (sehr mathematisch)                   |
| [124] | Anderl 2015                 | Eigenständiges Modell (allgemein)                           |
| [125] | Lee et al. 2017             | Eigenständiges Modell (allgemein)                           |
| [126] | De Carolis et al. 2017      | Eigenständiges Modell (allgemein)                           |
| [138] | Jodlbauer, Schagerl 2016    | Eigenständiges Modell (allgemein)                           |
| [139] | Back, Berghaus 2016         | Eigenständiges Modell (allgemein)                           |
| [141] | Agca et al. 2017            | Eigenständiges Modell (allgemein)                           |
| [142] | Dennis et al. 2017          | Eigenständiges Modell (Fokus: kapitalintensive Unternehmen) |
| [143] | EDB Singapore 2017          | Eigenständiges Modell (allgemein)                           |
| [146] | Canetta et al. 2018         | Eigenständiges Modell (allgemein)                           |
| [147] | Basl 2018                   | Review (Fokus: Reifegrad des Informationssystem)            |
| [149] | Gill, VanBoskirk 2016       | Eigenständiges Modell (allgemein)                           |
| [151] | Häberer et al. 2017         | Eigenständiges Modell (Fokus: KMU)                          |
| [157] | Klötzer, Pflaum 2017        | Eigenständiges Modell (Fokus: Supply Chain Management)      |
| [167] | Demircan Keskin et al. 2019 | Eigenständiges Modell (allgemein)                           |
| [173] | Reuter et al. 2016          | Eigenständiges Modell (allgemein)                           |

## Bilden der finalen Ergebnisliste

Mit nun insgesamt 51 Publikationen ist die gefilterte Ergebnisliste deutlich zu umfangreich, um alle enthaltenen Publikationen detailliert betrachten zu können, weshalb folgende Priorisierung vorgenommen wird: Zum einen werden alle sechs Publikationen aus beiden Rechenschritten, die ein Reifegradmodell, das mit einem expliziten KMU-Fokus ausgewiesen ist, beschreiben, weiter betrachtet.

*Tabelle 3-5: Finale Ergebnisliste der Literaturrecherche*

| Lfd. Nr. | [Nr.] | Autor, Jahr                     | Aufnahmegrund                    |
|----------|-------|---------------------------------|----------------------------------|
| 1        | [8]   | Rauch et al. 2020               | KMU-Fokus                        |
| 2        | [9]   | Schumacher et al. 2016          | Zitierhäufigkeit (18)            |
| 3        | [17]  | Trotta, Garengo 2019            | KMU-Fokus                        |
| 4        | [31]  | Landwehr-Zloch, Eichfelder 2019 | KMU-Fokus                        |
| 5        | [32]  | Leineweber et al. 2018          | KMU-Fokus                        |
| 6        | [38]  | Bibby, Dehe 2018                | Zitierhäufigkeit (3)             |
| 7        | [44]  | Gökalp et al. 2017              | Zitierhäufigkeit (6)             |
| 8        | [55]  | Schuh et al. 2017               | Zitierhäufigkeit (10)            |
| 9        | [61]  | Lichtblau et al. 2015           | Zitierhäufigkeit (16)            |
| 10       | [77]  | Akdil et al. 2018               | Zitierhäufigkeit (3)             |
| 11       | [100] | Leyh et al. 2016b               | Zitierhäufigkeit (10)            |
| 12       | [104] | Ganzarain, Errasti 2016         | Zitierhäufigkeit (8) & KMU-Fokus |
| 13       | [118] | Geissbauer et al. 2016          | Zitierhäufigkeit (13)            |
| 14       | [119] | Rockwell Automation 2014        | Zitierhäufigkeit (10)            |
| 15       | [124] | Anderl 2015                     | Zitierhäufigkeit (5)             |
| 16       | [126] | De Carolis et al. 2017          | Zitierhäufigkeit (6)             |
| 17       | [138] | Jodlbauer, Schagerl 2016        | Zitierhäufigkeit (3)             |
| 18       | [151] | Häberer et al. 2017             | KMU-Fokus                        |

Zum anderen wird die bereits im Rahmen der Rückwärtssuche erstellte Tabelle (siehe Anhang E) genutzt, um die Häufigkeit, mit der die verschiedenen Publikationen in anderen Quellen zitiert werden, zu ermitteln. Die Zitierhäufigkeit wird als Indikator für die wissenschaftliche Relevanz einer Publikation angenommen, weshalb die meistzitierten Publikationen in die detaillierte Betrachtung eingeschlossen werden. Es zeigt sich, dass, wie in Anhang F abgebildet, von den insgesamt 77 zitierten Publikationen 14 Stück mindestens drei Mal zitiert werden. Hierunter fallen auch die Quelle [104], die bereits aufgrund ihres KMU-Fokus in die Ergebnisliste aufgenommen wurde, sowie die Quelle [136], die aufgrund ihres zu begrenzten inhaltlichen Fokus zuvor von der Betrachtung ausgeschlossen wurde. Zudem wird die dreifach zi-

tierte Quelle [134] durch die Quelle [138] ersetzt, da diese dasselbe Reifegradmodell umfangreicher beschreibt. Aus den resultierenden zwölf Publikationen und den sechs Quellen, die ein Reifegradmodell mit explizitem KMU-Fokus beschreiben, wird eine Ergebnisliste, deren Umfang mit 18 Titeln handhabbar ist und die daher als final definiert wird, gebildet. Diese 18 Publikationen, die in Tabelle 3-5 aufgelistet sind, werden in den folgenden Abschnitten 3.3 bis 3.5 näher untersucht.

### **3.3 Beschreibung bestehender Methoden zur Einschätzung des Digitalisierungsgrades von Unternehmen**

Ziel dieses Abschnitts ist es, die 18 im vorherigen Abschnitt identifizierten Reifegradmodelle zu beschreiben. Hierfür ist es zunächst sinnvoll, den Begriff des Reifegradmodells, der bereits vielfach verwendet, aber nie definiert wurde, einmal genauer zu betrachten.

Reifegradmodelle sind Vorgehensmodelle (Jodlbauer, Schagerl 2016, S. 1474) und stellen als solche eine Unterkategorie der Modelle dar. Nach Becker et al. (2009, S. 250) beziehen sich Reifegradmodelle „häufig auf die Beurteilung von Prozessen mit dem Ziel, einheitliche und überprüfbare Aussagen zu ihrem Status und zur Qualität ihrer Durchführung zu erhalten“, wobei anzumerken ist, dass das Betrachtungsobjekt im Allgemeinen nicht zwangsläufig ein Prozess sein muss. Reifegradmodelle dienen neben der Bestimmung der Ist-Situation des Betrachtungsobjekts vor allem auch dazu, einen möglichen Entwicklungspfad für ebendieses Objekt hin zu einem Soll-Zustand aufzuzeigen (Altuntas, Uhl 2016, S. 127). Nach Akkasoglu (2013, S. 51 ff.) bestehen Reifegradmodelle aus Reifegraddimensionen und -indikatoren, Reifegradstufen, einer Reifegrad-Kennwert-Matrix und gegebenenfalls einer Gewichtung der Indikatoren. Reifegraddimensionen beziehungsweise -indikatoren sind Aspekte des Betrachtungsobjekts, wobei die Dimensionen als Überkategorien der einzelnen Indikatoren verstanden werden können. Für jeden Indikator werden bestimmte Merkmalsausprägungen festgelegt, die zur Erreichung einer Reifegradstufe erfüllt sein müssen (ebd.). Die Reifegradstufen sind „ordinale Maße für die Reife und Leistungsfähigkeit des betrachteten Objekts“ (Altuntas, Uhl 2016, S. 127) und werden meist mit Hilfe einer Likert-Skala definiert (ebd.). Likert-Skalen sind üblicherweise fünfstufig und dienen im weiteren Sinne der Erfassung der Einstellung einer Person zu einem Thema (Statista Lexikon 2020a). Die fünfte und höchste Stufe steht dabei für starke Zustimmung oder vollständiges Erfüllen der Anforderungen und die erste Stufe entsprechend für das Gegenteil. Durch Festlegung der (1 bis n) Indikatoren und (1 bis m) Reifegrade entsteht eine zweidimensionale Matrix, die Reifegrad-Kennwert-Matrix, wie Abbildung 3-3 beispielhaft dargestellt ist.

Die im Folgenden beschriebenen 18 Reifegradmodelle folgen diesem Aufbau im Wesentlichen, wobei die Namensbezeichnungen der Modellkomponenten abweichen können. So werden insbesondere die Indikatoren selten als solche bezeichnet und stattdessen eher der Begriff des Items, der Fähigkeit oder ähnliche Termini verwendet.

|      |      |      | Reifegradstufen                 |         |         |     |                                 |
|------|------|------|---------------------------------|---------|---------|-----|---------------------------------|
| Dim. | Gew. | Ind. | Stufe 1                         | Stufe 2 | Stufe 3 | ... | Stufe m                         |
| 1    | ...  | 1.1  | Anforderungen an 1.1 in Stufe 1 | ...     | ...     | ... | Anforderungen an 1.1 in Stufe m |
|      | ...  | 1.2  | ...                             | ...     | ...     | ... | ...                             |
|      | ...  | ...  | ...                             | ...     | ...     | ... | ...                             |
| 2    | ...  | 2.1  | ...                             | ...     | ...     | ... | ...                             |
|      | ...  | 2.2  | ...                             | ...     | ...     | ... | ...                             |
| n    | ...  | n.1  | ...                             | ...     | ...     | ... | ...                             |
|      | ...  | n.2  | Anforderungen an n.2 in Stufe 1 | ...     | ...     | ... | Anforderungen an n.2 in Stufe m |
|      | ...  | ...  | ...                             | ...     | ...     | ... | ...                             |

steigende Anforderungen

Abbildung 3-3: Aufbau einer Reifegrad-Kennwert-Matrix (in Anlehnung an Akkasoglu 2013, S. 58)

Das erste der 18 zu betrachtenden Modelle stammt von Rauch et al. (2020), die betonen, dass insbesondere bei KMU derzeit immer noch große Unsicherheit hinsichtlich der Technologien und Konzepte der Industrie 4.0 besteht. Vor diesem Hintergrund haben sie ein Reifegradmodell entwickelt, das KMU über ebendiese Aspekte informieren, ihren aktuellen Fortschritt bei der Implementierung von Industrie 4.0 erfassen und ihnen die für sie individuell wichtigsten Konzepte aufzeigen soll. Sie teilen die Aspekte der Industrie 4.0 hierfür in die vier Dimensionen „Operations“, „Organization“, „Socio-Culture“ und „Technology“ ein. Diese unterteilen sie zunächst in mehrere Sub-Dimensionen, die schließlich die insgesamt 42 Indikatoren, die als „concepts and technologies“ bezeichnet werden, enthalten. Zusätzlich definieren sie gemäß der Likert-Skala fünf Reifegradstufen und beschreiben die Ausprägung eines jeden Indikators für alle Reifegrade im Rahmen einer Reifegrad-Kennwert-Matrix. Veröffentlicht ist jedoch nur ein Auszug dieser Matrix bestehend aus fünf Indikatoren. Nach der Erfassung der Ist-Situation wird die Matrix erweitert und für jeden Indikator ein Ziel-Level sowie ein Faktor von eins bis fünf, mit dem die Unternehmen die individuelle Wichtigkeit dieses Indikators angeben können, bestimmt. Des Weiteren werden die Ergebnisse, also die Ist- und Ziel-Reifegrade, in einem Netzdiagramm visualisiert. Hierbei wird gemäß der vier Dimensionen differenziert, wobei die Technologie-Dimension nachträglich in daten- und prozessgetriebene Technologien aufgeteilt

wird. Die Diagramme sowie die unternehmensindividuelle Gewichtung der Indikatoren erlauben in Kombination abschließend das Einordnen der Transformationsschritte und -maßnahmen in eine Rangliste und damit das Erstellen einer Roadmap.

Schumacher et al. (2016) haben ein Industrie 4.0-Reifegradmodell entwickelt, das sich an Industriebetriebe, die selbst und mit eigenen Maschinen physische Güter herstellen und ferner definierte Kundengruppen sowie eindeutige Strukturen besitzen, richtet. Sie definieren die neun Dimensionen „Strategy“, „Leadership“, „Customers“, „Products“, „Operations“, „Culture“, „People“, „Governance“ und „Technology“, die insgesamt 62 Indikatoren, genannt Items, beinhalten, wovon jedoch nur knapp die Hälfte veröffentlicht ist. In Quelle [95] (Schumacher et al. 2019, S. 411 f.) greifen die Autoren ihr Reifegradmodell erneut auf und benutzen es als Basis für ein Industrie 4.0-Roadmapping. Hierbei werden die Dimensionen allerdings teilweise neu strukturiert, die Items werden entsprechend anders zugeordnet und es sind nun 65 Items. Daher lassen sich die Items zwischen den beiden Publikationen nicht übertragen. Die fünf definierten Reifegradstufen folgen einer Likert-Skala, eine Reifegrad-Kennwert-Matrix ist jedoch nicht bestimmt. Stattdessen steht das „Level 1“ allgemein für eine vollständige Abwesenheit der durch ein Item beschriebenen Fähigkeit(en) oder Technologie(n) und das „Level 5“ im Umkehrschluss für eine state-of-the-art Umsetzung. Die Autoren geben für jedes Item einen gewichtenden Faktor vor, der in die Berechnung des Gesamtreifegrades einer Dimension einfließt. Die Ergebnisse werden sowohl für jede Dimension (mitsamt ihrer Items) einzeln als auch für die neun Dimensionen im Gesamten in Form eines Netzdiagramms visualisiert.

Trotta, Garengo (2019) haben sich der Entwicklung eines für KMU geeigneten Industrie 4.0-Reifegradmodells verschrieben. Sie merken an, dass bestehende Modelle einerseits meist zu kompliziert und umfangreich sind, andererseits aber auch kulturelle Aspekte, wie die Rolle der Mitarbeiter, oft völlig vernachlässigen und sich allein auf technologische Faktoren beschränken. Daher folgt ihr Modell der Maxime „weniger ist mehr“ (Trotta, Garengo 2019, S. 73) und umfasst die fünf Dimensionen „Strategy“, „Technology“, „Production“, „Products“ und „People“. Die Autoren definieren keine klassischen Indikatoren, sondern formulieren diese als Frage (genannt „Items“), da sie die Umfrage-Methode als am besten geeignete Erhebungsmethode erachten. So lautet ein Item der Strategie-Dimension beispielsweise: „Haben Sie eine Strategie zur Einführung von Industrie 4.0?“. In der Publikation werden insgesamt elf solcher Fragen aufgeführt, ob diese Liste abschließend ist oder nur einen Auszug darstellt, ist nicht eindeutig ersichtlich. Die Reifegrade des Modells entstammen einer Likert-Skala und reichen von „nicht implementiert/vorhanden“ bis „vollständig implementiert/vorhanden“. Eine Reifegrad-Kennwert-Matrix ist nicht definiert.

Auch die von Landwehr-Zloch, Eichfelder (2019) entworfene „Checkliste zur Eigenbewertung der Industrie 4.0-Readiness“ ist speziell für die Anwendung in KMU angedacht. Sie soll „Digitalisierungseinsteigern (vor allem im produzierenden Gewerbe) eine erste Orientierungshilfe

über die erforderlichen Voraussetzungen für die digitale Transformation ihrer Produktion [...] geben“ (Landwehr-Zloch, Eichfelder 2019, S. 74). Hierfür definieren die Autoren sieben Dimensionen (genannt „Handlungsfelder“) der Digitalisierung:

- Kommunikationsnetzwerke
- Maschinen, Anlagen und Produkte
- Fahrerlose Transportsysteme (FTS)
- Mensch-Maschine-Interaktion/Mitarbeiter
- Erhebung, Verarbeitung und Schutz von Daten
- IT-Security
- Management

Diese sind wiederum in jeweils ein bis vier Indikatoren (genannt „Anforderungen“) unterteilt. Die insgesamt 19 Anforderungen können im Rahmen eines Selbstchecks auf den vier Reifegraden „trifft völlig/eher/wenig/nicht zu“ eingestuft werden. Diese qualitative Bewertung kann ebenso quantitativ in Form einer Punktzahl ausgedrückt werden, wobei den vier Reifegraden die ganzzahligen Werte von null bis drei zugeordnet werden und die Bewertung der einzelnen Anforderungen ohne eine Gewichtung aufsummiert wird. Die vollständige Checkliste befindet sich in Anhang G1, wobei hier entgegen der zu Beginn der Publikation eingeführten Systematik die beiden Handlungsfelder „FTS“ und „Maschinen, Anlagen und Produkte“ zusammengefasst wurden.

Leineweber et al. (2018) haben es sich zum Ziel gesetzt, ein Reifegradmodell zu entwickeln, das Unternehmen, insbesondere KMU, auf ihrem Weg hin zur Industrie 4.0-Implementierung unterstützt und dessen Anwendung dabei kein Mitwirken externer Berater erfordert. Ihr Modell fokussiert sich auf die Produktionsebene des Betriebs und unterscheidet die drei Dimensionen „Technology“, „Organization“ und „Personnel“, denen insgesamt 44 Indikatoren, sogenannte „Criteria“, zugeteilt sind. Allerdings sind nur neun dieser Indikatoren publiziert. Die Autoren definieren keine starre Anzahl Reifegrade, sondern legen für jeden Indikator einen individuellen Entwicklungspfad bestehend aus drei bis acht sogenannter Charakteristika fest. Des Weiteren geben sie für jeden Indikator Beziehungen zu und Abhängigkeiten von anderen Indikatoren an. Während Beziehungen lediglich auf einen schwachen Zusammenhang zweier Indikatoren hinweisen, bedeutet eine (einseitige) Abhängigkeit zweier Charakteristika, dass eines nicht erreicht werden kann, ohne dass das andere zuvor erfüllt wurde. In Abbildung 3-4 ist dieses Konzept beispielhaft für den Indikator „Maintenance“ abgebildet. Links im Bild ist der Indikator mitsamt seiner fünf Charakteristika und Beziehungen dargestellt und rechts die durch den weißen Pfeil ausgedrückte Abhängigkeit dieses Indikators vom Indikator „Machine Data Acquisition“.

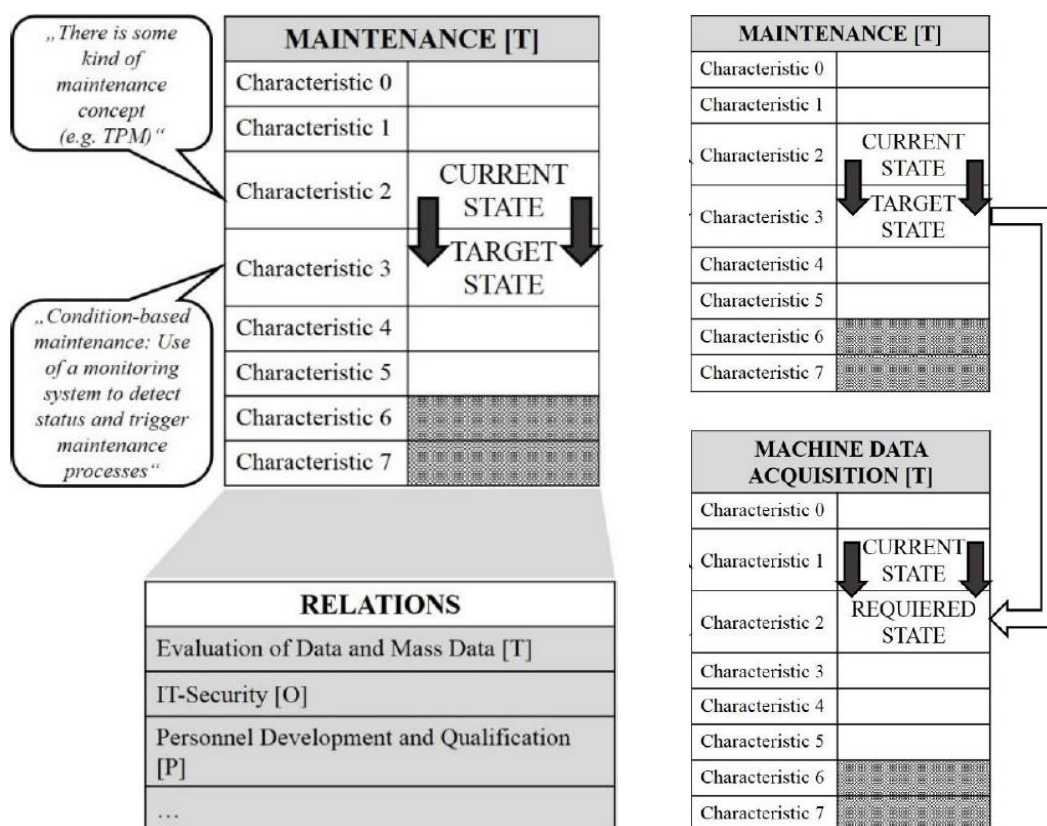


Abbildung 3-4: Der Indikator „Maintenance“ der Quelle [32] (Leineweber et al. 2018, S. 407 f.)

Bibby, Dehe (2018) haben ein Industrie 4.0-Reifegradmodell entworfen, das in Großunternehmen aus dem Verteidigungssektors angewendet und erprobt wurde, aber auch allgemein nutzbar sein soll. Es besteht aus den drei Dimensionen „Factory of Future“, „People and Culture“ und „Strategy“, denen insgesamt 13 Indikatoren, genannt „Attributes“, zugehörig sind. Einige der Indikatoren teilen sich wiederum in zwei Sub-Indikatoren, genannt „Items“, auf. Die Reifegradermittlung erfolgt zunächst durch mehrere Experten im Unternehmen, die jedes der 23 Items auf einer Likert-Skala von eins bis fünf bewerten. Aus den Zahlenwerten der Einzelbewertungen wird anschließend ein Durchschnittswert für jedes Item gebildet und zu einem Gesamtindex ungewichtet aufsummiert. Anhand dieses Indizes wird das Unternehmen einem der vier Reifegrade „Minimal“, „Development“, „Defined“ und „Excellence“ zugeordnet.

Gökalp et al. (2017) verfolgen mit ihrem Industrie 4.0-Reifegradmodell einen ganzheitlichen Ansatz; es soll einen umfangreichen und vollständigen Leitfaden hinsichtlich der Industrie 4.0 darstellen und zugleich als Roadmap fungieren. Das Modell folgt der Systematik der „Software Process Improvement and Capability determination (SPICE)“ aus der ISO/IEC 15504 und definiert, wie in Abbildung 3-5 zu sehen ist, sechs Reifegrade (genannt „capability stages“) und fünf Dimensionen (genannt „aspects“). Den einzelnen Aspekten werden im Fließtext Technologien und Konzepte zugeschrieben, ob diese Beschreibung abschließend und vollständig ist wird jedoch nicht ersichtlich. Konkrete Indikatoren werden nicht aufgelistet. Weiterhin ordnen

die Autoren verschiedene Industrie 4.0-Aspekte den sechs Reifegraden in Form einer Roadmap zu, das Vorgehen hierbei ist jedoch ebenfalls nicht ersichtlich und der Umfang eher gering (siehe Anhang G2).

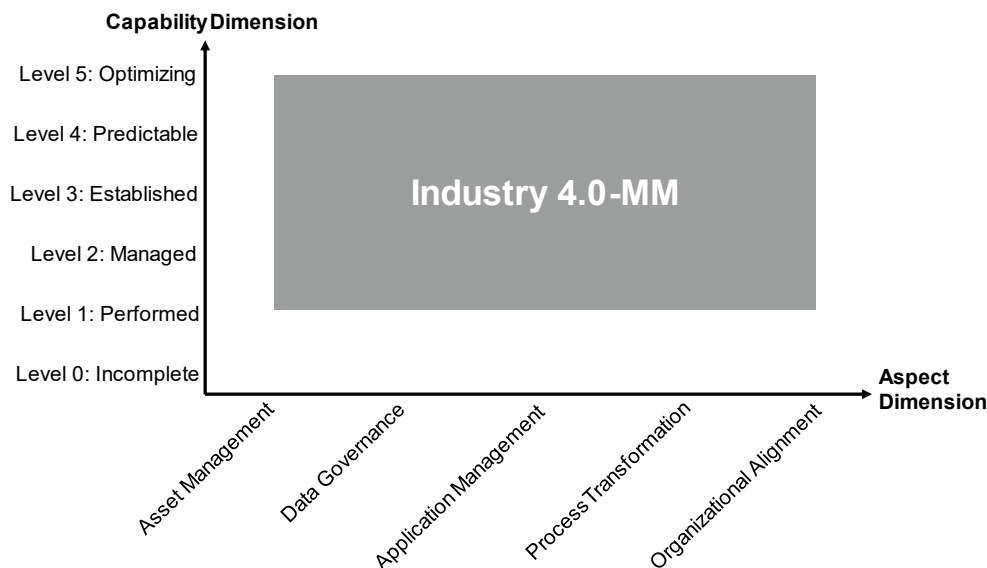


Abbildung 3-5: Struktur des Reifegradmodells [44] (in Anlehnung an Gökalp et al. 2017, S. 136)

Der vielzitierte „acatech Industrie 4.0 Maturity Index“ von Schuh et al. (2017) stellt unter den betrachteten Publikationen das umfangreichste Modell dar. Es werden zunächst sechs Reifegrade, die sogenannten Entwicklungsstufen, definiert, die ein Unternehmen auf dem Pfad der Industrie 4.0-Implementierung durchschreitet:

- Stufe 1: Computerisierung
- Stufe 2: Konnektivität
- Stufe 3: Sichtbarkeit („Was passiert?“)
- Stufe 4: Transparenz („Warum passiert es?“)
- Stufe 5: Prognosefähigkeit („Was wird passieren?“)
- Stufe 6: Adaptierbarkeit („Wie kann autonom reagiert werden?“)

Den Ausgangspunkt des Modellaufbaus, der in Abbildung 3-6 dargestellt ist, bildet der „Ordnungsrahmen Produktion und Management“, der innerbetriebliche Fragestellungen grundsätzlich in die drei Elemente Unternehmensstruktur, -prozesse und -entwicklung unterteilt (Schuh et al. 2017, S. 18). Innerhalb der Unternehmensstruktur werden die Konzepte und Technologien der Industrie 4.0 strukturiert dargestellt, indem zunächst die vier Gestaltungsfelder Ressourcen, Informationssysteme, Organisationsstruktur und Kultur definiert werden. Die Gestaltungsfelder, die als Dimensionen aufgefasst werden können, unterteilen sich wiederum jeweils in zwei Sub-Dimensionen, die sogenannten Prinzipien. Den acht Prinzipien sind jeweils zwei bis sechs, insgesamt 31, als Fähigkeiten bezeichnete Indikatoren zugeordnet. Auf Ebene der Unternehmensprozesse unterscheidet das Modell die fünf betrieblichen Funktionsbereiche

Entwicklung, Produktion, Logistik, Service sowie Marketing und Vertrieb. Die praktische Anwendung des acatech Industrie 4.0 Maturity Index spiegelt das Element der Unternehmensentwicklung wider und erfolgt mit der Unterstützung von Experten der Promotorengruppe im Unternehmen.

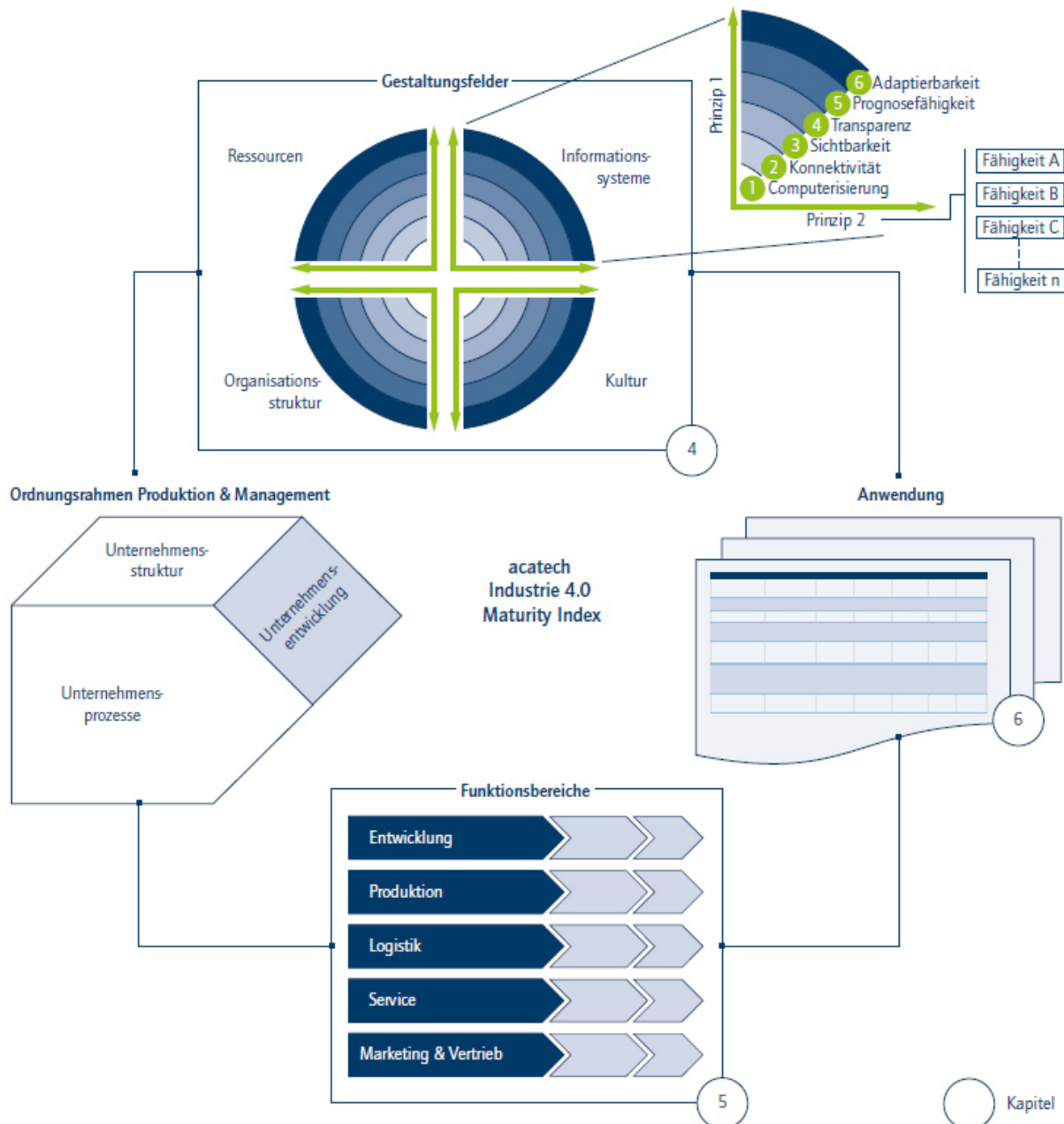


Abbildung 3-6: Modellaufbau des acatech Industrie 4.0 Maturity Index (Schuh et al. 2017, S. 19)

Die Bestimmung des Ist-Reifegrades erfolgt mit Hilfe eines Fragebogens, dem die 31 Fähigkeiten zugrunde liegen. Die Antworten basieren auf den sechs genannten Entwicklungsstufen, wobei für die einzelnen Fähigkeiten nicht immer jede Stufe definiert ist, da Entwicklungsstufen teilweise übersprungen werden können. Auf die Reifegradbestimmung, die durch eine Aggregation der Einzelreifegrade der Fähigkeiten eines Gestaltungsprinzips abgeschlossen wird, folgt eine Soll-Bestimmung und eine entsprechende GAP-Analyse. Hierbei wird zunächst eine

Verstetigung des Reifegrades zwischen den vier Gestaltungsfeldern und anschließend eine Erhöhung im Gesamten angestrebt. Abgeschlossen wird die Anwendung des Modells, indem konkrete Einzelmaßnahmen zur Erreichung des Soll-Reifegrades abgeleitet und in eine Aufwand-Nutzen-Matrix eingeordnet werden.

Ein weiteres vielzitiertes Industrie 4.0-Reifegradmodell stammt von Lichtblau et al. (2015) und wird in Anlehnung an die IMPULS-Stiftung, die dieses Forschungsvorhaben gefördert hat, meist als IMPULS-Modell bezeichnet. Das Modell richtet sich an deutsche Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus und umfasst folgende sechs Dimensionen der Industrie 4.0:

- Strategie und Organisation
- Smart Factory
- Smart Operations
- Smart Products
- Data-driven Services
- Mitarbeiter

Den Dimensionen sind insgesamt 18 Indikatoren, sogenannte Themenfelder, zugeordnet und es sind die sechs Reifegrade Außenstehender (0), Anfänger (1), Fortgeschrittener (2), Erfahrender (3), Experte (4) und Exzellenz (5) definiert. Die Ausprägungen der Industrie 4.0 Konzepte und Technologien auf den einzelnen Reifegradstufen sind innerhalb der Publikation nicht für jedes Themenfeld, sondern nur für jede Dimension im Ganzen stichpunktartig beschrieben (siehe Anhang G3). Im Rahmen der Reifegradermittlung, die durch die Experten der IMUPLS-Stiftung im Unternehmen erfolgt, wird allerdings jedes Themenfeld einzeln bewertet. Der Reifegrad einer Dimension wird stets durch den niedrigsten Reifegrad der zugehörigen Themenfelder bestimmt. Der Gesamtreifegrad eines Unternehmens ergibt sich aus dem gewichteten Mittelwert der sechs Dimensionsreifegrade, wobei die Gewichte im Rahmen der Modellevaluation von den befragten Unternehmen bestimmt wurden. Abschließend gibt das Modell dimensionsbezogene Handlungsempfehlungen zur Reifegradsteigerung, wofür die sechs Reifegradstufen zu den drei Unternehmenstypen Neulinge (0-1), Einsteiger (2-3) und Pioniere (3-5) zusammengefasst werden.

Akdil et al. (2018) schlagen ein Reifegradmodell vor, das aus den drei Dimensionen „Smart products and services“, „Smart business and processes“ und „Strategy and Organization“ besteht. Den Dimensionen sind zum einen insgesamt 13 Indikatoren (genannt „associated fields“) und zum anderen diverse „Principles“ und „Technologies“ zugeordnet. Die Prinzipien und Technologien wiederholen sich jedoch vielfach zwischen den Dimensionen und haben auf die Reifegradermittlung keinen direkten Einfluss, sind also eher als Anhaltspunkte zu verstehen. Im Modell existieren die vier Reifegradstufen „Absence (0)“, „Existence (1)“, „Survival (2)“ und „Maturity (3)“. Die eigentliche Reifegraderfassung erfolgt mit Hilfe eines Fragebogens,

wobei die Anzahl der Fragen je Dimension nicht an die Anzahl der zugehörigen Indikatoren gebunden ist. Auch die Antwortoptionen der geschlossenen Fragen sind in Art und Anzahl ebenfalls nicht direkt an die Reifegradstufen gebunden. Stattdessen werden den Antwortoptionen über Tabellen teils gebrochene Zahlenwerte zugeordnet, aus denen dann ein ungewichteter Mittelwert gebildet wird, der den Reifegrad der Dimension bestimmt. Visualisiert werden die Ergebnisse, also die drei Gesamtreifegrade der Dimensionen, in Form eines Netzdiagramms.

Das von Leyh et al. (2016b) entwickelte Reifegradmodell „SIMMI 4.0“ dient der „Einordnung [der] unternehmensweiten Anwendungssystemlandschaft in den Kontext Industrie 4.0“ (Leyh et al. 2016b, S. 981) und soll von Großunternehmen und KMU gleichermaßen genutzt werden können. Es werden vier Dimensionen definiert, die sich aus den Anforderungen, die im Rahmen der Digitalen Transformation an Anwendungssysteme gestellt werden, ergeben:

- Vertikale Integration
- Horizontale Integration
- Digitale Produktentstehung
- Querschnittstechnologien

Die Reifegradstufen werden gemäß einer Likert.-Skala von eins bis fünf definiert, wobei ein Unternehmen mit Erreichen der dritten Stufe bereits die Smarte Fabrik vollständig umgesetzt hat. Die beiden verbleibenden Stufen erfordern die Integration und Kollaboration des Unternehmens innerhalb seines Wertschöpfungsnetzwerks. Die vollständige Reifegrad-Kennwert-Matrix ist in Anhang G4 abgebildet.

Ganzarain, Errasti (2016) schlagen ein Reifegradmodell vor, das KMU einen Ordnungsrahmen zur Transformation und Diversifikation im Kontext von Industrie 4.0 bieten soll. Unternehmen sollen den drei Stufen „Vision“, „Enable (Roadmap)“ und „Enact (Projects)“ folgen und dabei die vier strategischen Märkte „Energy“, „Electronics“, „Digital Business“ und „Advanced metal mechanic“ beachten. Weiterhin werden fünf Reifegrade definiert und gemeinsam mit den drei genannten Stufen in eine Matrix eingeordnet. Der Inhalt dieser Matrix ist jedoch sehr generisch und beschreibt allgemeine Elemente eines betrieblichen Transformationsprozesses, ein konkreter Zusammenhang zu Aspekten der Industrie 4.0 lässt sich nur schwer erkennen. Daher wird dieses Modell nachträglich von der weiteren Betrachtung und der in Abschnitt 3.4 folgenden Analyse ausgeschlossen.

Geissbauer et al. (2016) haben für die Unternehmensberatung PricewaterhouseCoopers (PwC) ein Industrie 4.0-Reifegradmodell erstellt, das die sieben Dimensionen „Digital business models and customer access“, „Digitisation of product and service offerings“, „Digitisation and integration of vertical and horizontal value chains“, „Data and Analytics as core capability“, „Agile IT architecture“, „Compliance, security, legal and tax“ und „Organisation, employees and

digital culture“, denen keine Indikatoren zugeteilt sind, unterscheidet. Zudem definiert das Modell vier Stufen auf dem Weg zur Industrie 4.0: „Digital novice“, „Vertical integrator“, „Horizontal collaborator“ und „Digital champion“. Die zugehörige Reifegrad-Kennwert-Matrix ist in Anhang G5 dargestellt. Zur Reifegradermittlung steht den Unternehmen ein Online-Fragebogen zur Verfügung, der 33 dimensionsbezogene Fragen stellt, die jeweils auf einer Likert-Skala von eins bis fünf beantwortet werden können (Akdil et al. 2018, S. 65).

Das von der Firma Rockwell Automation (2014) publizierte „Connected Enterprise Maturity Model“ definiert die vier technologiebezogenen Dimensionen „information infrastructure, including hardware and software“, „controls and devices (sensors, actuators, motor controls, switches, etc.), which feed and receive data“, „networks that facilitate the exchange of all information“ und „security policies“. Statt klassischer Reifegrade findet sich in diesem Modell eher ein Aktionsplan bestehend aus den fünf Stufen „Assessment (1)“, „Secure and upgraded network and controls (2)“, „Defined and organized working data capital (3)“, „Analytics (4)“ und „Collaboration (5)“. Das Reifegradmodell umfasst weder Indikatoren noch eine Reifegrad-Kennwert-Matrix oder ein Fragenkatalog und wird seinem Namen daher nur bedingt gerecht. Es besitzt keinerlei Schnittmenge mit den bisher betrachteten Modellen und erscheint insbesondere aufgrund der Reifegradstufen, die eigentlich keine solchen sind, für eine Einschätzung der Unternehmenssituation im Kontext von Industrie 4.0 völlig ungeeignet. Daher wird es ebenso wie das Modell von Ganzarain, Errasti (2016) nachträglich ausgeschlossen.

Im Gegensatz dazu betitelt Anderl (2015) seinen „Leitfaden Industrie 4.0“ nicht als Reifegradmodell, er weist aber die typischen Merkmale eines solchen auf und wird auch innerhalb anderer Publikationen als Reifegradmodell anerkannt. Der Leitfaden verfolgt das Ziel, mittelständischen deutschen Maschinen- und Anlagenbauern als Orientierungshilfe und Werkzeug zur Entwicklung und Umsetzung eines Industrie 4.0-Geschäftsmodells zu dienen (Anderl 2015, S. 6). Hierfür entwickelten die Autoren einen Werkzeugkasten, der die zwei Bereiche Produkte und Produktion, denen jeweils sechs Anwendungsebenen zugeteilt sind, unterscheidet. Für jede Anwendungsebene ist ein fünfstufiger Prozess hin zur vollständigen Umsetzung der Industrie 4.0 definiert und mit Piktogrammen visualisiert. Die zwei Bereiche können als Dimensionen, die zwölf Anwendungsebenen als Indikatoren und die fünf Prozessstufen als Reifegrade interpretiert werden. Insgesamt repräsentiert der Werkzeugkasten, der in Anhang G6 abgebildet ist, folglich eine Reifegrad-Kennwert-Matrix.

De Carolis et al. (2017) entwickelten das „Digital REadiness Assessment Maturity model (DREAMY)“, das für ein möglichst breites Spektrum an produzierenden Unternehmen anwendbar und daher modular anpassbar sein soll. Hierfür unterteilen die Autoren die Unternehmensprozesse in die fünf Felder „Design and Engineering“, „Production Management“, „Quality Management“, „Maintenance Management“ und „Logistics Management“. Zudem umfasst das Modell die fünf Reifegradstufen „Initial“, „Managed“, „Defined“, „Integrated and Interoperable“

und „Digital-oriented“ sowie die vier Analyse-Dimensionen „[Manufacturing] Process“, „Monitoring and Control“, „Technology“ und „Organization“. Die Reifegradermittlung erfolgt mit Hilfe eines Fragenkatalogs, wobei die Fragen geschlossen sind und entsprechend der Reifegradstufen je fünf Antwortoptionen anbieten. Der Katalog ist modular aufgebaut, wobei für jede Kombination aus Analyse-Dimension und Unternehmensprozess ein definierter Fragensatz existiert. Gibt ein betrachtetes Unternehmen an, dass ein oder mehrere Prozesse für sie nicht relevant sind, wird dieser Bereich entsprechend von der Reifegradermittlung ausgenommen.

Jodlbauer, Schagerls (2016, S. 1473) „Reifegradmodell Industrie 4.0 ist ein strategiegeleitetes Vorgehensmodell für Unternehmen“, das von den drei Dimensionen Daten, Intelligenz und Digitale Transformation aufgespannt wird. Die Dimensionen sind voneinander abhängig und in der genannten Reihenfolge aufeinander aufbauend. Sie werden in insgesamt sieben Kriterien und diese wiederum teilweise in Sub-Kriterien unterteilt, sodass sich auf der niedrigsten Betrachtungsebene 25 (Sub-)Kriterien befinden. Der Reifegrad je Kriterium beziehungsweise Dimension wird auf einer Skala von 0 bis 10 angegeben. Die eigentliche Reifegradermittlung erfolgt durch externe Experten im Unternehmen im Rahmen eines Workshops und stellt einen vielschrittigen Prozess dar. Zunächst werden sogenannte Applikationsfelder des Unternehmens, zum Beispiel der Fertigungsbereich, denen besonderes Potenzial innewohnt, definiert. Für die Applikationsfelder werden anschließend sogenannte Träger definiert. Träger sind Prozesse, Aufgaben oder Dinge, die eindeutig einem (Sub-)Kriterium zugeordnet werden können, beispielsweise eine konkrete Maschine. Sie werden auf der genannten Skala bewertet, wobei Referenztabellen der (Sub-)Kriterien, die mit einer Reifegrad-Kennwert-Matrix vergleichbar sind, unterstützend eingesetzt werden. Im Anschluss werden unter Berücksichtigung der dem Unternehmen zur Verfügung stehenden Ressourcen Soll-Reifegrade für die Träger bestimmt und davon ausgehend Projektvorschläge erarbeitet.

Der von Häberer et al. (2017) entworfene „Industrie 4.0 Quick CheckUp“ ist eine, so die Autoren, speziell an die Bedürfnisse von KMU angepasste Modifikation des „Fraunhofer IFF Industrie 4.0 CheckUp“. Das Modell soll den gesamten Produktlebenszyklus abdecken und nutzt daher als Modelldimensionen die fünf Unternehmensbereiche Management, (Produkt-)Entwicklung, Produktion, Logistik und Service, denen insgesamt 17 Themenfelder zugeteilt sind. Die Reifegradskala beschreibt Schritte des technologischen Fortschritts und umfasst die fünf Stufen „standards (1)“, „big data (2)“, „smart data (3)“, „dark factory (4)“ und „industrial ecosystem (5)“. Die Reifegradermittlung erfolgt mit Hilfe eines Online-Tools zur Selbsteinschätzung, wobei die Unternehmen die Möglichkeit haben, die Dimensionen individuell zu gewichten. Im Ergebnis liefert das Modell eine quantitative Bewertung der Einzelreifegrade der Dimensionen sowie des Gesamtreifegrads und visualisiert dies in einem Netzdiagramm.

Die Dimensionen und Indikatoren aller beschriebenen Reifegradmodelle sind mit Ausnahme der beiden nachträglich ausgeschlossenen Publikationen in Anhang H1 zusammengefasst.

Hierbei werden den Dimensionen zudem Kennnummern entsprechend ihrer Publikationskennung und einer laufenden Nummer zugeteilt, um spätere Analysen zu vereinfachen. In Anhang H2 befindet sich weiterhin eine Übersicht über die Reifegradstufen der besagten 16 Modelle.

### **3.4 Analyse der Methoden hinsichtlich ihrer Gemeinsamkeiten und Unterschiede**

Nachdem die identifizierten 18 Publikationen allesamt beschrieben wurden, gilt es nun, diese zu analysieren, ihre Gemeinsamkeiten im Rahmen einer Synthese herauszuarbeiten und ebenso ihre Unterschiede darzustellen. Dabei werden, wie bereits in Abschnitt 3.3 erläutert, die Modelle von Ganzarain, Errasti (2016) und Rockwell Automation (2014) ausgeschlossen, sodass 16 zu analysierende Reifegradmodelle verbleiben.

Zunächst wird deutlich, dass sich alle vorgestellten Modelle auch tatsächlich mit der zu Beginn des Abschnitt 3.3 definierten Systematik eines Reifegradmodells beschreiben lassen, was jedoch nicht bedeutet, dass sie zwangsläufig alle genannten Merkmale aufweisen. Die grundsätzliche Übereinstimmung besteht dabei in der Definition von Reifegraden und Dimensionen, wobei drei Modelle diese zusätzlich in Sub-Dimensionen unterteilen. Auch ordnen die meisten Modelle ihren Dimensionen Indikatoren zur weiteren inhaltlichen Differenzierung zu; vier Modelle verzichten hierauf jedoch. Gravierende Unterschiede bestehen dagegen in der Art, dem Inhalt und dem Umfang der Dimensionen und Indikatoren. Dies kann unter anderem dadurch begründet werden, dass die Reifegradmodelle für unterschiedliche Zielgruppen und mit unterschiedlichem inhaltlichen Fokus entwickelt wurden.

In Tabelle 3-6 sind die Anzahl (Sub-)Dimensionen, Indikatoren und Reifegrade sowie der inhaltliche Fokus und die Zielgruppe der 16 Publikationen aufgeführt. Im Fall, dass eines der vier quantitativen Merkmale sich innerhalb einer Quelle verändert oder Interpretationsspielraum bei der Zuordnung besteht, wurde in Tabelle 3-6 der für die weitere Betrachtung nicht ausgewählte Wert in Klammern gesetzt.

Während zehn und damit knapp zwei Drittel der Modelle die Aspekte der Industrie 4.0 allgemein und im Gesamten betrachten, fokussieren sich vier Modelle auf technologische Aspekte und jeweils ein Modell auf die Industrie 4.0-Readiness der Anwendungssystemlandschaft eines Unternehmens respektive auf die Betrachtung der verschiedenen Unternehmensbereiche.

Acht der vorgestellten Reifegradmodelle verzichten vollständig auf eine Eingrenzung ihrer Zielgruppe oder nehmen diese nur sehr grob vor, indem sie an dieser Stelle produzierende Unternehmen im Allgemeinen nennen. Fünf Modelle geben hingegen an, explizit für die Anwendung in KMU ausgelegt zu sein. Zwei Modelle sind für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau und ein Modell explizit für große Unternehmen entworfen worden.

Tabelle 3-6: Übersicht über die Merkmale der Reifegradmodelle

| [Nr.] | Dim.  | Sub-Dim. | Indikatoren | Reifegrade | inhaltlicher Fokus   | Zielgruppe                     |
|-------|-------|----------|-------------|------------|----------------------|--------------------------------|
| [8]   | 5 (4) | (22)     | 42          | 5          | allgemein            | KMU                            |
| [9]   | 9     | -        | 62          | 5          | allgemein            | produzierende Unternehmen      |
| [17]  | 5     | -        | (11)        | 5          | allgemein            | KMU                            |
| [31]  | 6 (7) | -        | 19          | 4          | Technologie          | KMU                            |
| [32]  | 3     | -        | 44          | 8 (3)      | allgemein            | allgemein, insbesondere KMU    |
| [38]  | 3     | -        | 13 (23)     | 4          | allgemein            | Großunternehmen                |
| [44]  | 5     | -        | -           | 6          | allgemein            | produzierende Unternehmen      |
| [55]  | 4     | 8        | 31          | 6          | allgemein            | produzierende Unternehmen      |
| [61]  | 6     | -        | 18          | 6          | allgemein            | Maschinen- und Anlagenbau (DE) |
| [77]  | 3     | 5        | 13          | 4          | allgemein            | nicht definiert                |
| [100] | 4     | -        | -           | 5          | Anwendungssysteme    | produzierende Unternehmen      |
| [118] | 7     | -        | -           | 4          | allgemein            | nicht definiert                |
| [124] | 2     | -        | 12          | 5          | Technologie          | Maschinen- und Anlagenbau (DE) |
| [126] | 4     | -        | -           | 5          | Technologie          | produzierende Unternehmen      |
| [138] | 3     | -        | 25 (7)      | 10         | Technologie          | nicht definiert                |
| [151] | 5     | -        | 17          | 5          | Unternehmensbereiche | KMU                            |

Die Anzahl der Modelldimensionen variiert von zwei bis neun und liegt Mittel bei fünf. Bei den Indikatoren ist die Spannweite relativ betrachtet noch größer; hier sind es im Minimum elf, im Maximum 62 und im Mittel 29. Auch inhaltlich erscheinen die Dimensionen der unterschiedlichen Reifegradmodelle zunächst sehr heterogen. Um bestehende Gemeinsamkeiten aufzuzeigen, gilt es daher zunächst, die Dimensionen durch Gruppierung zu homogenisieren. Um einen Informationsverlust aufgrund einer zu oberflächlichen und undetaillierten Gruppierung zu vermeiden, werden dabei zunächst nur Dimensionen in Untergruppen zusammengefasst, deren Bezeichnungen identische oder sehr ähnliche Schlagwörter umfassen. Hierbei zeigt sich, dass lediglich sechs Dimensionsbezeichnungen grundsätzlich einzigartig sind und folglich nicht gruppiert werden können, für alle anderen Termini findet sich je mindestens ein Pendant. Dimensionen, die mehrere Schlagwörter in sich vereinen, werden mehrfach zugeteilt; die Dimension [61.1] „Strategie und Organisation“ wird so beispielsweise den beiden Untergruppen „Strategie“ und „Organisation“ zugeordnet. Im zweiten Schritt der Synthese werden die 18 ermittelten Dimensionsuntergruppen schließlich zu acht Gruppen beziehungsweise Themenfeldern zusammengefasst. Dieses Vorgehen ist in Tabelle 3-7 dargestellt, wobei die Dimensionen mittels der im Rahmen des vorherigen Abschnitts definierten Kennnummern referenziert werden.

Im Hinblick auf eine spätere Betrachtung während der Modellentwicklung in Kapitel 5 sei jedoch angemerkt, dass trotz der großen Schnittmengen hinsichtlich der Dimensionsbezeichnungen die inhaltliche Auslegung ebendieser zwischen den betrachteten Publikationen stark variiert. Dies gilt besonders für die eher vage und allgemein formulierten Dimensionen, was sich beispielhaft anhand der in insgesamt acht Quellen verwendeten Untergruppe „Organisation“ aufzeigen lässt. In Quelle [8] ist diese Dimension sehr weitreichend und umfasst neben Aspekten der Innovationskultur, der Roadmap-Bildung und der Organisation im Wertschöpfungsnetzwerk auch mehrere Indikatoren, die sich auf das Geschäftsmodell um das Produkt beziehungsweise den Kunden beziehen. Die Indikatoren „Kooperation im Netzwerk“ und „Ausrichtung am Kundennutzen“ finden sich auch in der Dimension „Organisationsstruktur“ des Reifegradmodells [55] wieder, der Fokus liegt hier jedoch auf Aspekten der internen Zusammenarbeit. Grundlegend verschieden ist die Auffassung des Terminus in Quelle [61]; hier werden innerhalb der Dimension „Strategie und Organisation“ lediglich die drei Indikatoren „Strategie“, „Investition“ und „Innovationsmanagement“ genannt.

Tabelle 3-7: Synthese der Modelldimensionen

| Synthese II                               | Synthese I                              | Dimensionen                                                           |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Produkte                                  | Produkte                                | [9.2], [17.4], [31.2], [61.4], [77.1], [118.2], [124.1]               |
|                                           | Produktentwicklung/Design               | [100.3], [151.2]                                                      |
| Produktion & Prozesse                     | Produktion                              | [17.3], [124.2], [151.3]                                              |
|                                           | Prozess                                 | [8.1], [9.5], [44.5], [61.3], [77.2], [126.1]                         |
|                                           | Smart Factory                           | [38.1], [61.2]                                                        |
| IT & Daten                                | Daten                                   | [31.4], [44.2], [61.5], [118.4], [138.1]                              |
|                                           | IT-Sicherheit/Schutz                    | [31.5], [118.6]                                                       |
|                                           | IT-Systeme/-Architektur                 | [44.3], [55.2], [118.5]                                               |
| Management, Führung & Organisation        | Führung/Management                      | [9.2], [31.6], [151.1]                                                |
|                                           | Organisation                            | [8.2], [32.2], [44.4], [55.3], [61.1], [77.3], [118.7], [126.4]       |
|                                           | Strategie                               | [9.1], [17.1], [38.3], [61.1], [77.3]                                 |
| Mitarbeiter & Kultur                      | Kultur                                  | [8.3], [9.6], [38.2], [55.4], [118.7]                                 |
|                                           | Mitarbeiter                             | [9.7], [17.5], [31.3], [32.3], [38.2], [61.6], [118.7]                |
| Geschäftsmodell, Services & Kollaboration | Integration (im Wertschöpfungsnetzwerk) | [100.1], [100.2], [118.3]                                             |
|                                           | Kunden                                  | [9.3], [118.1]                                                        |
|                                           | Services/Geschäftsmodell                | [61.5], [77.1], [118.2], [118.1], [151.5]                             |
| Rechtliches & Standards                   | Rechtliches/Standards                   | [9.8], [118.6]                                                        |
| Technologie                               | Technologie                             | [8.4], [8.5], [9.9], [17.2], [31.2], [32.1], [44.1], [100.4], [126.3] |
| Nicht zugeordnet                          | Nicht zugeordnet                        | [31.1], [55.1], [126.2], [138.2], [138.3], [151.4]                    |

Die Anzahl der in den betrachteten Modellen definierten Reifegradstufen liegt im Minimum bei vier und im Maximum bei zehn. Von sieben Publikationen und damit am häufigsten verwendet

werden fünf Reifegrade, was zugleich den Mittelwert der Betrachtung darstellt. Inhaltlich lassen sich hier drei Kategorien unterscheiden. Die Modelle [9], [17] und [31] folgen bei der Formulierung der Reifegrade dem Prinzip einer klassischen Likert-Skala und benennen deren Abstufungen im Stil von „trifft (nicht/eher/voll) zu“. Konkreter werden die Modelle [38], [44], [61], [77] und [126]; ihre Reifegradstufen tragen Bezeichnungen, die (allgemein) einen Entwicklungsprozess ausdrücken, wie beispielsweise den vom „Außenstehenden“ bis hin zur „Exzellenz“ (Modell [77]). An konkreten technologischen Schritten orientieren sich die Modelle [55], [100], [118] und [151]. So erfolgt die Reifegradbestimmung im Modell [55] beispielsweise mittels sechs festgelegter Entwicklungsstufen der Digitalisierung, von „Computerisierung“ bis „Adaptierbarkeit“. Die verbleibenden vier Modelle definieren zwar eine Anzahl Reifegradstufen, benennen diese jedoch nicht. Zehn Modelle beginnen die Zählweise der Reifegrade bei Eins, halb so viele starten dagegen bei Null.

Eine Reifegrad-Kennwert-Matrix im engeren oder weiteren Sinne findet sich in genau der Hälfte der Reifegradmodelle wieder, wovon jedoch nur drei Stück die Matrix vollständig publiziert haben. Die Möglichkeit zur direkten quantitativen Gewichtung der Modellfaktoren bieten vier Modelle., wobei die die Gewichte von jeweils zwei Modellen fest vorgegeben sind respektive durch das Unternehmen selbst festgelegt werden. Die Erhebung des Ist-Zustands des Unternehmens erfolgt in den meisten Modellen mit Hilfe eines Fragebogens (beziehungsweise einer Checkliste), dessen Antwortoptionen sich an den definierten Reifegradstufen ausrichten, wodurch grundsätzlich eine Selbsteinschätzung durch das Unternehmen möglich wird. Die Autoren der Publikationen [55], [61] und [138] weisen hingegen eine explizite Anwendung ihres Modells durch externe Berater im Unternehmen aus. Grundsätzliche Übereinstimmung herrscht bei der Visualisierung der Ergebnisse der Reifegradermittlung; sofern diese überhaupt erfolgt wird hierfür stets ein Netzdiagramm verwendet.

Darüber hinaus identifizierte Besonderheiten weisen die Modelle [8] und [55] auf, die aus dem Soll-Ist-Reifegradvergleich nicht nur konkrete Handlungsempfehlungen ableiten, sondern diese darüber hinaus auch priorisieren und in eine Strategie- beziehungsweise Aufwand-Nutzen-Matrix einordnen. Eine Berücksichtigung von oder Ausrichtung an den Bereichen eines Unternehmens erfolgt in den Modellen [55], [126] und [151], wobei jeweils fünf Bereiche festgelegt sind. Das Modell [32] ist das einzige, das Beziehungen und Abhängigkeiten der Modellindikatoren untereinander konkret ausweist.

### **3.5 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse**

Eine Zusammenfassende Darstellung der im vorherigen Abschnitt erfolgten Analyse der Reifegradmodelle befindet sich in Anhang H3. In diesem Abschnitt werden zudem die wichtigsten Erkenntnisse der Analyse übersichtlich visuell dargestellt.

Abbildung 3-7 stellt die Anzahl Dimensionen und Indikatoren der 16 Reifegradmodelle gegenüber, wobei zusätzlich der Mittelwert [M] dargestellt ist. In Abbildung 3-8 wird die Anzahl der innerhalb der Modelle verwendeten Reifegradstufen verglichen. Abbildung 3-9 zeigt abschließend, in wie vielen der 16 Reifegradmodelle sich die in Abschnitt 3.4 identifizierten Themenfelder wiederfinden. Hierfür wird auf Tabelle 3-7 zurückgegriffen, wobei ein Modell zu einem Themenfeld nie mehrfach hinzugezählt wird. Dem Themenfeld „Management, Führung & Organisation“ wird also beispielsweise das Modell [9], das mit den Dimensionen „Strategy“ und „Leadership“ zweifach vertreten ist, nur einmal hinzugerechnet.

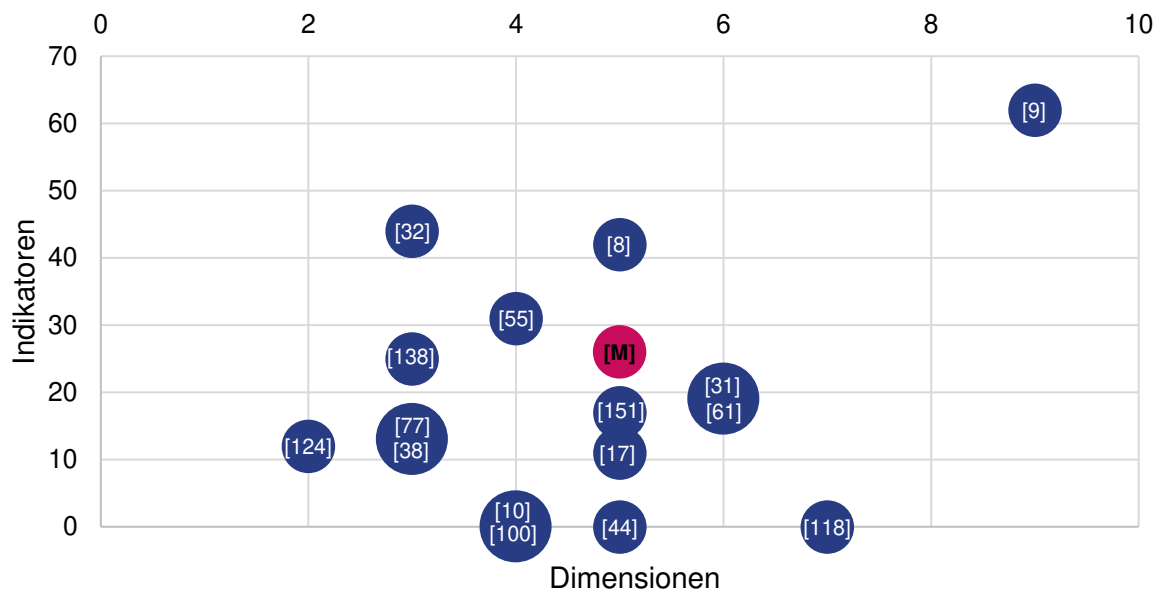


Abbildung 3-7: Anzahl Dimensionen und Indikatoren der Reifegradmodelle

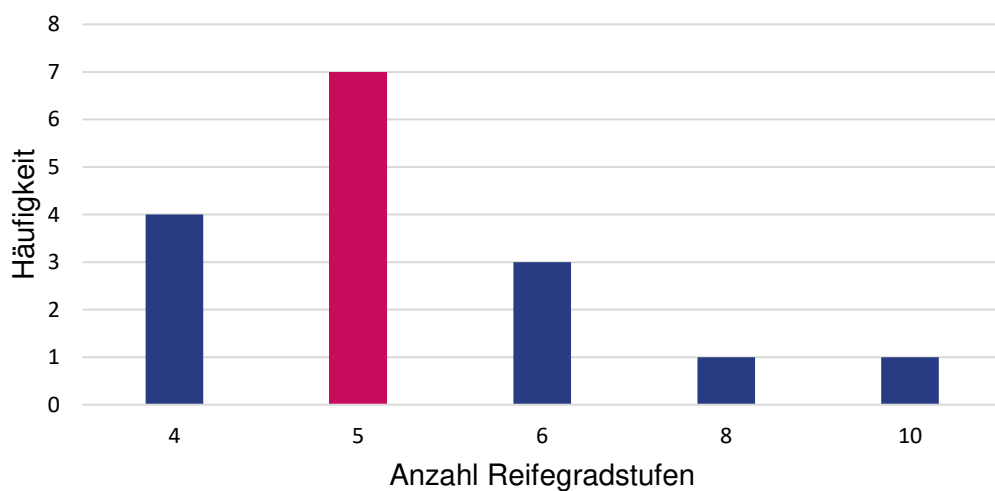


Abbildung 3-8: Anzahl der verwendeten Reifegradstufen

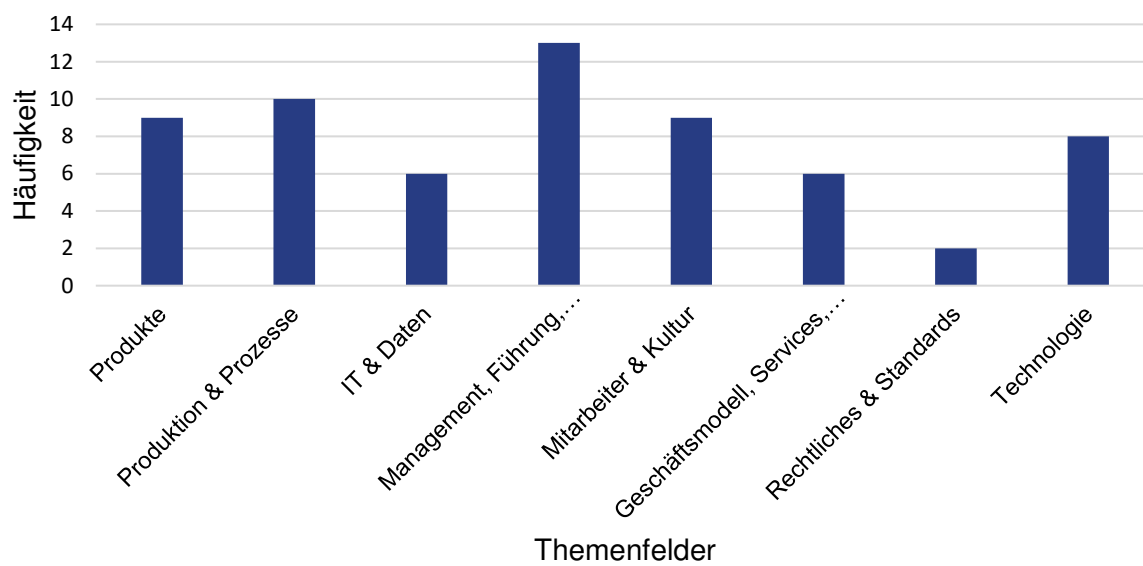


Abbildung 3-9: Häufigkeit der aufgezeigten Themenfelder

## **4 Bewertung bestehender Einschätzungsmethoden hinsichtlich ihrer Eignung für den Mittelstand**

Nachdem die 16 identifizierten Einschätzungsmethoden nun beschrieben und analysiert wurden, gilt es, sie hinsichtlich ihrer Eignung für die Anwendung in KMU zu untersuchen. Hierbei werden zunächst die Bewertungsmethode, -kriterien und -skala definiert, um anschließend eine systematische Bewertung vornehmen zu können. Aus der Bewertung werden abschließend Handlungsempfehlungen für die in Kapitel 5 erfolgende Entwicklung eines eigenen, KMU-spezifischen Industrie 4.0-Reifegradmodelles abgeleitet.

### **4.1 Auswahl einer geeigneten Bewertungsmethode**

Die Bewertung der vorgestellten Reifegradmodelle hinsichtlich ihrer Eignung im KMU-Kontext erfolgt mittels qualitativer Kriterien, die in Abschnitt 4.2 definiert werden. Hierfür kommen daher grundsätzlich die in Abschnitt 2.3.3 aufgeführten qualitativen Bewertungsmethoden in Frage.

Bei der Wahl der Bewertungsmethode ist es entscheidend, welches Ziel die Bewertung verfolgt. Die vorgestellten Methoden dienen allesamt der Auswahl beziehungsweise Priorisierung einer oder mehrerer Optionen durch Bilden eine Rangfolge. Im Rahmen dieser Arbeit ist jedoch nicht nur die Eignung eines Modells in seiner Gesamtheit von Interesse; es muss nicht zwangsläufig das beste respektive die besten Modelle identifiziert werden. Stattdessen soll ermittelt werden, inwiefern die Modell die definierten Anforderungen isoliert betrachtet erfüllen. Alle Modelle, die mindestens eine Anforderung erfüllen, können grundsätzlich für eine weitere Betrachtung relevant sein, auch wenn sie im Gesamten ungeeignet sein mögen. Die Teilaspekte der Modelle, die die zugehörige(n) Anforderung(en) erfüllen, zu abstrahieren und miteinander zu kombinieren ist der Kerngedanke der in Kapitel 5 erfolgenden Neuentwicklung eines KMU-spezifischen Industrie 4.0-Reifegradmodells.

Diese Zielstellung impliziert bezüglich der in dieser Arbeit anzuwendenden Bewertungsmethode, dass sowohl das Bilden einer Rangfolge als auch eine Gewichtung der Bewertungskriterien weder notwendig noch sinnvoll sind. Für letzteres spricht zudem, dass die neu entwickelte Einschätzungsmethode selbstverständlich alle an sie gestellten Anforderungen und nicht nur die als am wichtigsten definierten erfüllen soll. Auch zeigt sich, dass eine Bewertung der Modelle relativ zueinander nicht zielführend ist, da die etwaige Nutzung eines Modells in Kapitel 5 nur sinnvoll ist, wenn es ein Bewertungskriterium absolut (und nicht nur relativ) erfüllt. Der Paarvergleich wird entsprechend nicht verwendet. Stattdessen genügt zur Bewertung eine einfache Matrix, in der die Bewertungskriterien und zu bewertenden Modelle gegenübergestellt werden. Dieses Vorgehen entspricht einer Nutzwertanalyse ohne Gewichtung der Kriterien und ohne Bilden eines quantitativen Gesamtergebnisses beziehungsweise einer Rangfolge.

## 4.2 Bewertungskriterien

Die Reifegradmodelle aus der Literatur sollen hinsichtlich ihrer Eignung für KMU bewertet werden. Dementsprechend ergeben sich die Bewertungskriterien aus den in Abschnitt 2.2.3 definierten Eigenschaften mittelständischer Unternehmen.

Beachtet werden müssen hierbei zunächst die knappen finanziellen und personellen Ressourcen von KMU. Während jedes vierte deutsche Industrieunternehmen bereits Industrie 4.0-Anwendungen, von integrierten Sensoren über 3D-Druck bis Big Data, nutzt, haben KMU oft noch mit dem Wandel vom analogen ins digitale Zeitalter zu kämpfen (Wiesner et al. 2018, S. 83). Einen speziell für Digitalisierungsprozesse zuständigen Mitarbeiter oder eine IT-Abteilung, wie sie in Großunternehmen existiert, ist bei KMU selten vorhanden. Daher sind Digitalisierungselemente der Industrie 3.0, die Grundvoraussetzungen für die Einführung von Industrie 4.0 darstellen, in KMU oft noch nicht gegeben (Mittal et al. 2018, S. 209 f.). Beispiele solcher Elemente sind ein ERP-System, konnektivitätsfähige Maschinen und ein flächendeckender Internetzugang mit ausreichender Bandbreite in allen Unternehmensbereichen. Deshalb ist eine zentrale Anforderung an ein in KMU einsetzbares Industrie 4.0-Reifegradmodell, dass es eine „echte“ Reifegradstufe Null enthält, welche die vollständige technologische Umsetzung der Industrie 3.0 noch nicht voraussetzt.

Aus der technologischen Rückschrittlichkeit und dem allgemein geringeren Bewusstsein und Verständnis für die Konzepte und Technologien der Industrie 4.0 folgt weiterhin, dass das Modell grundsätzlich auch ohne weitreichende Industrie 4.0-Kenntnisse anwendbar sein soll. Es soll übersichtlich, einfach und verständlich gestaltet sein und somit auch Mitarbeitern, die weniger spezialisiert und weniger stark mit der Digitalen Transformation vertraut sind, die grundsätzlichen Ideen der Industrie 4.0 aufzeigen. Kurzgefasst soll das Reifegradmodell bestehende Unsicherheiten aufklären anstatt neue zu schaffen (Wiesner et al. 2018, S. 83). Neben der inhaltlichen Gestaltung kann hier beispielsweise auch eine übersichtliche, ansprechende Visualisierung der Modellelemente sowie der Ergebnisse der Reifegradermittlung hilfreich sein.

Einfachheit und Verständlichkeit bedeutet hierbei jedoch nicht, dass das Modell in seinem Umfang stark begrenzt sein soll; vielmehr ist das Gegenteil der Fall. Aus den geschilderten Unsicherheiten hinsichtlich der Aspekte der Industrie 4.0 resultiert auch, dass KMU oft Probleme haben, konkrete Handlungsfelder und Maßnahmen zur Steigerung des Digitalisierungsgrades zu identifizieren (ebd.). Daher ist es wichtig, dass das Reifegradmodell die Möglichkeiten der Industrie 4.0 und die dazugehörigen Transformationsschritte verdeutlicht. Wenn klar aufgezeigt wird, wie die Digitale Transformation sukzessive vollzogen werden kann, indem den im Modell definierten Themenfeldern konkrete Entwicklungsstufen zugeordnet werden, können

Mitarbeiter in KMU leichter einen Überblick über ihre derzeitige Situation und bestehende Potenziale gewinnen. Zudem können somit direkt konkrete Defizite ermittelt und entsprechende Handlungsempfehlungen im Sinne einer Roadmap abgeleitet werden.

Das Reifegradmodell soll jedoch nicht nur Klarheit bezüglich der technologischen Potenziale und Anforderungen schaffen. Wie in Abschnitt 2.2.3 erläutert, weisen Management und Personal von KMU oftmals Besonderheiten gegenüber Großunternehmen auf. Das Management hat meist einen technischen Hintergrund und ist daher weniger vertraut mit Methoden der strategischen Planung. Entscheidungen werden oft durch Intuition und Improvisation und nicht datenbasiert getroffen. Erfolgreiche Industrie 4.0-Projekte erfordern allerdings ebenjene Weitsicht und das Vorhandensein einer konkreten Umsetzungsstrategie und Vision. Ebenfalls wurde festgestellt, dass in KMU Gruppenarbeit nur selten angewendet wird, neue Formen der internen Kollaboration sind aber integraler Bestandteil der Industrie 4.0. Auch werden in der Smart Factory vor allem stark spezialisierte Mitarbeiter benötigt; die notwendigen Schulungsangebote existieren in KMU jedoch nur selten. All diese Beispiele zeigen, dass insbesondere in KMU zur erfolgreichen Umsetzung der Industrie 4.0 nicht allein technologische, sondern auch organisationale und kulturelle Veränderungen erfolgen müssen. Folglich darf ein für KMU geeignetes Reifegradmodell diese Aspekte nicht außer Acht lassen.

Zusammenfassend werden somit vier Kriterien zur Bewertung der 16 Reifegradmodelle aus der Literatur hinsichtlich ihrer Eignung für KMU definiert:

- **„Level 0“:** Enthält das Modell eine „echte“ Reifegradstufe Null (unabhängig von der gewählten Nummerierung) oder setzt bereits die unterste Reifegradstufe Digitalisierungselemente, die in KMU nicht als selbstverständlich angenommen werden können, voraus?
- **„Einfachheit & Verständlichkeit“:** Ist das Modell auch ohne weitreichende Kenntnisse und externe Beratung einfach verständlich und übersichtlich?
- **„Transformationsschritte“:** Zeigt das Modell konkrete Möglichkeiten und Prozessschritte der Digitalen Transformation auf oder benennt es nur abstrakte Konzepte?
- **„Nicht-technologische Aspekte“:** Berücksichtigt das Modell auch die Aspekte der Industrie 4.0, die sich nicht auf technologische Innovationen, sondern auf Veränderungen der Unternehmensführung und -organisation sowie der Mitarbeiter beziehen?

### **4.3 Bewertungsskala**

In Abschnitt 4.1 wurde bereits eine Bewertungsmethode festgelegt, welche jedoch noch durch die Auswahl einer Bewertungsskala komplettiert werden muss. Grundsätzlich lassen sich hierbei nominale, ordinale und metrische Skalen unterscheiden. Nominale Skalen sind qualitativ

und werden eingesetzt, wenn sich die möglichen Ausprägungen der Variable gegenseitig ausschließen und nicht in eine sinnvolle Reihenfolge werden können. Ein Beispiel hierfür ist die Frage nach dem Geschlecht. Ordinale Skalen sind ebenfalls qualitativ und enthalten folglich Nominal-Informationen, jedoch besteht zwischen den Ausprägungen ihrer Variablen eine Rangordnung. Beispielhaft zu nennen ist hier die Skala zur Bewertung schulischer Leistungen, die von „sehr gut“ bis „ungenügend“ reicht. Metrische Skalen sind im Gegensatz dazu quantitativ, die Ausprägungen ihrer Variablen sind also von Natur aus reelle Zahlen. (Statista Lexikon 2020b)

Die im vorherigen Abschnitt definierten Bewertungskriterien sind qualitativ und können jeweils nicht nur vollständig, sondern auch in Teilen erfüllt werden. Daher kommt hier nur eine Ordinalskala in Frage. Für solch eine Bewertung des Erfüllungsgrades der Kriterien beziehungsweise Anforderungen eignet sich insbesondere die bereits Abschnitt 3.3 vorgestellte ordinale Likert-Skala. Für die hier durchzuführende Bewertung werden daher in Anlehnung an eine fünfstufige Likert-Skala folgende Variablenausprägungen definiert:

- „Kriterium nicht erfüllt“
- „Kriterium eher nicht erfüllt“
- „Kriterium teils/teils erfüllt“
- „Kriterium eher erfüllt“
- „Kriterium vollständig erfüllt“

#### **4.4 Bewertung der Methoden hinsichtlich ihrer Eignung für den Mittelstand**

Zur Bewertung werden die 16 Reifegradmodelle nacheinander betrachtet und dabei Aspekte, die für oder gegen das Erfüllen der Bewertungskriterien sprechen, herausgearbeitet. Diese Aspekte, anhand derer die Einstufung der Publikationen auf der beschriebenen Skala erfolgt, sind tabellarisch in Anhang I dargestellt. Jeder Quelle sind zwei Zeilen zugeteilt, wobei die obere Argumente erhält, die für die Erfüllung eines Kriteriums sprechen und die untere solche, die dagegensprechen.

In Tabelle 4-1 sind die Ergebnisse der Bewertung zusammenfassend dargestellt, wobei den fünf möglichen Ausprägungen stellvertretend Symbole, sogenannte Harvey-Balls, zugeordnet wurden, um die Übersichtlichkeit der Darstellung zu gewährleisten. Diese wurden zusätzlich farblich gekennzeichnet, um positiv oder negativ auffallende Modelle schnell identifizieren zu können.

Tabelle 4-1: Ergebnisse der Bewertung der Reifegradmodelle aus der Literatur

| [Nr.] | Level 0                                                                             | Einfachheit & Verständlichkeit                                                      | Transformations-schritte                                                             | Nicht-technologi-sche Aspekte                                                         |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| [8]   |    |    |    |    |
| [9]   |    |    |    |    |
| [17]  |    |    |    |    |
| [31]  |    |    |    |    |
| [32]  |    |    |    |    |
| [38]  |    |    |    |    |
| [44]  |    |    |    |    |
| [55]  |   |   |   |   |
| [61]  |  |  |  |  |
| [77]  |  |  |  |  |
| [100] |  |  |  |  |
| [118] |  |  |  |  |
| [124] |  |  |  |  |
| [126] |  |  |  |  |
| [138] |  |  |  |  |
| [151] |  |  |  |  |

| Legende                                                                             |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |  |
| Kriterium voll-ständig erfüllt                                                      | Kriterium eher erfüllt                                                              | Kriterium teils/teils erfüllt                                                       | Kriterium eher nicht erfüllt                                                          | Kriterium nicht erfüllt                                                               |

#### **4.5 Handlungsempfehlung**

Beim Blick auf die Bewertung fällt zunächst auf, dass keines der betrachteten Reifegradmodelle alle Kriterien in zufriedenstellendem Maße erfüllt. Gleichzeitig wird aber deutlich, dass mehrere Modelle Aspekte enthalten, die weitestgehend oder vollständig für eine Anwendung in KMU geeignet sind. Folglich ergibt sich als übergeordnete Handlungsempfehlung, bei der Entwicklung eines neuen, KMU-spezifischen Reifegradmodells auf die bestehenden Modelle zurückzugreifen. Hierbei müssen die positiv bewerteten Aspekte der Modelle abstrahiert und miteinander kombiniert werden.

Zur Definition geeigneter Reifegradstufen und zur Auslegung der Modelldimensionen beziehungsweise -indikatoren können die Modelle [55], [61] und [124] herangezogen werden. Für den grundsätzlichen Modellaufbau, der einfach, übersichtlich und verständlich gestaltet sein soll, können die Modelle [8], [61] und [124] als Orientierung dienen. Wie die Digitale Transformation in konkreten Umsetzungsschritten sukzessive vollzogen werden kann, wird nur in den Modellen [8] und [124] vollständig deutlich. Beide Modelle nutzen hierfür eine ausgeprägte Reifegrad-Kennwert-Matrix, weshalb diese als essenzielle Komponente des zu entwickelnden Reifegradmodells angesehen werden kann. Quelle [124] berücksichtigt hierbei jedoch nur technologische Aspekte und von der Matrix der Quelle [8], die auch nicht-technologische Aspekte umfangreich aufgreift, ist nur ein geringer Auszug publiziert. Es gilt daher, relevante nicht-technologische Aspekte der Industrie 4.0 herauszuarbeiten und in das Reifegradmodell zu implementieren. Anhaltspunkte hierfür liefern die Modelle [8], [9], [55] und [61].

## **5 Entwicklung einer KMU-spezifischen Einschätzungsmethode der Unternehmenssituation im Kontext von Industrie 4.0**

Mit der Recherche, Beschreibung, Analyse und Bewertung bestehender Industrie 4.0-Reifegradmodelle sind nun alle vorbereitenden Schritte erfüllt, um auf Grundlage der Literatur eine eigene KMU-spezifische Einschätzungsmethode der Unternehmenssituation im Kontext von Industrie 4.0 entwickeln zu können. Hierzu werden zunächst die Anforderungen an ebendiese Methode zusammengefasst und anschließend die Digitalisierungsstufen sowie die Methodik des Reifegradmodells erarbeitet. Die Vorstellung des Modells in Abschnitt 5.4 schließt dieses Kapitel ab.

### **5.1 Anforderungen an eine KMU-spezifische Einschätzungsmethode**

Die Anforderungen an das Reifegradmodell ergeben sich zwangsläufig aus den Bewertungskriterien, die unter Berücksichtigung der Eigenschaften mittelständischer Unternehmen bereits in Abschnitt 4.2 definiert und ausführlich erläutert wurden. Daher erfolgt in diesem Abschnitt eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse des Abschnitts 4.2. Diese wird durch konkrete Implikationen für das Reifegradmodell, die sich aus den Handlungsempfehlungen des Abschnitt 4.5 ergeben, ergänzt.

Die erste Anforderung an die Einschätzungsmethode betrifft ihre Digitalisierungsstufen. Aufgrund ihrer begrenzten finanziellen und personellen Ressourcen kann bei KMU nicht davon ausgegangen werden, dass sie bereits einen Digitalisierungsgrad erreicht haben, wie er in großen Unternehmen zumeist Standard ist. Folglich muss die niedrigste Reifegrad- beziehungsweise Digitalisierungsstufe des Modells so ausgelegt werden, dass weder eine beginnende Digitale Transformation im Sinne der Industrie 4.0 noch eine abgeschlossene Digitalisierung hinsichtlich der Technologien der Industrie 3.0 vorausgesetzt werden.

Weiterhin ist es wichtig, dass das Reifegradmodell auch ohne weitreichende Industrie 4.0-Kenntnisse anwendbar ist, da diese ebenfalls nicht vorausgesetzt werden können. Damit einher geht die Anforderung, die Technologien und Konzepte der Industrie 4.0 durch das Modell übersichtlich aufzuzeigen und verständlich zu erläutern. Hierfür ist es entscheidend, dass die zahlreichen Aspekte der Industrie 4.0 in sinnvolle und überschaubare Betrachtungseinheiten, also klar voneinander abzugrenzende Dimensionen und Indikatoren, gegliedert werden.

Weiterhin soll das Modell den zumeist praxisorientierten und strategisch langfristig denkenden KMU als Möglichkeit dienen, die Potenziale der Industrie 4.0 und eigene Defizite zu erkennen und daraus Handlungsbedarfe abzuleiten. Dies kann durch praxisnahe Indikatoren, für die je-

weils konkrete Transformationsschritte entlang der Digitalisierungsstufen des Modells aufgezeigt werden, erreicht werden. Zugleich kann so sichergestellt werden, dass KMU sich nicht vom Gesamtkonzept der Industrie 4.0 überfordert fühlen, sondern die für sie relevanten und finanziell umsetzbaren Teilaspekte im Sinne einer „Tailored Vision“ herausfiltern können (Mittal et al. 2018, S. 210). Anhand der Ergebnisse der Analyse bestehender Industrie 4.0-Reifegradmodelle wird schnell deutlich, dass eine ausgeprägte Reifegrad-Kennwert-Matrix hierfür ein wichtiges Hilfsmittel sein kann.

Aus der Forderung, das Modell solle Klarheit hinsichtlich aller Konzepte und Technologien der Industrie 4.0 schaffen und letzten Endes die Ableitbarkeit einer „Tailored Vision“ ermöglichen, ergibt sich zudem die Anforderung, dass im Modell eine ganzheitliche Betrachtung der Industrie 4.0 erfolgen muss. Aspekte der Digitalen Transformation, die die Unternehmensführung, Kultur und Mitarbeiter betreffen sind insbesondere in KMU von großer Relevanz. Ein patriarchalisch waltender Geschäftsführer, der nicht bereit ist, Entscheidungskompetenzen abzugeben und Mitarbeiter, die weder die nötigen Kompetenzen aufweisen noch bereit sind sich etwaigen Veränderungen anzunehmen, stehen der Digitalen Transformation maßgeblich im Wege und sind Beispiele für nicht-technologische Faktoren, die im Rahmen der Reifegradmessung unbedingt berücksichtigt werden müssen.

## **5.2 Definition geeigneter Digitalisierungsstufen**

Die Einführung und Umsetzung der Industrie 4.0 erfordert einen „wesentlichen Ausbau der digitalen Kompetenzen und Fähigkeiten“ (Schuh et al. 2017, S. 15) eines Unternehmens und impliziert weitreichende „Veränderungen [...] der Organisation“ (ebd.). Der komplexe und in der Regel mehrjährige Transformationsprozess kann nur schrittweise vollzogen werden. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, Entwicklungsstufen zu definieren, die dem Unternehmen aufzeigen, wie die Veränderungen sukzessive vollzogen werden können (ebd.). Diese Entwicklungs- respektive Digitalisierungsstufen bilden die Reifegrade des zu entwickelnden Modells. Bei der Definition dieser Reifegrade sind die Ergebnisse der Abschnitte 4.4 und 4.5 zu beachten, gemäß derer allein die Modelle [55], [61] und [124] die diesbezüglich gestellten Anforderung erfüllen. Der grundsätzliche Aufbau der Modell [8] und [124] wurde als im KMU-Kontext am besten geeignet bewertet und wird, das sei an dieser Stelle vorweggenommen, als Orientierung für das neu zu entwickelnde Reifegradmodell dienen. Wie auch allgemein das Gros der betrachteten Quellen definieren diese beiden Modelle fünf Reifegradstufen. Diese Anzahl ermöglicht die gewünschte Detaillierungstiefe des Modells und die Unterteilung konkreter Entwicklungsstufen, ohne dabei zu umfangreich zu werden. Eine konkrete Benennung und Definition dieser fünf Reifegradstufen fehlt in beiden genannten Reifegradmodellen. Daher werden die dargestellten Entwicklungsprozesse betrachtet, Inhalte abstrahiert und die folgenden fünf Reifegradstufen abgeleitet:

### **Level 0: Nicht-Existenz**

Das Unternehmen erfüllt noch keine Anforderungen der Industrie 4.0. Es werden weder die Potenziale der Digitalen Transformation erkannt noch stehen die notwendigen Ressourcen zur Verfügung. Die Produktionsprozesse werden nicht durch IT-Systeme unterstützt; Maschinen, Anlagen und Produkte sind nicht fähig, Daten zu erheben oder auszutauschen. Sekundäre Prozesse und der interne Informationsaustausch finden zumeist noch manuell statt. Es mangelt seitens Management und Mitarbeitern an (digitalen) Kompetenzen und Möglichkeiten, diese aufzubauen. Chancen, das eigene Geschäftsmodell zu transformieren, beispielsweise durch produktbezogene Services und unternehmensübergreifende Kollaboration, werden nicht genutzt.

### **Level 1: Beginner**

Das Unternehmen ist sich der Bedeutung und Potenziale der Digitalen Transformation bewusst und hat vornehmlich im Bereich der Produktion bereits erste Pilotinitiativen gestartet. Maschinen, Anlagen und Produkte sind mit Sensoren und einfachen Schnittstellen ausgestattet und können Daten erheben und speichern. Essenzielle IT-Systeme sind vorhanden, aber noch nicht integriert und die zugehörigen Fragen hinsichtlich Sicherheit und Datenhaltung werden nur sehr bedingt beantwortet. Sekundäre Prozesse werden durch IT-Systeme unterstützt und die interne, bereichsübergreifende Kommunikation wird zunehmend umfangreicher und systematischer. Das Geschäftsmodell basiert nicht mehr allein auf dem Verkauf physischer Produkte, sondern es werden vereinzelt produktbezogene Services und Beratung angeboten. Für weitere Transformationsschritte fehlen jedoch noch die notwendigen Kompetenzen. (Lichtblau et al. 2015, S. 22)

### **Level 2: Fortgeschrittener**

Das Unternehmen erkennt Industrie 4.0 als strategischen Erfolgsfaktor an, hat klare Ziele und stellt notwendige Ressourcen langfristig bereit. Daten werden nicht nur erhoben, sondern von den Maschinen, Anlagen und Produkten eigenständig (vor-)verarbeitet und an IT-Systeme weitergereicht. Diese sind untereinander vernetzt, tauschen Daten automatisch in Echtzeit aus und übernehmen ausgewählte Prozessschritte wie beispielsweise das Ermitteln, Bestellen und Verteilen von Materialbedarfen. Das Industrial Ethernet erhält Einzug in die Produktion und notwendige Sicherheitsrichtlinien und -maßnahmen werden umgesetzt. Nicht nur intern, sondern auch extern im Wertschöpfungsnetzwerk wird kommuniziert und kollaboriert. Produktbezogene Dienstleistungen und Services bilden relevante Umsatzanteile. Die Mitarbeiter haben durch Schulungen notwendige Kompetenzen aufgebaut. (Lichtblau et al. 2015, S. 23)

### **Level 3: Experte**

Die Industrie 4.0-Strategie des Unternehmens befindet sich längst in der Umsetzung und wird stetig überprüft. Daten werden nicht mehr nur erhoben und verarbeitet, sondern völlig autonom in Echtzeit ausgewertet und ausgetauscht. Fehler und Effizienzpotenziale innerhalb der Produktionsprozesse werden hierdurch automatisch erkannt und entsprechende Optimierungsmaßnahmen von Mitarbeitern ausgeführt. IT-Systeme unterstützen alle wesentlichen Fertigungsprozesse und sind innerhalb des Unternehmens vertikal integriert. IT-Sicherheit beruht nicht mehr auf Einzelmaßnahmen, sondern es existiert ein integriertes Sicherheitssystem. Der Verkauf produktbezogener Dienstleistungen und Services ist fester Bestandteil des Geschäftsmodells. Die Mitarbeiter sind weitreichend geschult, aktiv in Veränderungsprozesse eingebunden und untereinander flexibel organisiert. (Lichtblau et al. 2015, S. 24)

### **Level 4: Exzellenz**

Das Unternehmen hat seine Industrie 4.0-Strategie umgesetzt und prüft regelmäßig, ob neue Transformationspotenziale durch technologischen Fortschritt entstanden sind. Daten werden autonom erhoben und analysiert. Zusätzlich führen Maschinen, Anlagen und Produkte identifizierte Optimierungsmaßnahmen selbstständig aus. Alle Unternehmensbereiche werden durch vollumfängliche, horizontal und vertikal integrierte IT-Systeme unterstützt; Kommunikation ist systemimmanent. Maßnahmen zur IT- und Datensicherheit sind zu einem Gesamtsystem zusammengefasst und werden unternehmensweit umgesetzt. Nicht nur intern, sondern auch extern mit Partnern im gesamten Wertschöpfungsnetzwerk wird dank kompatibler Systeme völlig selbstverständlich kollaboriert. Produkte sind während ihres gesamten Lebenszyklus in die IT-Infrastruktur eingebunden und das Unternehmen entsprechend mit seinen Kunden vernetzt. (ebd.)

## **5.3 Entwicklung einer Methodik**

Die Definition der Digitalisierungsstufen gibt bereits einen ersten Überblick über die zentralen Inhalte der entwickelten Einschätzungsmethodik. Was jedoch an dieser Stelle noch fehlt, ist der allgemeine Modellaufbau und die Festlegung und Abgrenzung der von der Methodik umfassten Konzepte und Technologien der Industrie 4.0.

Auch hier wird auf die Ergebnisse der Literaturanalyse zurückgegriffen. In Abschnitt 4.4 wurde deutlich, dass der von Anderl (2015) (Quelle [124]) sowie Rauch et al. (2020) (Quelle [8]) gewählte Modellaufbau die diesbezüglich definierten Anforderungen vollumfänglich erfüllt. Beide Modelle bestehen grundsätzlich aus Dimensionen, die die Aspekte der Industrie 4.0 gliedern und Indikatoren, die die konkreten Konzepte und Technologien der einzelnen Dimensionen verdeutlichen. Für jeden Indikator wird ein fünfstufiger Entwicklungsprozess definiert, der den

Weg von der vollständigen Abwesenheit bis hin zur weitestmöglichen Erfüllung der durch die Industrie 4.0 an ihn gestellten Anforderung beschreibt. Hierfür werden den Indikatoren die fünf Reifegradstufen in Form einer Matrix gegenübergestellt. Dieser Aufbau soll auch in dieser Arbeit verfolgt werden. Dass dieser grundsätzliche Modellaufbau die Anforderungen an eine KMU-spezifische Einschätzungsmethodik erfüllt, bedeutet jedoch nicht, dass es das Modell im Gesamten tut. Insbesondere das von Anderl (2015) publizierte Reifegradmodell erfüllt die Anforderung, auch nicht-technologische Aspekte der Industrie 4.0 zu berücksichtigen, überhaupt nicht, da es sich nur mit den Themen „Produkte“ und „Produktion“ befasst. Das von Rauch et al. (2020) entwickelte Modell umfasst ein deutlich breiteres inhaltliches Spektrum, kann aber auch nur bedingt genutzt werden, da die definierte Matrix der Transformationsschritte nicht veröffentlicht vollständig ist. Zudem ist die Einteilung der Dimensionen und Indikatoren eher grob und dadurch weniger übersichtlich.

Zur Entwicklung einer KMU-spezifischen Einschätzungsmethode der Unternehmenssituation im Kontext von Industrie 4.0 wird daher auf den von Anderl (2015) verwendeten Modellaufbau zurückgegriffen. Es gilt ferner, alle relevanten Aspekte der Industrie 4.0 zu ermitteln, in übersichtliche und nachvollziehbare Dimensionen zu gliedern und gemäß der übernommenen Systematik abzubilden. Zur Ermittlung der Konzepte und Technologien werden neben den theoretischen Erkenntnissen des Abschnitts 2.1 erneut die 16 analysierten Reifegradmodelle herangezogen. Zwar weist jedes dieser Modelle isoliert betrachtet mehr oder weniger große inhaltliche Lücken auf, in Summe bilden die Publikationen aber das Spektrum der Industrie 4.0 weitreichend ab.

In Abschnitt 3.3 wurde aufgezeigt, dass die Dimensionsbezeichnungen der Modelle zwar große Schnittmengen aufweisen, dass das Verständnis, welche Inhalte welcher Dimension zuzuordnen sind, jedoch stark variiert. Daher wird zur Ermittlung der Konzepte und Technologien der Industrie 4.0 erneut eine Synthese, wie sie schon für die Modelldimensionen erfolgte, durchgeführt, diesmal jedoch für die Modellindikatoren. Hierfür wird auf die acht ermittelten Themenfelder (siehe Tabelle 3-7) zurückgegriffen. Zunächst werden für jedes Themenfeld die Indikatoren aller zugeordneten Modelldimensionen aufgelistet und auf Redundanzen untersucht. Es ergibt sich somit für jedes Themenfeld eine Liste einzigartiger Indikatoren, die in Tabelle 5-1 abgebildet sind. Die vollständige Synthese ist in Anhang J dargestellt.

Tabelle 5-1: Identifizierte einzigartige Modellindikatoren

| Themenfeld                          | Identifizierte Indikatoren                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Produkte                            | Produktbezogene Services; Sensorik; Daten erfassen/speichern/auswerten; Kommunikationsfähigkeit; Neue Geschäftsmodelle (Kundenindividualisierung); Monitoring; Entwicklung                                                                                                                                                                                                                  |
| Produktion & Prozesse               | Produktionssysteme (Maschinen, CPS, autonome Roboter); IT-Systeme (ERP, MES, Entscheidungsunterstützung); Datenaustausch/Verarbeitung/Analyse/Nutzung; Simulation; Marketing & (After) Sales; Isolierte Technologien (3D-Druck, Cloud, IoT, Sensoren); Unternehmensweite Vernetzung und Kollaboration; Fertigung in kleinen Losen; Monitoring; Mensch-Maschine-Schnittstelle; IT-Sicherheit |
| Technologie                         | Konnektivität/Kommunikation zwischen Maschinen/Produkten; Isolierte Technologien (Cloud, AI, 3D-Druck, Roboter, automatische Fertigung, Assistenzsysteme, VR/AR); CPS; Logistiksysteme; IKT-Infrastruktur; Datenerfassung; Maintenance; IT-Sicherheit                                                                                                                                       |
| IT & Daten                          | Cloud; Datenschutz/-Sicherheit; IT-Sicherheit, Resilienz; Datenaustausch/Verarbeitung/Analyse/Nutzung; Schnittstellen, Kommunikation; Datenbasierte Services zum Produkt; Horizontale/Vertikale Integration                                                                                                                                                                                 |
| Management, Führung, Organisation   | Services/neues Geschäftsmodell um Produkt (Kundenorientierung); Netzwerk-Kollaboration, Supply Chain; Strategie, Roadmap, Vision; Ressourcenverfügbarkeit; Interne Organisation, Kollaboration, Kommunikation; Managementkompetenzen/-stil; Zentrale Koordination (zuständige Person)                                                                                                       |
| Mitarbeiter & Kultur                | Kompetenzen der MA (Schulung und Vorhandene), Autonomie; Interne Kollaboration, Kommunikation, Wissensaustausch; Kultur, Akzeptanz, Vertrauen; Führungsstil; Informationsverfügbarkeit                                                                                                                                                                                                      |
| Geschäftsmodell, Services, Netzwerk | Nutzung Kundendaten; Marketing, After (Sales); IT-Services/DL um Produkt; QM, Maintenance                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Rechtliches & Standards             | Standards, IP-Rechte, Arbeitsrecht                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

Tabelle 5-1 gibt einen ersten Überblick über potenziell in die Einschätzungsmethodik zu inkludierende Konzepte und Technologien, zeigt jedoch auch, dass ebendiese oftmals mehreren Themenfeldern zugeordnet sind. Dies ist dem unterschiedlichen Verständnis, das die Autoren hinsichtlich der Ausgestaltung gleich oder ähnlich benannter Dimensionen aufweisen, geschuldet. Eine Neugruppierung der identifizierten Indikatoren ist notwendig. Hierfür werden zunächst die Dimensionen der Einschätzungsmethode definiert, um die Indikatoren diesen direkt zuordnen zu können. Die Dimensionen ergeben sich aus den acht ermittelten Themenfeldern der Reifegradmodelle aus der Literatur. Das Themenfeld „Technologie“ wird jedoch nicht als Dimension aufgenommen, da es zu generisch ist und zu viele Aspekte der Industrie 4.0 umfasst. Dies wird auch dadurch deutlich, dass sich alle Indikatoren des Themenfelds Technologie in anderen Themenfeldern wiederfinden. Das Themenfeld „Rechtliches & Standards“ wird ebenfalls nicht als Dimension übernommen, da es zum einen von zu geringem Umfang ist und zum anderen Standards in KMU ohnehin weniger verbreitet sind als in Großunternehmen (Mittal et al. 2018, S. 195). Der Aspekt der „Prozesse“ wird dagegen als eigenständige Dimension ausgegliedert, wobei sich hier auf sekundäre Prozesse und deren Organisation, beschränkt wird. Hierdurch soll dem in Abschnitt 2.2.4 aufgezeigten Umstand, dass produktionsnahe Geschäftsprozesse wie die Beschaffung oder Abwicklung von Fertigungsaufträgen in KMU oft noch manuell ausgeführt werden, Rechnung getragen werden.

Aus der redundanzfreien Zuordnung der potenziellen Indikatoren zu den genannten Dimensionen sowie der Ergänzung um die in Abschnitt 2.1 beziehungsweise 2.2 aufgezeigten fehlenden Aspekte ergibt sich schließlich die Einschätzungsmethodik. Die festgelegten Dimensionen und Indikatoren sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst; ausführlich vorgestellt wird die Methodik schließlich in Abschnitt 5.4.

*Tabelle 5-2: Dimensionen und Indikatoren des entwickelten Reifegradmodells*

| Dimension                                   | Indikatoren                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Produkte</b>                             | Integration von Sensoren/Aktoren<br>Kommunikation/Connectivity<br>Funktionalität zur Datenspeicherung                                                                                                                                                               |
| <b>Produktion</b>                           | IKT-Infrastruktur in der Produktion<br>Mensch-Maschine-Schnittstelle<br>Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M)<br>Flexible & Wandlungsfähige Produktion<br>Monitoring, Qualitätsmanagement & Maintenance<br>Werkzeuge und Methoden der Digitalen Fabrik(-planung) |
| <b>Prozesse/<br/>(Ablauf-)Organisation</b>  | Beschaffungsprozess<br>Abwicklung Kundenauftrag<br>Interne Abwicklung Fertigungsauftrag                                                                                                                                                                             |
| <b>IT &amp; Daten</b>                       | IT-Systeme<br>Vernetzung der Produktion mit anderen Produktionsbereichen<br>Datenerhebung, -nutzung, -verarbeitung in der Produktion<br>Datenspeicherung<br>Stammdatenmanagement<br>IT-Sicherheit (Security)<br>Datensicherheit                                     |
| <b>Management, Führung &amp;<br/>Kultur</b> | Industrie 4.0 Vision<br>Führungsstil & Managementkompetenzen<br>Interne Unternehmenskommunikation<br>Unternehmens- und Fehlerkultur                                                                                                                                 |
| <b>Mitarbeiter</b>                          | Interne Kollaboration<br>Bereitschaft zur Veränderung<br>Kompetenzaufbau & Qualifikationsverschiebung                                                                                                                                                               |
| <b>Geschäftsmodell &amp; Netzwerk</b>       | Produktbezogene IT-Services (After Sales)<br>Neue Geschäftsmodelle um Produkt<br>Kollaboration im Wertschöpfungsnetzwerk                                                                                                                                            |

## 5.4 Vorstellung der KMU-spezifischen Einschätzungsmethodik

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten sowohl der Aufbau als auch die Inhalte der entwickelten KMU-spezifischen Einschätzungsmethodik erläutert wurden, wird sie nun in ihrer Gesamtheit präsentiert. Den ausgewiesenen 29 Indikatoren, die sich auf sieben Dimensionen verteilen, werden die fünf festgelegten Reifegradstufen gegenübergestellt. In der hierdurch entstehenden Matrix werden die konkreten Ausprägungen der Indikatoren auf den verschiedenen Reifegraden dargestellt, wobei die Textinhalte durch geeignete Visualisierungen ergänzt werden. Wenn möglich wird bei der Definition der Entwicklungsstufen eines Indikators auf bestehende Modelle mit vergleichbarer Reifegradskala zurückgegriffen. Im Folgenden wird das entstandene Reifegradmodell gegliedert nach den Dimensionen vorgestellt.

## Produkte

Die neuen Möglichkeiten der Smart Factory als wesentlicher Bestandteil der Industrie 4.0 bauen zumeist auf der „Verfügbarkeit umfangreicher Informationen über ein jeweiliges Produkt“ (Lichtblau et al. 2015, S. 44) auf. In der Dimension „Produkte“ soll daher erfasst werden, inwiefern die hergestellten Produkte Daten erheben, speichern, verarbeiten und kommunizieren können.

*Integration von Sensoren/Aktoren:* Mit einsetzender Industrie 4.0-Reife werden die Produkte mit Sensoren und Aktoren ausgestattet, die zunächst nur Daten erfassen, diese dann selbst (vor-)verarbeiten, auswerten und schließlich die durch die Datenanalyse erkannten Maßnahmen eigenständig umsetzen (Anderl 2015, S. 12).

*Kommunikation/Connectivity:* Die Möglichkeit zum Datenaustausch zwischen Maschinen, Anlagen und, wie in diesem Fall, Produkten ist integraler Bestandteil der Industrie 4.0 und erfordert entsprechende Kommunikationsschnittstellen. Am Ende dieser Vision steht die flächen-deckende Anbindung der Produkte an das IoT. (ebd.)

*Funktionalität zur Datenspeicherung:* Die Datenspeicherung seitens der Produkte ist zunächst unabhängig von der Datenerfassung. Barcodes und RFID-Kennungen als Datenspeicher ermöglichen beispielsweise die eindeutige Identifikation und Lokalisierung (Tracking und Tracing) von Produkten. In einer hohen Entwicklungsstufe der Industrie 4.0 können die Produkte Daten autonom austauschen; in Exzellenz ist die Möglichkeit zum Daten- und Informationsaustausch integraler Bestandteil des Produkts. (ebd.)



Industrie 4.0

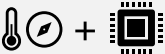
| Produkte                                               |                                                                                                                                               |                                                                                                                                               |                                                                                                                                           |                                                                                                                                              |                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Integration von Sensoren/Aktoren                       | <br>Keine Nutzung von Sensoren/Aktoren                     | <br>Sensoren/Aktoren sind eingebunden                      | <br>Sensordaten werden vom Produkt <b>verarbeitet</b>  | <br>Sensordaten werden vom Produkt <b>ausgewertet</b>   | <br>Produkt <b>reagiert</b> anhand der Daten <b>eigenständig</b> |
| Kommunikation / Connectivity                           | <br>Produkt besitzt <b>keine</b> Schnittstellen zur Umwelt | <br>Produkt sendet/empfängt 1/0-Signale                    | <br>Produkt verfügt über <b>Feldbus-Schnittstellen</b> | <br>Produkt verfügt über <b>Ethernet-Schnittstellen</b> | <br>Produkt hat Zugang zum <b>Internet of Things</b>             |
| Funktionalität zur Datenspeicherung (Tracing/Tracking) | <br>Keine Funktionalitäten                                 | <br>Möglichkeit zur Eindeutigen Identifikation (RFID, ...) | <br>Produkt besitzt <b>passiven</b> Datenspeicher      | <br>Möglichkeit zum <b>autonomen</b> Datenaustausch     | <br>Datenaustausch ist <b>integraler</b> Produktbestandteil      |

Abbildung 5-1: Die Dimension "Produkte"

## Produktion

Die Digitale Transformation und die damit verbundene Vernetzung und Selbstregulierung der Wertschöpfungsprozesse betrifft insbesondere die Fertigung (Lichtblau et al. 2015, S. 35). Durch umfangreiche, effiziente Informationsbereitstellung und -nutzung können Produktionsabläufe optimiert und Produktionskosten gesenkt werden (Anderl 2015, S. 15). In dieser Dimension soll daher ermittelt werden, wie die Produktion intern (die Produkte, Maschinen und Menschen untereinander) und extern (mit anderen Unternehmensbereichen) vernetzt ist. Weiterhin soll erfasst werden, ob und wie die in der Produktion erfassten Daten für das Monitoring und Qualitätsmanagement sowie die Digitale Fabrikplanung genutzt werden und ob die Produktion für die kundenindividuelle Massenfertigung gewappnet ist.

*IKT-Infrastruktur in der Produktion:* Integration und Vernetzung sind Kernelemente der Industrie 4.0. Die in der Produktion vorhandene Informations- und Telekommunikationstechnologie (IKT) bestimmt, inwieweit Daten und Informationen einerseits unternehmensintern und andererseits mit Kunden und Zulieferern ausgetauscht werden können. Daher ist die IKT-Infrastruktur der Fertigung essenziell für die Umsetzung innovativer Prozesse sowie einer bereichs- und unternehmensübergreifenden Kollaboration. (Anderl 2015, S. 14)

*Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS):* Produktionsanlagen werden immer komplexer, bieten immer mehr Funktionen und stellen immer mehr Informationen bereit. In der Industrie 4.0 werden Entscheidungen datenbasiert getroffen, folglich ist es unabdingbar, dass die relevanten Daten auch von den jeweils zuständigen Mitarbeitern erfasst werden können. Die Informationsschnittstellen der Maschinen sollen den zuständigen Mitarbeitern die relevanten Informationen stets am richtigen Ort und in der richtigen Art und Weise, also anwenderfreundlich und intuitiv, bereitstellen und sie dadurch entlasten. Den Ausgangspunkt der Digitalen Transformation bilden hierbei lokale Anzeigegeräte mit oft unübersichtlichen Bedienkonzepten. Möglichkeiten zur Optimierung bestehen beispielsweise in mobilen, benutzerfreundlichen Anzeigegeräten sowie der Unterstützung der Mitarbeiter durch erweiterte beziehungsweise assistierte Realität. (ebd.)

*Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M):* Eine zentrale Eigenschaft von CPS ist es, nicht nur mit Menschen, sondern vor allem auch untereinander kommunizieren zu können. Auf dem Entwicklungspfad hin zu einem CPS müssen Maschinen daher mit einer geeigneten Kommunikationsschnittstelle, im Idealfall mit einem Zugang zum IoT, ausgestattet werden. Durch den Einsatz von Webdiensten kann der Informationsaustausch zudem automatisiert und eine Trennung von Information und Standort erreicht werden. (ebd.)

*Flexible und Wandlungsfähige Produktion:* „Mass Customization“, die kundenindividuelle Fertigung in Losgröße 1 zu den Preisen eines Massenprodukts, ist eines der Ziele, die durch die Umsetzung von Industrie 4.0 erreicht werden sollen. Während des Transformationsprozesses

werden die Produktionsmittel flexibilisiert und der Produktaufbau durch das Verwenden von Gleichteilen modularisiert. Durch Umsetzung aller Wandlungsbefähiger kann schließlich die Wandlungsfähige Fabrik, in der beispielsweise mittels des plug-and-produce-Konzepts gefertigt werden kann, erreicht werden. In der Exzellenz-Stufe umschließt die Wandlungsfähigkeit nicht nur das eigene Unternehmen, sondern das gesamte Wertschöpfungsnetzwerk und ermöglicht so die effiziente Fertigung in Losgröße 1. (Anderl 2015, S. 14; Peukert et al. 2020, S. 281; Nyhuis 2008, S. 26 f.)

*Monitoring, Qualitätsmanagement und Maintenance:* Die neuen Möglichkeiten der Datengewinnung und -analyse durch Big Data Werkzeuge im Zuge der Industrie 4.0 revolutionieren auch die Qualitätsüberwachung respektive die Wartung und Instandhaltung. Betriebsdatenerfassung und rechnergestützte Qualitätssicherung (CAQ) sowie analytische Qualitätsmethoden (zum Beispiel QFD, FMEA, SPC) ermöglichen „Condition Monitoring“, die zustandsorientierte Wartung und Instandhaltung auf Basis von (Maschinen-)Daten. Werden mit Hilfe der erfassten Daten Qualitätsmängel automatisch erkannt und können durch Echtzeitdaten und Big Data Analysen zuverlässige Prognosen über die Funktionsfähigkeit der Produktionsanlagen gegeben werden, so ist die proaktive Wartung und Instandhaltung (Predictive Maintenance) erreicht. Hierdurch können zudem bisher unbekannte Wirkzusammenhänge identifiziert werden. Auf höchster Industrie 4.0-Reifegradstufe werden die durch Predictive Maintenance abgeleiteten Maßnahmen zur Qualitätssteuerung zusätzlich automatisch umgesetzt. (Anderl 2015, S. 12; Luber, Litzel 2017)

*Werkzeuge und Methoden der Digitalen Fabrik(-planung):* Ein zentrales Anwendungsgebiet der digital unterstützten Produktion stellt der Bereich der Fabrikplanung dar (Bullinger et al. 2009, S. 524). Im Rahmen der Digitalen Transformation weichen einfache 3D-Abbilder einzelner Bauteile oder Produkte zunächst dem „Digital Mock-Up“, einem digitalen Abbild der Produkte und des Fabriklayouts, das mittels Simulation und Prozessmodellierung erstellt wird. Ein vollständiges, echtzeitdatenbasiertes, digitales Abbild der Fabrik, der Digitale Schatten, ermöglicht als nächste Entwicklungsstufe die Nutzung weitreichenderer Simulationswerkzeuge (vgl. Abschnitt 2.1.4). In Exzellenz wird aus der Digitalen schließlich die Virtuelle Fabrik und aus dem Digitalen Schatten der Digitale Zwilling, der ganzheitliche Prozess-, Logistik-, und Simulationsmodelle vereint. (Bullinger et al. 2009, S. 521 ff.; IPH Hannover 2020; Schenk 2009, S. 10)

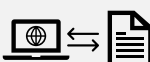
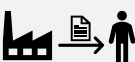
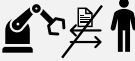
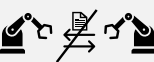
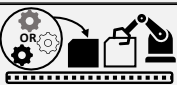
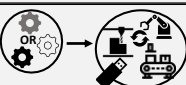
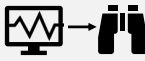
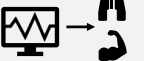
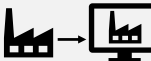
| Produktion                                                      |                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>IKT-Infrastruktur in der Produktion</b>                      | <br>Manueller Informations -<br>austausch per <b>E-Mail, Tele-<br/>kommunikation, Papier</b> | <br><b>Zentrale Datenserver</b> in der<br>Produktion                                                                          | <br><b>Internetbasierte Portale</b> mit<br>gemeinsamer Datennutzung                                                                     | <br><b>Automatisierter</b><br>Informationsaustausch (z.B.<br>Auftragsnachverfolgung)                                                       | <br>Vollständige <b>Integration</b> von<br><b>Kunden/Zulieferern</b> in das<br>Kommunikationsnetzwerk                                                                         |
| <b>Mensch-Maschine-Schnittstelle</b>                            | <br>Kein Informationsaustausch<br>zwischen Mensch und<br>Maschine                            | <br>Einsatz <b>lokaler Anzeigergeräte</b>                                                                                     | <br><b>Zentrale / Dezentrale</b><br>Produktionsüberwachung / -<br>steuerung                                                             | <br>Einsatz <b>mobiler</b><br><b>Anzeigergeräte</b> (Smartphone,<br>Tablet)                                                                | <br><b>Erweiterte und assistierte</b><br><b>Realität</b> (AR, VR, 3D-Brillen)                                                                                                 |
| <b>Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M)</b>                 | <br>Keine Kommunikation                                                                      | <br>Mittels <b>Feldbus-Schnittstellen</b>                                                                                     | <br>Mittels (Industrial-) <b>Ethernet-</b><br>Schnittstellen                                                                            | <br>Maschine hat Zugang zum<br><b>Internet</b>                                                                                             | <br>Einsatz von <b>Webdiensten</b><br>(M2M-Software)                                                                                                                          |
| <b>Flexible &amp; Wandlungsfähige Produktion</b>                | <br><b>Starre</b> Produktionsmittel und<br>geringer Anteil <b>Gleichteile</b>                | <br><b>Flexible</b> Produktionsmittel<br>(Variantenvielfalt) und hoher<br>Anteil <b>Gleichteile</b>                           | <br><b>Flexible</b> Produktionsmittel und<br><b>modularer</b> Produktaufbau<br>→ Zunehmende Effizienz bei<br>kleinen Losgrößen          | <br><b>Bauteilgetriebene,</b><br><b>wandlungsfähige</b> Produktion<br>im Unternehmen (kleine Lose),<br>plug-and-produce -Fähigkeit         | <br>Bauteilgetriebene,<br>wandlungsfähige Produktion<br>der <b>Losgröße 1</b> in<br><b>Wertschöpfungsnetzen</b>                                                               |
| <b>Monitoring, QM &amp; Maintenance</b>                         | <br>Kein <b>Monitoring</b><br>und traditionelle, <b>reaktive</b><br>Wartung/Instandhaltung   | <br><b>manuelle</b><br>Qualitätsüberwachung durch<br>MA und <b>präventive</b><br>Wartung/Instandhaltung                       | <br>Betriebsdatenerfassung und<br><b>rechnergestützte QS</b> (z.B.<br>CAQ, QFD, FMEA, SPC) und<br><b>Condition Monitoring</b>           | <br><b>Automatische</b> Identifikation<br>von Qualitätsmängeln und<br><b>Predictive Maintenance</b><br>(Nutzung von Big Data)              | <br><b>Predictive Maintenance</b> und<br>selbstständige <b>Umsetzung</b> der<br>Maßnahmen (auch zur<br>Qualitätssteuerung)                                                    |
| <b>Werkzeuge &amp; Methoden der Digitalen Fabrik (-planung)</b> | <br><b>2D-CAD:</b> Digitale Zeichnungen<br>mittels 2D-CAD, CIM, CAM                        | <br><b>3D-CAD:</b> Digitales Abbild<br>einzelner Bauteile/Produkte<br>mittels 3D-CAD, PPS, CAE,<br>Objekt-Modellierung, CAP | <br><b>Digital Mock-Up:</b> Digitales<br>Abbild von Produkten und<br>Anlagen mittels <b>Simulation</b> ,<br>PDM, Prozess-Modellierung | <br><b>Digitale Fabrik:</b> Existenz eines<br><b>Digitalen Schattens</b> , Nutzung<br>von Simulation und<br>Visualisierung mittels AR/VR | <br><b>Virtuelle Fabrik:</b> Prozess-,<br>Logistik-, Simulationsmodelle<br>mittels <b>Digitalem Zwilling</b> ,<br>Verknüpfung von Produkt -<br>entstehung und Kundenauftrag |

Abbildung 5-2: Die Dimension "Produktion"

## (Ablauf-)Organisation

Die angestrebte durchgehende Digitalisierung, Automatisierung und Vernetzung im Rahmen der Digitalen Transformation umfasst nicht nur Fertigungs-, sondern auch Sekundärprozesse. Wie in Abschnitt 2.2.4 aufgezeigt wurde, sind ebendiese Prozesse insbesondere in KMU oft noch von manuellen Tätigkeiten durchzogen. In Anlehnung an Sames (2018) wurden der Beschaffungsprozess sowie die Abwicklung von Kunden- und Fertigungsaufträgen als wichtige Sekundärprozesse mit Bezug zur Fertigung identifiziert. Wie sich die Organisation beziehungsweise der Ablauf dieser Prozesse mit zunehmender Industrie 4.0-Reife verändert, wird in dieser Dimension des Reifegradmodells aufgezeigt.

**Beschaffungsprozess:** Während in großen Unternehmen der Einsatz eines ERP-Systems bereits die Regel ist, werden Bedarfe in KMU teils noch manuell bestellt. Ein ERP-System kann die Bedarfsermittlung und -bestellung nicht nur unterstützen, sondern bei entsprechendem Umsetzungsstand der Industrie 4.0 auch automatisiert übernehmen. Im Idealfall sind zudem Lieferanten direkt an das System angebunden, beispielsweise über Konsignation, Kanban oder Entnahmeautomaten. (Sames 2018, S. 6)

**Abwicklung Kundenauftrag:** Ähnliches wie für den Beschaffungsprozess gilt auch für die Abwicklung von Kundenaufträgen. Im Zuge der Digitalen Transformation gilt es, Kunden an das eigene ERP-System anzubinden, ihnen die selbstständige Auftragserstellung oder gar Produktkonfiguration mittels e-Commerce zu ermöglichen und ihnen im Idealfall stets den aktuellen Auftragsstatus mittels einer Web-Applikation anzeigen zu können. Eine derartige Anbindung der Kunden ist untrennbar mit der Vision der kundenindividuellen Massenfertigung und mit der Erschließung neuer, kundenzentrierter Geschäftsmodelle verbunden. (ebd.)

**Interne Abwicklung Fertigungsauftrag:** Vor dem Hintergrund einer angestrebten Automatisierung der Kommunikation müssen auch die Prozessstufen, in denen der Fertigungsauftrag an die Maschine gelangt, digitalisiert und automatisiert werden. Zu diesen Prozessstufen gehören die Weitergabe des im ERP-System angelegten Fertigungsauftrags an nachgelagerte Systeme und letztlich an die Fertigungsmaschinen. Die Digitale Transformation ist abgeschlossen, wenn diese Zwischenschritte nicht nur automatisiert, sondern gar nicht mehr einzeln erkennbar sind, weil der Kundenauftrag ohne Medienbrüche und manuelle Nacharbeit direkt als Fertigungsauftrag an die entsprechende Maschine gelangt. (Sames 2018, S. 7)

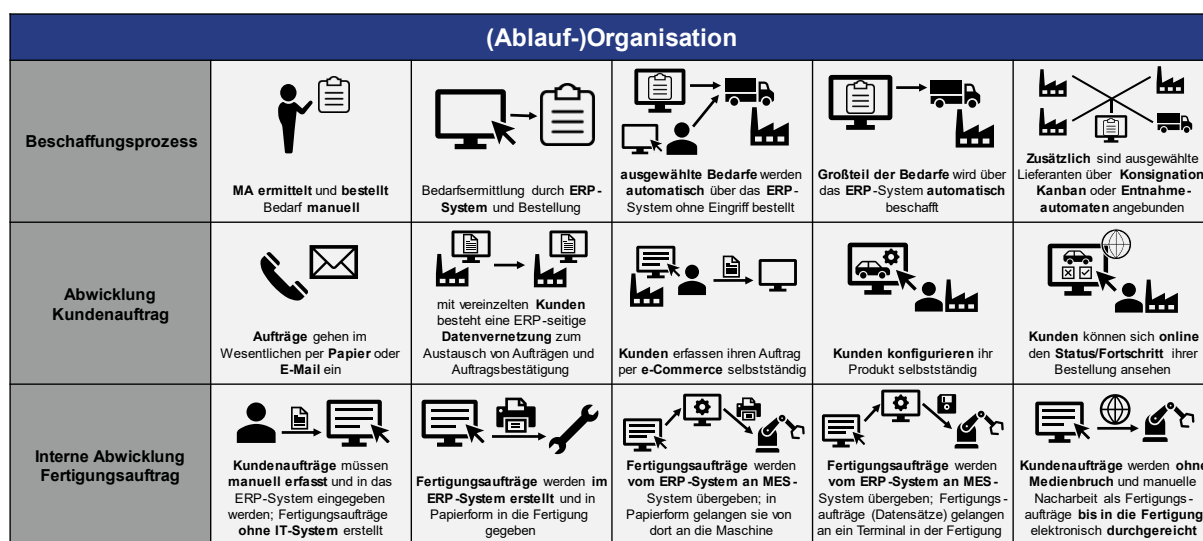


Abbildung 5-3: Die Dimension "(Ablauf-)Organisation"

## IT und Daten

Die „Vernetzung aller Komponenten und Systeme im Werk“ (Lichtblau et al. 2015, S. 39) als „elementarer Bestandteil für die Realisierung von Industrie 4.0“ (ebd.) erfordert vor allem das Vorhandensein bestimmter technologischer Gegebenheiten. Eine dieser Gegebenheiten sind zunächst die IT-Systeme des Unternehmens, die entscheidend für die interne und externe Vernetzung, insbesondere der Produktion, sind. Weitere technologische Aspekte dieses Themenfeldes betreffen die Erhebung, Speicherung, Verarbeitung, Nutzung und Pflege von Daten im Unternehmen. In einem digital transformierten Unternehmen werden Entscheidungen stets datenbasiert getroffen, weshalb die Verfügbarkeit und Auswertung möglichst hochauflösender

Daten in Echtzeit unabdingbar für eine erfolgreiche Umsetzung der Industrie 4.0 sind (ebd.). Wichtig sind in diesem Zusammenhang auch Aspekte der IT- und Datensicherheit, deren Betrachtung diese Modelldimension abrundet.

*IT-Systeme:* Einen ersten Schritt der Digitalen Transformation des Unternehmens stellt die Implementierung eines einfachen ERP-Systems, das zunächst noch an der Spitze einer klassischen Automatisierungspyramide ohne definierte Schnittstellen steht, dar. Mit zunehmender digitaler Reife wird dieses um weitere übergeordnete Systeme wie beispielsweise Methoden des computer-integrated manufacturing (CIM) und ein Manufacturing Execution System (MES) mitsamt Betriebsdatenerfassung (BDE) ergänzt und über Schnittstellen vernetzt. Eine vollumfängliche IT-Systemlandschaft, die vertikal im Unternehmen und horizontal im Wertschöpfungsnetzwerk integriert ist und auf eine „Single Source of Truth“ zurückgreift (Schuh et al. 2017, S. 26 ff.), stellt das Optimum dieses Indikators dar. (Sames 2018, S. 6; SEF 2020, S. 6; Ising 2018)

*Vernetzung der Produktion:* Wichtig ist nicht nur, dass die Produktion durch eine Industrie 4.0-geeignete IT-Systemlandschaft unterstützt wird, sondern auch, dass sie mit anderen Unternehmensbereichen vernetzt ist. Die Transformation von einer unstrukturierten, informellen zu einer standardisierten, auf einheitlichen Datenformaten basierenden Vernetzung der Abteilungen muss zur Umsetzung der Industrie 4.0 vollzogen werden. Im Exzellenzfall entstehen „vereinheitlichte IT-Lösungen, standardisierte Workflows oder durchgängige Dateiformate, von denen das gesamte Unternehmen profitiert“ (Anderl 2015, S. 15).

*Datenerhebung, -nutzung und -verarbeitung in der Produktion:* Das Thema Daten ist omnipräsent und elementar im Kontext der Digitalen Transformation. In diesem Modellindikator soll erfasst werden, wie speziell innerhalb der Produktion mit Daten umgegangen wird. Einen ersten Schritt stellt die Erhebung und standardisierte Speicherung von Produktionsdaten dar. Ist diese Voraussetzung gegeben und somit die Datengrundlage vorhanden, können Analysen zunächst manuell und schließlich automatisch mittels Big Data Werkzeugen die Prozessplanung und -steuerung unterstützen respektive übernehmen. (ebd.)

*Datenspeicherung:* Die Speicherung und Verwaltung der im Unternehmen erhobenen Daten gewinnt aufgrund der enormen Datenmengen, die im Zuge der Industrie 4.0 entstehen, weiter an Bedeutung. Insbesondere für KMU ist das Auslagern der Speicherkapazitäten durch Cloud-Lösungen interessant, da so Hardwarekosten eingespart und der administrative Aufwand reduziert werden können. Eine erste Möglichkeit stellen on-premise Lösungen dar. Hierbei werden die Daten zwar noch auf unternehmenseigenen Servern gespeichert, die dazu notwendige Software jedoch angemietet, um den Verwaltungsaufwand zu reduzieren (Steuerwald 2019). Eine erste Umsetzung einer Cloud Lösung stellt die Private Cloud dar, die nicht der Allgemeinheit über das Internet zugänglich ist, sondern dem jeweiligen Unternehmen über das Intranet

oder ein Virtual Private Network (VPN) exklusiv zur Verfügung steht und auf dessen eigenen oder externen Servern betrieben wird (Karlstetter 2017a). Im Gegensatz dazu steht die Public Cloud, die die höchste Reifegradstufe des Modells darstellt. Public Cloud Dienstleister stellen neben Speicherplatz auch Rechenleistung, Infrastruktur oder Anwendungen über das Internet bereit, wodurch einerseits keine eigenen Investitionen in Hard- und Software mehr notwendig sind, andererseits aber auch höhere Sicherheitsanforderungen entstehen (Karlstetter 2017b). Eine Mischform von Private und Public Cloud stellt die Hybrid Cloud dar, bei der bestimmte datenbezogene Services von öffentlichen Cloud-Anbietern übernommen werden und andere, besonders datenschutzkritische Speicheraufgaben weiterhin im Unternehmen erfolgen (Fraunhofer-Allianz Cloud Computing 2020). (SEF 2020, S. 5)

*Stammdatenmanagement:* Ein spezifischerer, aber dennoch relevanter Aspekt der Datenverwaltung innerhalb eines Unternehmens stellt das Stammdatenmanagement, also die Speicherung, Aktualisierung und Verfügbarkeit dieser Daten in den jeweiligen IT-Systemen, dar. In einem Unternehmen, dass die Digitale Transformation diesbezüglich noch nicht begonnen hat, werden Stammdaten manuell in die einzelnen Systeme eingepflegt und nicht aktualisiert. Mit zunehmender Industrie 4.0-Reife können die Systeme vermehrt untereinander auf Stammdaten zugreifen. In der exzellenten Umsetzung ist schließlich ein führendes Stammdatensystem vorhanden. Des Weiteren findet während der Digitalen Transformation eine Entwicklung von einer Aktualisierung der Daten allein nach Aufforderung über eine sporadische, ereignisbasierte bis hin zu einer algorithmusbasierten Aktualisierung in allen Unternehmensbereichen statt. (SEF 2020, S. 5 f.)

*IT-Sicherheit:* Der Schutz vor kriminellen Angriffen auf die Informationssysteme eines Unternehmens wird im Kontext der Industrie 4.0 noch wichtiger als bisher, da ihr „potenzieller Schaden äquivalent zum Grad der Integration ansteigt“ (Schuh et al. 2017, S. 28). IT-Sicherheit im Unternehmen beginnt mit der Festlegung eines verantwortlichen Mitarbeiters und der Implementierung grundlegender Sicherheitsmaßnahmen wie einer Firewall oder anderer Systeme zur Abwehr von Eindringlingen, sogenannter Intrusion Prevention Systems (IPS), sowie der Nutzung von Antiviren-Software und VPN (SEF 2020, S. 6; Trend Micro 2010, S. 32 f.). Auf der darauffolgenden Reifegradstufe werden nicht nur der Sicherheitsbeauftragte, sondern alle Mitarbeiter für das Thema IT-Sicherheit sensibilisiert (SEF 2020, S. 6). Um Fehlerquellen zu reduzieren werden dennoch im gleichen Zuge Zugriffe gemäß Funktion und Verantwortungsbereich eingeschränkt (Trend Micro 2010, S. 33, 41). Hierfür dienen die Sicherheitsrichtlinie und ein Zugriffskontrollsystem (ebd.). Zudem werden komplexere Sicherheitsmaßnahmen wie Cloud-basierte Sicherheitsservices, zum Beispiel das Smart Protection Network (SPN), umgesetzt (Trend Micro 2010, S. 59 f.). Im nächsten Transformationsschritt sind nicht nur die Mitarbeiter weitreichend hinsichtlich der IT-Sicherheit sensibilisiert, sondern alle Sicherheitsmaß-

nahmen und -prozesse sowie die Verantwortlichkeiten in einem Managementsystem für Informationssicherheit (ISMS) integriert und dokumentiert (BMW 2016, S. 9 f.). Weiterhin ist ein Notfallplan für mögliche Angriffsszenarien erstellt worden (SEF 2020, S. 6). Die höchste Reifegradstufe ist erreicht, wenn das Sicherheitskonzept des Unternehmens nicht nur vorhanden ist, sondern modernen Standards folgt und von Fachexperten beispielsweise nach ISO 27001 oder IEC 62443 zertifiziert wurde. Ein Beispiel für solch ein zertifiziertes ISMS stellt das „Informations-Sicherheitsmanagement System in 12 Schritten (ISIS12)“ dar (Schuh et al. 2017, S. 29; IT-Sicherheitscluster e.V. 2020). In diesem Fall existiert zudem ein „Sicherheitsausweis“ für jedes Produkt und jede Maschine (acatech, Forschungsunion 2013, S. 53) und das Unternehmen ist stets über aktuelle Sicherheitslösungen informiert, da es mit anderen Unternehmen im Austausch steht (ebd.).

*Datensicherheit:* Zusätzlich zur IT-Sicherheit erfordert eine „systemweite Nutzung der erfassten Daten“ (Lichtblau et al. 2015, S. 64) auch die „Implementierung eines [...] Sicherheitskonzeptes“ (ebd.) zum Schutz vor Datenverlusten. Wenn Informationen in oder zwischen Unternehmen weitergeleitet oder übertragen werden, können immer auch Datenlecks entstehen (Trend Micro 2010, S. 44). Eine erste, einfache Möglichkeit zur Vermeidung von Datenverlusten mittels redundanter Datenhaltung stellen Spiegelsysteme dar. Datenbackups beziehungsweise Wiederherstellungspunkte (Recovery), die gegebenenfalls regelmäßig mit Momentaufnahmen der Systeme und Objekte (Wikipedia 2020c), sogenannter Snapshots, ergänzt werden, erhöhen die Datensicherheit. Die höchste Reifegradstufe der Datensicherheit wird durch das Verwenden von Transaktionsreplikationen erreicht. Hierbei wird nicht nur eine Momentaufnahme eines Datensatzes, beispielsweise eines Datenbankobjekts, erfasst, sondern etwaige inkrementelle Datenänderungen (fast) in Echtzeit an alle auf diese Daten zugreifenden Systeme übermittelt, sodass zwischen den betroffenen Systemen jederzeit Transaktionskonsistenz gewährleistet ist (Microsoft 2020). (SEF 2020, S. 5)

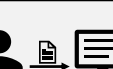
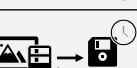
| IT & Daten                                               |                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IT-Systeme                                               | <br>Kein ERP-System                                                                      | <br>ERP-System und Organisation in klassischer Automatisierungspyramide                                               | <br>Erweiterung des ERP um Produktionsmanagement - systeme/Methoden (CIM, BDE, MES) und Automatisierungs- pyramide mit Schnittstellen           | <br>Vollumfängliche IT- Systemlandschaft (ERP, CIM, BDE, MES) und horizontale Vernetzung der Ebenen                  | <br>Vollumfängliche IT-System- landschaft eingegliedert in eine „Single Source of Truth“ und horizontale und vertikale Vernetzung der Ebenen        |
| Vernetzung der Produktion mit anderen Bereichen          | <br>Keine Vernetzung der Produktion mit anderen Unternehmensbereichen                    | <br>Informationsaustausch über Mail / Telekommunikation                                                               | <br>Einheitliche Datenformate und Regeln zum Datenaustausch                                                                                     | <br>Einheitliche Dateiformate und Abteilungsübergreifend vernetzte Datenserver                                       | <br>Abteilungsübergreifende, vollständig vernetzte IT- Lösungen                                                                                     |
| Datenerhebung, -nutzung, -verarbeitung in der Produktion | <br>Produktionsdaten werden nicht weiter verarbeitet/genutzt (aber ggf. erhoben)         | <br>Daten werden erhoben und standardisiert gespeichert (zu Dokumentationszwecken)                                    | <br>Manuelle, Spontane Datenanalyse zur Prozessüberwachung (in Projektteams/Taskforce)                                                          | <br>Manuelle, aber durchgängige, systematische Datenanalyse als integraler Bestandteil der Prozessplanung/-steuerung | <br>Automatische Prozessplanung/-steuerung mittels Big Data Analysen                                                                                |
| Datenspeicherung                                         | <br>Keine Cloud-Lösung                                                                   | <br>Cloud on premise                                                                                                  | <br>Private Cloud                                                                                                                               | <br>Hybrid Cloud                                                                                                     | <br>Public Cloud                                                                                                                                    |
| Stammdaten- management                                   | <br>Stammdaten werden manuell einzeln in jedes System eingepflegt und nicht aktualisiert | <br>Systeme können teilweise auf Stammdaten anderer System zugreifen und Aktualisierung nur nach Aufforderung         | <br>Systeme können überwiegend auf Stammdaten anderer System zugreifen; sporadische Aktualisierung (bei Ereignis)                               | <br>Systeme haben vollständigen gegenseitigen Zugriff; in einigen Bereichen algorithmus- basierte Aktualisierung     | <br>führendes Stammdaten- system; im gesamten Unternehmen algorithmus- basierte Aktualisierung                                                      |
| IT-Sicherheit                                            | <br>Keine explizite Auseinandersetzung mit der Thematik (kein Bewusstsein)             | <br>Verantwortlicher Mitarbeiter und einzelne, grundlegende Maßnahmen (z.B. Firewall, Antiviren-Software, IPS, VPN) | <br>Sicherheitsbeauftragter + Sicherheitsrichtlinie; Zugriffs- kontrollsystem und komplexere Einzelmaßnahmen (Cloud - Sicherheitsdienst, SPN) | <br>Notfallplan im Angriffsfall, sensibilisierte MA und Integration der einzelnen Maßnahmen zu einem ISMS          | <br>Zertifiziertes ISMS (z.B. ISO 27001); „Sicherheitsausweis“ für jedes Produkt/Maschine/ Prozess; unternehmensüber- greifender Wissensaustausch |
| Datensicherheit                                          | <br>Keine Lösung                                                                       | <br>Redundante Datenhaltung in Form eines Spiegelsystems                                                            | <br>Redundante Datenhaltung in Form von Backups/Recovery                                                                                      | <br>Erweiterung der Backups/ Recovery mit Snapshots                                                                | <br>Transaktionsreplikation                                                                                                                       |

Abbildung 5-4: Die Dimension "IT und Daten"

## Management, Führung und Kultur

Die erfolgreiche Umsetzung der Industrie 4.0 ist nicht nur eine technologische Gestaltungsaufgabe, sondern betrifft gleichermaßen die Struktur eines Unternehmens, also die impliziten und expliziten Regeln, nach denen Aufgaben, Rollen und Verantwortlichkeiten zugeteilt, kontrolliert und koordiniert werden. Ein maßgeblicher Einflussfaktor auf das Gelingen der Digitalen Transformation ist daher die Unternehmensleitung, deren Aufgabe vor allem darin besteht, die Mitarbeiter zur Zusammenarbeit und Erreichung eines klaren, gemeinsamen Ziels zu motivieren. Hierfür muss das Management eine klare Industrie 4.0 Vision und Strategie vorweisen, mit modernen Managementkonzepten vertraut und zudem bereit sein, seinen Führungsstil anzupassen. Das Schaffen geeigneter Kommunikationskanäle zur internen Vernetzung sowie einer offenen Fehlerkultur sind in diesem Zusammenhang weitere Aufgaben des Managements. (EDB Singapore 2017, S. 13)

*Industrie 4.0 Vision:* Die Umsetzung der Industrie 4.0 ist ein langwieriger, mehrjähriger Transformationsprozess und erfordert daher die Existenz einer Vision beziehungsweise eines langfristigen, strategischen Plans. Das Management muss sich der Potenziale der Digitalen Transformation bewusst sein, daraus klare Zielvorstellungen ableiten und die für Transformationsprojekte notwendigen Ressourcen bereitstellen. Unternehmen der höchsten Reifegradstufe sind nicht nur im Besitz einer Roadmap mit zeitlich und finanziell determinierten Zielen, sondern überprüfen und aktualisieren diese regelmäßig hinsichtlich etwaiger Marktinnovationen und priorisieren Transformationsprojekte entsprechend hoch.

*Führungsstil und Managementkompetenzen:* Um Entwicklungspotenziale zu erkennen und Digitalisierungsprojekte einzuleiten ist es zunächst unabdingbar, dass das Management selbst die Konzepte und Technologien der Industrie 4.0 versteht und einsetzen kann. Die neuen Möglichkeiten der Datenerhebung und -analyse sollen es einem Unternehmen ermöglichen, auf „immer kurzzyklischer auftretende Umweltereignisse“ (Schuh et al. 2017, S. 36) mit hoher Geschwindigkeit und Qualität zu reagieren. Dies ist jedoch nur möglich, wenn Entscheidungen dezentral und datenbasiert direkt von Mitarbeitern getroffen werden können. Mit zunehmendem Industrie 4.0-Reifegrad überwindet die Unternehmensleitung daher das patriarchale, starre Hierarchiedenken und räumt ihren Mitarbeitern immer weitreichendere Gestaltungs- und Entscheidungsspielräume ein. Die höchste Reifegradstufe ist erreicht, wenn Entscheidungen stets am sinnvollsten Ort im Unternehmen getroffen werden. Dies bedeutet jedoch nicht, dass sämtliche Entscheidungen dezentral getroffen werden müssen. Bestimmte Entscheidungen, wie beispielsweise die Strategiedefinition, lassen sich dezentral wirtschaftlicher und folglich sinnvoller treffen (Schuh et al. 2017, S. 33). (EDB Singapore 2017, S. 36; Schuh et al. 2017, S. 36)

*Interne Unternehmenskommunikation:* Um die besagten Entscheidungen treffen zu können, muss den Mitarbeitern nicht nur explizites Wissen, wie beispielsweise Maschinendaten, über eine entsprechende MMS, sondern auch implizites Wissen, wie beispielsweise Erfahrungswerte und nicht mittels Sensoren erfasste Daten, zur Verfügung stehen. Der offene Austausch impliziten Wissens muss durch das Management gefördert und durch geeignete Kommunikationskanäle ermöglicht werden. Mit zunehmender Industrie 4.0-Reife erfolgt eine Abkehr vom unstrukturierten und verzögerungsbehafteten papierbasierten Wissensaustausch. Stattdessen werden internetbasierte Kommunikationsplattformen wie das Intranet, ein internes Wiki und ein digitaler Newsletter eingeführt. Wichtig dabei ist, dass diese nicht nur formal existieren, sondern auch von den Mitarbeitern akzeptiert und genutzt werden. Ein etabliertes Social Intranet bildet die vierte und höchste Reifegradstufe ab. Eine fünfte Reifegradstufe wird für diesen Indikator nicht definiert, da eine Ausweitung auf das Wertschöpfungsnetzwerk, die hier zumeist erfolgt, für die interne Kommunikation nicht sinnvoll wäre und auch sonst derzeit keine technologische Erweiterung des Social Intranets existiert. Neben der Kommunikation zwischen

Mitarbeitern ist auch die managementseitige Kommunikation beispielsweise der Unternehmensstrategie und -ziele für eine erfolgreiche Digitale Transformation relevant und mittels der genannten Kanäle umzusetzen. Fortgeschrittene Unternehmen nutzen hierfür Dialogformate wie Roadshows und Erklärvideos (Montag 2016). (Schuh et al. 2017, S. 36; Brettschneider 2017, S. 36 ff.)

*Unternehmens- und Fehlerkultur:* Den Ausgangspunkt für Lern- und Veränderungsprozesse innerhalb eines Unternehmens, wie sie im Rahmen der Digitalen Transformation angestrebt werden, bilden zumeist aufgetretene Fehler. Ein entscheidender Aspekt der Unternehmenskultur im Kontext der Industrie 4.0 ist daher der Umgang mit ebendiesen Fehlern. In einem Unternehmen, das sich diesbezüglich auf der niedrigsten Reifegradstufe befindet, wird versucht, Fehler konsequent zu vermeiden, sie führen zu Schuldzuweisungen und werden daher nicht kommuniziert. Mit steigender Industrie 4.0-Reife werden Fehler vermehrt in Einzelgesprächen respektive bereichsintern besprochen und dokumentiert, es wird aber immer noch vordergründig versucht, sie zu vermeiden. Eine offene, unternehmensweite Kommunikation, Aufarbeitung und Dokumentation der Fehler sowie der getroffenen Maßnahmen ohne Schuldzuweisungen führen schließlich zum Exzellenz-Zustand, in dem die Mitarbeiter Fehler als Schätze anerkennen und öffentlich ausstellen. (Schuh et al. 2017, S. 34 f., 47)

| Management, Führung & Kultur                    |                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Industrie 4.0 Vision</b>                     | <br>Digitale (Geschäftsmodell -) Transformation ist <b>kein strategischer Fokus</b>                                                               | <br>Management erkennt <b>Bedeutung und Potenziale</b> der Digitalen Transformation                                                                 | <br>Management hat <b>klare Zielvorstellungen</b> (langfristig) und stellt <b>Ressourcen</b> bereit                                                                   | <br>konkrete <b>Roadmap</b> und erste Transformationsprojekte in der <b>Umsetzung</b>                                                                  | <br>Transformationsprojekte haben hohe <b>Priorität</b> und die Strategie wird konstant hinsichtlich Markttinnovationen <b>überprüft</b>                           |
| <b>Führungsstil &amp; Managementkompetenzen</b> | <br>Management ist <b>nicht vertraut</b> mit modernen Technologien und Konzepten und strenges <b>Hierarchiedenken</b>                             | <br>Management ist <b>teilweise vertraut</b> mit modernen Konzepten und <b>zunehmend</b> bereit, Entscheidungskompetenzen <b>abzugeben</b>          | <br>Management ist <b>vollständig vertraut</b> mit modernen Konzepten und MA haben <b>erste</b> Gestaltungs- und Entscheidungskompetenzen                             | <br>Management kann besagte Konzepte (ggf. mit Hilfe externer Experten) <b>anwenden</b> und MA haben <b>weitreichende</b> Kompetenzen                  | <br>Management kann besagte Konzepte anwenden; ist ständig informiert über Innovationen u. <b>Entscheidungen</b> werden stets <b>am sinnvollsten Ort</b> getroffen |
| <b>Interne Unternehmenskommunikation</b>        | <br><b>Keine definierten Kommunikationskanäle</b> oder überwiegend <b>papierbasierter</b> Wissensaustausch (Schwarzes Brett, Zeitschrift, Briefe) | <br>Zusätzlich <b>internetbasierte Kommunikation</b> (Intranet, Internes Wiki, Newsletter), aber beschränkte Nutzung/ Akzeptanz durch MA            | <br><b>Def. Kommunikationskanäle: internetbasierte Plattformen</b> (Intranet, Internes Wiki, digitaler Newsletter) und <b>Dialogformate</b> (Roadshows, Erklärvideos) | <br>Etablierung des <b>Social Intranets</b> und Beschäftigte haben <b>verzögerungsfreien</b> Zugang zu erforderlichem explizitem und implizitem Wissen |                                                                                                                                                                    |
| <b>Unternehmens- und Fehlerkultur</b>           | <br>Fehler führen zu Schuldzuweisungen und kein interner Austausch                                                                                | <br>Fehler als <b>Basis zur Verbesserung</b> ; werden aber nicht systematisch erfasst/ nachverfolgt u. eher in <b>Einzelgesprächen</b> angesprochen | <br>MA streben an, <b>Fehler</b> durch Einhaltung der QM-Vorgaben zu <b>vermeiden</b> ; einheitliche <b>Dokumentation</b> und bereichsinterner <b>Austausch</b>       | <br>offene Fehler -Kommunikation; konstruktive Aufarbeitung (keinerlei Schuldzuweisungen) und <b>Dokumentation von Maßnahmen</b>                       | <br>MA sehen <b>Fehler als Schätze</b> an; Fehler werden <b>ausnahmslos analysiert</b> und mitamt Maßnahmen <b>öffentlich ausgestellt</b>                          |

Abbildung 5-5: Die Dimension "Management, Führung und Kultur"

## Mitarbeiter/-innen

Ebenso wie auf Seiten des Managements strukturelle Veränderungen erfolgen müssen, müssen sich auch die Mitarbeiter im Kontext der Industrie 4.0 neuen Anforderungen stellen. Ins-

besondere von Produktionsmitarbeitern werden zunehmend höhere IT-Kompetenzen erwartet, was eine Qualifikationsverschiebung zur Folge hat. Hierfür müssen zum einen die Unternehmen geeignete Weiterbildungsmaßnahmen anbieten und zum anderen die Mitarbeiter gewillt sein, diese und die Veränderungen im Allgemeinen anzunehmen. Ebenso müssen neue, weitreichendere Formen der internen Zusammenarbeit etabliert werden. (Lichtblau et al. 2015, S. 52)

*Interne Kollaboration:* Ziel der Industrie 4.0 ist der effiziente Einsatz von Unternehmensressourcen durch eine flexible, dynamische Konfiguration ebendieser. Dies umfasst nicht nur die mechanistische Organisation von Produktionsanlagen, sondern auch die organische Organisation der Mitarbeiter. Für eine dynamische, effiziente Verteilung der menschlichen Unternehmensressourcen muss die Aufbauorganisation folglich einen regelmäßigen Wechsel der Assignments der Mitarbeiter, also ihrer Aufgaben und Zugehörigkeiten, ermöglichen. In einem ersten Transformationsschritt schafft das Unternehmen formale Kanäle zum Informationsaustausch zwischen starren Teams. Mit steigendem Industrie 4.0-Reifegrad werden die Teams zunehmend bedarfsgerecht gebildet, sodass schließlich ein agiles Unternehmen mit „Flexible Communities“ entsteht. Diesen Arbeitsgruppen werden die Mitarbeiter kurz- oder langfristig gemäß ihrer Qualifikationen und unabhängig von Hierarchie und Fachabteilung dynamisch zugeteilt. Dabei werden Risiko, Verantwortung und Honorierung geteilt. IT-basierte Kollaborationsplattformen unterstützen die Zusammenarbeit. Im Optimalzustand werden die Communities bereits vorausschauend gebildet und die Einweisung neuer Mitglieder beispielsweise durch intuitive AR-Lösungen unterstützt. (Schuh et al. 2017, S. 30 f.; EDB Singapore 2017, S. 37)

*Bereitschaft zur Veränderung:* Der Nutzen neuer Technologien und Ansätze der Industrie 4.0 ist nicht immer direkt ersichtlich, da diese zumeist unbekannt und komplex sind. Dass die Mitarbeiter trotz dessen bereit und offen für „Innovationen und neuartige Ansätze“ (Schuh et al. 2017, S. 35) sind, ist essenziell, um „Veränderung zu initiieren und geeignete, möglicherweise sogar unkonventionelle Maßnahmen zu starten“ (ebd.). Während fortgeschrittene Unternehmen es schaffen, ihren Mitarbeitern die Skepsis gegenüber den neuen Technologien vollständig zu nehmen und ihnen den Nutzen aufzuzeigen, binden Experten sie zusätzlich von Beginn an aktiv in Veränderungsprozesse mit ein. Mit Erreichen der höchsten Reifegradstufe verstehen die Mitarbeiter zudem jederzeit, wie ein Informationssystem zu einer Entscheidung gekommen ist, hinterfragen den Ablauf aber zugleich immer auch kritisch und tragen so zur kontinuierlichen Verbesserung bei. (Schuh et al. 2017, S. 35 ff.)

*Kompetenzaufbau und Qualifikationsverschiebung:* Wie bereits beschrieben verändern sich im Zuge der Digitalen Transformation die Anforderungen an die Mitarbeiter weitreichend, was zwangsläufig den Aufbau entsprechender Kompetenzen erfordert und im Ergebnis zu einer

Qualifikationsverschiebung führt. In der traditionellen Spezialisierung, wie sie bislang noch vorherrscht, lassen sich Helfer, Fachkräfte, Spezialisten und Experten unterscheiden. Der schrittweise Aufbau eines strukturierten Weiterbildungsangebots ermöglicht den Mitarbeitern den Ausbau bestehender und die Aneignung neuer Fähig- und Fertigkeiten. Hierdurch werden zunächst Fachkräfte zu Spezialisten und diese schließlich zu Experten. Ist das Konzept des lebenslangen Lernens als fester Bestandteil der Lebens- beziehungsweise Karrierewege der Mitarbeiter erfolgreich implementiert, werden diese in ihrem Denken und Handeln interdisziplinär. Auch Helfer erhalten nun Aufgabenverantwortung. Der Reifegrad der Exzellenz wird erreicht, wenn Mitarbeiter durch Beobachtung ihrer Umwelt stetig Weiterbildungsbedarfe erkennen und gemeinsam mit der Unternehmensleitung entsprechende Weiterbildungsangebote ausarbeiten. Die Mitarbeiter sind nun multi-versatil, auch auf Ebene der Helfer. (Schuh et al. 2017, S. 35; Sames 2018, S. 9; EDB Singapore 2017, S. 35)

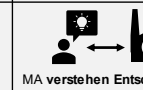
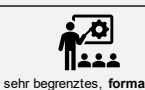
| Mitarbeiter/-innen (MA)                                 |                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Interne Kollaboration</b>                            | <br>Gruppenarbeit findet selten/gar nicht statt und wenn doch arbeiten die Teams in „Silos“                   | <br>Formale Kanäle zum Informationsaustausch zw. Teams; Zuordnungen („Assignments“) der MA wechseln nicht                                 | <br>Informationsaustausch zw. Teams; zunehmend bedarfsgerechte Zusammenarbeit in individuellen Teams und Vernetzung von Experten                       | <br>Agiles Unternehmen: „Flexible Communities“ und IT-basierte Kollaborationsplattformen; Risiko, Verantwortung und Honorierung werden geteilt                   | <br>Communities werden vorausschauend gebildet und durch neue Technologien (z. B. AR-Lösungen zur Einweisung von MA) unterstützt            |
| <b>Bereitschaft zur Veränderung</b>                     | <br>Keine Akzeptanz gegenüber neuen Technologien und keine Bereitschaft für Veränderungen im Arbeitsablauf  | <br>Bereitschaft zur Veränderung, aber Skepsis/Unwissenheit hstl. des konkreten Nutzens neuer Technologien/Prozesse                     | <br>Vollständige Offenheit gegenüber Innovationen und Anerkennung des Nutzens neuer Technologien/Ansätze                                             | <br>MA von Beginn an in Veränderungsprozesse involviert; gestalten Digitale Transformation aktiv positiv mit                                                   | <br>MA verstehen Entscheidung des Systems und Nutzen der Handlungsempfehlung; hinterfragen das System aber stets kritisch zur Optimierung |
| <b>Kompetenzaufbau &amp; Qualifikationsverschiebung</b> | <br>Kein Schulungsangebot und traditionelle Spezialisierung (in Helfer, Fachkräfte, Spezialisten, Experten) | <br>sehr begrenztes, formales Konzept zur MA-Qualifikation (beschränkt auf Aneignen von Fähigkeiten) und Fachkräfte werden Spezialisten | <br>Strukturiertes Qualifikations- und Schulungsangebot: kontinuierliches Erlernen/Verbessern von Fähig-/Fertigkeiten & Spezialisten werden Experten | <br>Qualifikation/Schulung ist fester Bestandteil der Strategie und der MA-Laufbahn (lebenslanges Lernen); interdisziplinäre MA; Helfer erhalten Verantwortung | <br>MA erkennen Weiterbildungsbedarfe und leiten gemeinsam mit Management/HR neue Angebote ab; multiversatile MA (auch auf Helfer-Ebene)  |

Abbildung 5-6: Die Dimension "Mitarbeiter/-innen"

## Geschäftsmodell und Netzwerk

Aufgrund aller genannten technologischen und organisatorischen Veränderungen werden im Rahmen der Industrie 4.0 neuartige, teils radikal veränderte Geschäftsmodelle, die erst durch die unternehmensübergreifende Kooperation in hochdynamischen Wertschöpfungsnetzwerken ermöglicht werden und deren Bezugseinheit stets der Kunde ist, entstehen (vgl. Abschnitt 2.1.3) (acatech, Forschungsunion 2013, S. 26; Schallmo 2019, S. 7). Ob und in welchem Maße ein Unternehmen innovative Geschäftsmodellansätze verfolgt und innerhalb seines Netzwerks kollaboriert, soll im Rahmen dieser Modelldimension ermittelt werden.

**Produktbezogene IT-Services:** Der Verkauf rein physischer Güter kann im Zuge der Geschäftsmodelltransformation zunächst durch vom Produkt entkoppelte Services, die dem Kunden beispielsweise über ein Online Portal zur Verfügung stehen, ergänzt werden. Durch eine

Kopplung beider Aspekte können die IT-Services direkt über das Produkt, gegebenenfalls sogar selbstständig, ausgeführt werden. Am Ende der Digitalen Transformation steht eine vollständige Eingliederung der Produkte mitsamt der zugehörigen Services in die IT-Infrastruktur des Unternehmens. Beispiele solcher produktbezogenen Dienstleistungen können Services „zur zustandsabhängigen Instandhaltung oder Produktsupport mit Funktionen der Ferndiagnose“ (Anderl 2015, S. 13) sein. (ebd.)

*Geschäftsmodelle um das Produkt:* Wie bereits erläutert, ermöglicht die Flexibilisierung der Produktion die effiziente Fertigung in kleinen Losgrößen und damit die Anpassung der Produkte an die Kundenwünsche. Zusätzlich zur Anpassung des Produktes selbst entstehen im Kontext der Industrie 4.0 auch Möglichkeiten für neuartige Geschäftsmodelle um das Produkt herum. Erste zusätzliche Wertschöpfungspotenziale können erschlossen werden, indem der reine Verkauf von Standard-Produkten durch Beratung und Anpassung ergänzt wird. Experten verkaufen darüber hinaus produktbezogene Dienstleistungen. Eine vollständige Industrie 4.0 Implementierung ermöglicht schließlich den Verkauf von Produktfunktionen, bei denen „das Produkt Herstellereigentum bleibt und lediglich eine Funktionserfüllung [vom Kunden] vergütet wird“ (Anderl 2015, S. 13). Beispiele solcher Funktionen können eine „umfangreiche Erfassung von Betriebszuständen“ (ebd.) des verkauften beziehungsweise vermieteten Produkts oder die „Steuerung einer zustandsbasierten Instandhaltung durch den Hersteller“ (ebd.) sein. (ebd.)

*Kollaboration im Wertschöpfungsnetzwerk:* Einen zentralen Gedanken und eine Grundvoraussetzung für die Umsetzung zahlreicher genannter Konzepte der Industrie 4.0 stellt die Verbindung aller Wertschöpfungspartner, nicht nur intern, sondern auch extern vom Lieferanten bis zum Kunden, dar (Lichtblau et al. 2015, S. 39). Die unternehmensübergreifende Zusammenarbeit erfordert zunächst, dass die Wertschöpfungspartner gemeinsame Ziele verfolgen und bereit sind, Probleme gemeinsam zu lösen. Die kooperative Problemlösung erfolgt mit zunehmender Industrie 4.0-Reife und entsprechender Integration zunächst reaktiv und dann proaktiv. Die höchste Reifegradstufe der Kollaboration ist erreicht, wenn die Systeme der Wertschöpfungspartner vollständig miteinander kompatibel sind und zusätzlich zur gemeinsamen, proaktiven Problemlösung auch Best Practices ausgetauscht werden. (Peukert et al. 2020, S. 282)

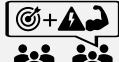
| Geschäftsmodell & Netzwerk                |                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Produktbezogene IT-Services (After Sales) | <br>Keine Services (nur physisches Produkt)                                                                                                 | <br>Services über <b>Online Portal</b>                                                                                                | <br>Service-Ausführung <b>direkt über das Produkt</b>                                                                                     | <br><b>Selbstständiges</b> Ausführen von Services                                                                          | <br>Vollständige <b>Eingliederung</b> in IT-Infrastruktur                                                                  |
| Neue Geschäftsmodelle um das Produkt      | <br>Gewinn allein durch Verkauf der <b>Standard-Produkte</b>                                                                                | <br>Verkauf und <b>Beratung</b> zum Produkt                                                                                           | <br>Verkauf, Beratung und <b>Anpassung</b> des Produktes an Kundenwünsche                                                                 | <br>Zusätzlicher Verkauf <b>produktbezogener Dienstleistungen</b>                                                          | <br>Verkauf von <b>Produktfunktionen</b>                                                                                   |
| Kollaboration im Wertschöpfungsnetzwerk   | <br>Partner verfolgen <b>eigene Ziele</b> ; Probleme werden <b>reaktiv</b> und <b>isoliert</b> gelöst und kein Austausch von Best Practices | <br>Verfolgen <b>gemeinsamer Ziele</b> ; Probleme werden <b>reaktiv</b> und <b>isoliert</b> gelöst; kein Austausch von Best Practices | <br>Verfolgen <b>gemeinsamer Ziele</b> ; Probleme werden <b>reaktiv</b> , aber <b>gemeinsam</b> gelöst; kein Austausch von Best Practices | <br>Verfolgen <b>gemeinsamer Ziele</b> und <b>gemeinsame</b> , gegenseitige proaktive, kontinuierliche <b>Verbesserung</b> | <br>Verfolgen <b>gemeinsamer Ziele</b> und <b>vollständige System-kompatibilität</b> ; Austausch von <b>Best Practices</b> |

Abbildung 5-7: Die Dimension "Geschäftsmodell und Netzwerk"

Neben den im Rahmen der Literaturrecherche und -analyse ermittelten und betrachteten Reifegradmodellen wurden zur Erstellung dieser Einschätzungsmethodik an den entsprechend gekennzeichneten Stellen zudem die Modelle von Sames (2018) und SEF (2020), die durch Mitglieder des Projektkonsortiums bereitgestellt wurden, verwendet.

## **6 Evaluation der KMU-spezifischen Einschätzungsmethodik**

Die im vorherigen Kapitel vorgestellte Einschätzungsmethodik folgt einer Systematik, die auf Basis der Analyse und Bewertung bestehender Industrie 4.0-Reifegradmodelle in den Kapiteln 3 und 4 als besonders geeignet für die Anwendung im KMU-Kontext eingestuft wurde. Die Frage, inwieweit diese Zielstellung erfüllt wurde und welche Anpassungen gegebenenfalls an der Methodik vorgenommen werden müssen, soll durch eine Evaluation beantwortet werden. Das Konzept, die Durchführung und die Ergebnisse der Evaluation werden in diesem Kapitel vorgestellt. Im Rahmen einer kritischen Würdigung der Evaluationsergebnisse werden abschließend mögliche Anpassungen der Einschätzungsmethodik diskutiert.

### **6.1 Entwicklung eines Evaluationskonzeptes**

Die Evaluation des entwickelten Industrie 4.0-Reifegradmodells erfolgt durch die Projektpartner des KMU-WisLab DF. Den Vertretern der 15 mittelständischen Partnerunternehmen wird das Reifegradmodell vorgestellt und sie werden gebeten, die Eignung und Anwendbarkeit des Modells aus der Sicht ihres Unternehmens zu beurteilen.

Die Evaluation erfolgt mit Hilfe eines Fragebogens, der in der durch die Universität Kassel lizenzierten Online-Applikation LimeSurvey erstellt wird. Die Evaluation beginnt mit einer Einleitung, in der zunächst das Reifegradmodell selbst kurz vorgestellt wird. Im Anschluss wird der weitere Aufbau des Fragebogens erklärt und der zu erwartende zeitliche Bearbeitungsumfang, der Evaluationszeitraum sowie die bestehende Möglichkeit der Zwischenspeicherung und Rückwärtsnavigation erläutert.

Zuerst werden die Teilnehmer gebeten, Angaben zur Größe ihres Unternehmens (Anzahl Mitarbeiter, Jahresumsatz) zu tätigen, um später gegebenenfalls Zusammenhänge zwischen Unternehmensgröße und Antworten aufzeigen zu können. Anschließend werden die Dimensionen beziehungsweise Indikatoren evaluiert, wobei jede Dimension auf einer eigenen Fragebogenseite dargestellt wird. Nacheinander wird jeder Indikator einer Dimension abgebildet und daraufhin um eine Einschätzung gebeten. Hierbei soll beantwortet werden, ob der Indikator aus Sicht des jeweiligen Befragten für eine Reifegradermittlung sinnvoll ist, ob er darüber hinaus überhaupt wichtig für das jeweilige Unternehmen ist und ob seine einzelnen Ausprägungen nachvollziehbar und schlüssig sind. Die Einstufung erfolgt auf einer Likert-Skala, wobei auch die Möglichkeit besteht, keine Antwort zu geben. Dieser Fragentyp ist anhand des Indikators „Integration von Sensoren/Aktoren“ der Dimension „Produkte“ in Abbildung 6-1 beispielhaft dargestellt. Am Ende jeder Dimension wird gefragt, ob diese als vollständig erachtet wird, wobei mit „Ja“, „Nein“ oder „Unsicher“ geantwortet und bei Bedarf ein erklärender Kommentar

verfasst werden kann. Allgemeine Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge zur jeweiligen Dimension können in einem Textfeld am Seitenende getätigt werden.

Item 1.1: Integration von Sensoren/Aktoren

|                                  |                                    |                                   |                                                   |                                                   |                                                              |
|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Integration von Sensoren/Aktoren |                                    |                                   |                                                   |                                                   |                                                              |
|                                  | Keine Nutzung von Sensoren/Aktoren | Sensoren/Aktoren sind eingebunden | Sensordaten werden vom Produkt <b>verarbeitet</b> | Sensordaten werden vom Produkt <b>ausgewertet</b> | Produkt <b>reagiert</b> anhand der Daten <b>eigenständig</b> |

|                                             |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|---------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                             | stimme zu             | stimme eher zu        | neutral               | stimme eher nicht zu  | stimme nicht zu       | keine Antwort         |
| Das Item ist im KMU-Kontext sinnvoll.       | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Das Item ist im KMU-Kontext wichtig.        | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Die Ausprägungen sind inhaltlich schlüssig. | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Abbildung 6-1: Beispielhafte Evaluation eines Indikators

Nachdem dieses Vorgehen für alle sieben Modelldimensionen wiederholt wurde, bietet die letzte Seite der Evaluation Platz für allgemeine Anmerkungen und Fragen. Abschließend wird den Teilnehmern für ihre Mithilfe gedankt. Das Vorgehen ist schematisch Abbildung 6-2 dargestellt.

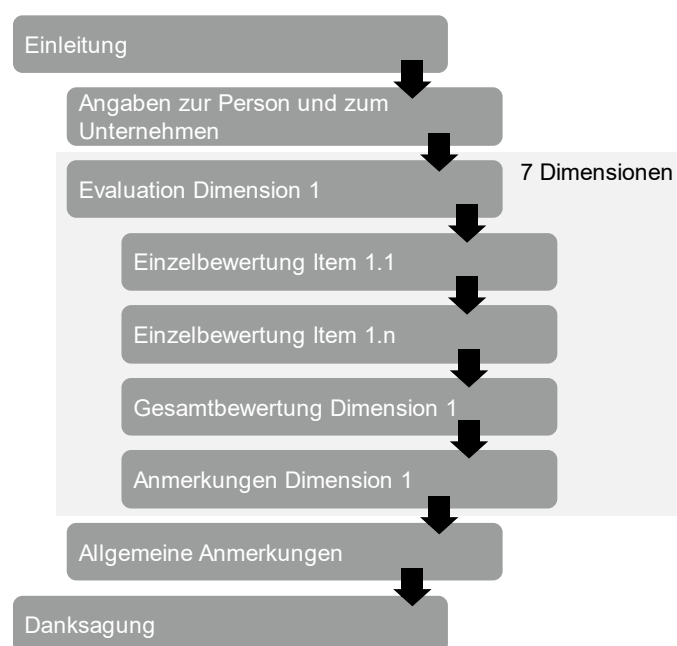


Abbildung 6-2: Schematische Darstellung des Evaluationskonzepts

## 6.2 Durchführung der Evaluation

Während des ersten Projektmeetings des KMU-WisLab DF wurde das Modell den teilnehmenden Vertretern der Partnerunternehmen bereits vorgestellt und die Evaluationsumfrage angekündigt. Im Anschluss wurde der Fragebogen erstellt und den 22 Projektteilnehmern ein Teilnahmelink mitsamt Teilnahmeschlüssel zugesendet. Der Evaluationszeitraum wurde zunächst

auf die Kalenderwochen 32 und 33 festgelegt. Zur Mitte der KW 33 lagen acht vollständig ausgefüllte Fragebögen vor, was noch nicht der gewünschten Partizipationsquote entsprach. Daher wurde der Evaluationszeitraum um eine Woche verlängert und die verbleibenden Teilnehmer in einer personalisierten E-Mail erneut um ihre Unterstützung gebeten. Hierdurch konnten bis zum Ende der KW 34 insgesamt 14 vollständige Fragebögen generiert und somit ca. 64% der Projektpartner erreicht werden (siehe Abbildung 6-3).

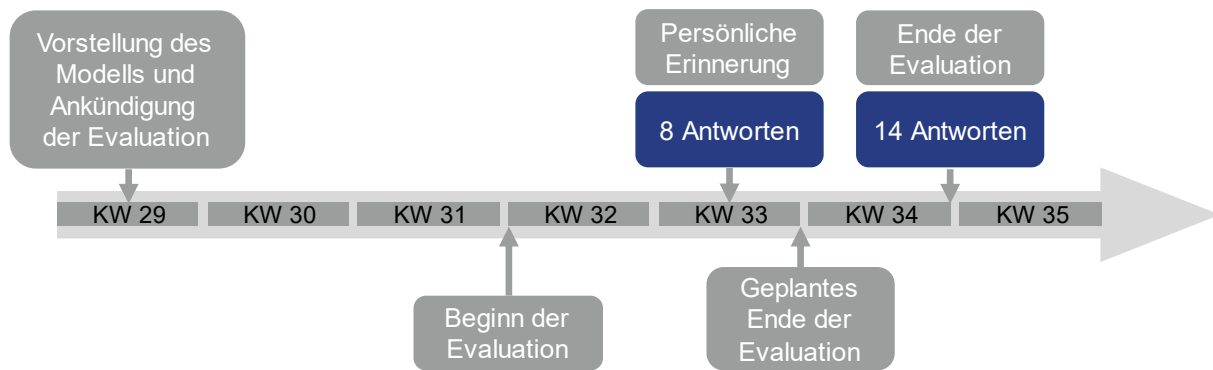


Abbildung 6-3: Schematische Darstellung der Evaluationsdurchführung

### 6.3 Evaluationsergebnisse

Die vollständigen Evaluationsergebnisse sind in Anhang K dargestellt und in die drei Bereiche „Angaben zum Unternehmen“, „Bewertung der Dimensionen und Indikatoren“ sowie „Abschließende Bemerkungen“ aufgeteilt.

Der Blick auf die Unternehmen beziehungsweise Personen, die an der Evaluation teilgenommen haben, offenbart zunächst ein heterogenes Bild. Gemäß der EU-Definition (vgl. Abschnitt 2.2.1) sind zwei Kleinstunternehmen, vier kleine Unternehmen, drei mittlere Unternehmen sowie drei Unternehmen, die bereits als Großunternehmen gelten, vertreten (vgl. Anhang K). Letztere fallen aber immer noch unter den allgemeineren Begriff des Mittelstands. Daher werden ihre Evaluationsergebnisse ebenfalls als relevant angesehen. Insgesamt sind Unternehmen aus neun verschiedenen Branchen vertreten, mit Ausnahme von zwei Unternehmen gehören sie jedoch alle dem produzierenden Gewerbe an. Die befragten Personen decken ein breites Tätigkeitsspektrum ab, wobei zahlreiche Experten, unter anderem je ein IT-, Digitalisierungs-, und KVP-Manager, ein Produktionsleiter sowie mehrere Prozessingenieure, vertreten sind. Die Auswertung der Evaluationsergebnisse der 29 Reifegradindikatoren (vgl. Abbildung 6-1) wird durch MS Excel unterstützt. Um die Ergebnisse besser analysieren zu können, werden den Antwortoptionen der indikatorspezifischen Fragen die in Tabelle 6-1 dargestellten Zahlwerte zugeordnet.

Tabelle 6-1: Zuordnung von Zahlwerten und Antwortoptionen

| Likert-Skala | stimme zu                                                                         | stimme eher zu                                                                    | neutral                                                                           | stimme eher nicht zu                                                                | stimme nicht zu                                                                     |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Symbol       |  |  |  |  |  |
| Zahlwert     | 100%                                                                              | 75%                                                                               | 50%                                                                               | 25%                                                                                 | 0%                                                                                  |

Durch die konstante Intervallbreite von 25 % wird sichergestellt, dass durch die Zuordnung nicht bereits eine Wertung beziehungsweise Gewichtung der Antwortstufen erfolgt. Für jede Frage wird anschließend der Antwort-Mittelwert errechnet, wie beispielhaft an den drei Fragen des Indikators „Sensoren/Aktoren“ der Dimension „Produkte“ in Tabelle 6-2 zu sehen ist.

Tabelle 6-2: Evaluationsergebnisse des Indikators "Sensoren/Aktoren"

| Indikator        | Frage          |  |  |  |  |  |  |
|------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Sensoren/Aktoren | Ist sinnvoll.  | 10                                                                                | 4                                                                                 | 0                                                                                  | 0                                                                                   | 0                                                                                   | 93%                                                                                 |
|                  | Ist wichtig.   | 8                                                                                 | 5                                                                                 | 1                                                                                  | 0                                                                                   | 0                                                                                   | 88%                                                                                 |
|                  | Ist schlüssig. | 8                                                                                 | 6                                                                                 | 0                                                                                  | 0                                                                                   | 0                                                                                   | 89%                                                                                 |

Eine erste Analyse lässt eine grundsätzliche Zustimmung zu den Inhalten des Reifegradmodells vermuten. Gerade ein mal vier der insgesamt 87 indikatorspezifischen Fragen wurde im Mittel nicht zumindest „eher zugestimmt“ (wurden also im Durchschnitt mit unter 75% bewertet). Die vier genannten Fragen betreffen die drei Indikatoren „Flexible und Wandlungsfähige Produktion“, „Datenspeicherung“ und „Interne Kommunikation“. Eine weitere Abstufung der Durchschnittsbewertungen durch das Festlegen zusätzlicher Grenzwerte, also eine Eingrenzung der Analyse auf Aspekte, die im Mittel beispielsweise mit unter 80% bewertet wurden, wäre nur willkürlich umsetzbar. Folglich wird hierauf verzichtet. Stattdessen wird die Analyse der Evaluationsergebnisse fortgeführt, indem die am Ende der Dimensionen und auf der letzten Umfrageseite aufgeführten Anmerkungen gesammelt und nach ihrer Betrachtungsebene – Indikator, Dimension oder Gesamtmodell – sortiert werden. Tabelle 6-3 zeigt alle indikatorspezifischen Kommentare. Es wird deutlich, dass die Befragten ihre Kritik zumeist erläutert und teilweise direkte Verbesserungsvorschläge gegeben haben. Aus obiger Liste der zumindest in Teilen am schlechtesten bewerteten drei Indikatoren finden sich lediglich für die „Interne Kommunikation“, die von drei Befragten als eher unwichtig eingestuft wurde, keine Anmerkungen. Die kritische Würdigung dieser und aller weiteren getroffenen Anmerkungen erfolgt in Abschnitt 6.4.

Tabelle 6-3: Indikatorspezifische Evaluationsergebnisse

| Indikator                                                | Frage     | Ø   | Kommentare                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------------------------------|-----------|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kommunikation/<br>Connectivity                           | sinnvoll  | 82% | „teilweise zu Schnittstellspezifisch“                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                                          | wichtig   | 75% |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                          | schlüssig | 80% |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Flexible &<br>Wandlungsfähige<br>Produktion              | sinnvoll  | 77% | „Erste Ausprägung: Der Begriff Gleichteile passt nicht für jede Produktion. Große Losgrößen und lange Rüstzeiten beschreiben den gleichen Zustand ohne Automobilbezug“                                                                                                                                                   |
|                                                          | wichtig   | 73% |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                          | schlüssig | 77% |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Beschaffungs-<br>prozess                                 | sinnvoll  | 88% | „Es gibt in der Regel nicht einen Beschaffungsprozess und der Digitalisierungsgrad kann in Teilen deutlich abweichend sein, da externe Software/Subunternehmen/Dienstleister hier das Know-How einbringen und so z.B. in der kleinsten "unwichtigsten" Abteilungen der höchste Innovationsgrad herrscht [...]“           |
|                                                          | wichtig   | 89% |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                          | schlüssig | 91% |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Vernetzung der<br>Produktion mit<br>anderen<br>Bereichen | sinnvoll  | 82% | „Vernetzung der Produktion mit anderen Bereichen: Eine Konkretisierung der Auswahlmöglichkeiten, z.B. "Die Produktion erhält alle Anweisungen digital über das ERP-System" etc. machen mMn. mehr Sinn als eine grobe Beschreibung der Möglichkeiten“                                                                     |
|                                                          | wichtig   | 90% |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                          | schlüssig | 82% |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Datenerhebung,<br>-nutzung, und<br>-verarbeitung         | sinnvoll  | 86% | „Nutzung von Big Data kann nur erfolgen, wenn ich auch zuvor über Jahre Daten gesammelt habe“                                                                                                                                                                                                                            |
|                                                          | wichtig   | 82% |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                          | schlüssig | 91% |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Daten-<br>speicherung                                    | sinnvoll  | 71% | „Datenspeicherung Cloud on premise habe ich noch nicht gehört > Lokales Rechenzentrum; Es gibt aber auch noch Hybrid > Lokales Rechenzentrum mit Private und/oder Public Cloud“<br>„Hierarchie Cloud (privat) -->Cloud (public) teile ich so nicht, da es ggf. nur ein Sicherheitsthema abbildet, keine Evolutionsstufe“ |
|                                                          | wichtig   | 70% |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                          | schlüssig | 75% |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Datensicherheit                                          | sinnvoll  | 89% | „Datensicherheit; Der Ort der Sicherung wird hier nicht betrachtet ist aber relevant“                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                                          | wichtig   | 91% |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                          | schlüssig | 86% |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Interne<br>Kollaboration                                 | sinnvoll  | 79% | „Ob ein Unternehmen moderne Werkzeuge zur internen Kollaboration zw. Teams benutzt, ist mehr von Unternehmensgröße und -komplexität abhängig. [...] bei einem Unternehmen mit z.B. 250 Mitarbeiter [...] funktioniert die traditionelle Team-Tafel sehr gut.“                                                            |
|                                                          | wichtig   | 82% |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                          | schlüssig | 88% |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

## 6.4 Kritische Würdigung

Die Evaluation hat gezeigt, dass das entwickelte Reifegradmodell grundsätzlich auf Zustimmung stößt, einzelne Aspekte aber auch zumindest in Teilen kritisiert worden sind.

Eine Erkenntnis aus der Evaluation ist, dass kein Indikator mehrheitlich als nicht sinnvoll und relevant angesehen wird. In Summe sind es mit Ausnahme der „Internen Kommunikation“ (s. o.) nie mehr als zwei befragte Personen, die einen Indikator als (eher) unwichtig und/oder (eher) nicht sinnvoll im KMU-Kontext erachten. Folglich wird kein Indikator aus dem Modell entfernt. Ist ein Indikator für die Prozesse eines Unternehmens nicht wichtig und stellt die Steigerung seines Reifegrades somit kein Unternehmensziel dar, kann dies bei der Anwendung des Reifegradmodells individuell beachtet werden.

Die weitere kritische Würdigung der Evaluationsergebnisse folgt wie im vorherigen Abschnitt erläutert den von den Evaluationsteilnehmern hinterlassenen Anmerkungen, wobei die Dimensionen beziehungsweise einzelnen Indikatoren entsprechend ihrer Reihenfolge im Modell nacheinander betrachtet werden.

In der Dimension „Produkte“ wurde angemerkt, dass der Indikator „Kommunikation/Connectivity“ teilweise zu schnittstellenspezifisch sei. Eine Anbindung der Produkte an das Internet ist ein wesentlicher Gedanke der Industrie 4.0, daher werden die letzten beiden Ausprägungen des Indikators im Grundsatz beibehalten. Sie beschreiben eine kabelgebundene Anbindung an das lokale Datennetz (LAN) respektive eine drahtlose Anbindung an das IoT. Die zweite Ausprägungen, die die Möglichkeit zum Senden und Empfangen einfacher 1/0-Signale beschreibt, ist zudem bereits unabhängig von einem bestimmten Schnittstellentyp. Es verbleibt die dritte Ausprägung des Indikators, die eine Kommunikation mittels Feldbus beschreibt. Diese Ausprägung wird ersetzt durch die allgemeinere Möglichkeit des Produkts, mittels einer Schnittstelle, die ein Kommunikationsprotokoll (Wikipedia 2020b) nutzt, zu kommunizieren. Der Einsatz eines Protokolls ermöglicht eine Erweiterung der kommunizierbaren Inhalte gegenüber einfachen 1/0-Signalen, eine Internetanbindung ist hier jedoch noch nicht vorhanden. In der Dimension wurde zudem angemerkt, dass ein autonomer Datenaustausch nicht für jede Produktkategorie sinnvoll sei und beispielsweise Verpackungsmaterial eine Ausnahme bilde. Auch hier gilt es wieder, während der Reifegradermittlung den individuellen Anwendungsfall zu beachten und nur Produkte, bei denen eine Vernetzung auch Nutzenpotenziale verspricht, nach den genannten Kriterien zu bewerten. Des Weiteren wurde betont, dass beachtet werden müsse, ob das Produkt fähig ist, neue Geschäftsbereiche zu generieren. Dieser Aspekt ist jedoch in der letzten Modelldimension „Geschäftsmodell und Netzwerk“ abgedeckt.

Für den Indikator „Flexible und Wandlungsfähige Produktion“ wurde die Empfehlung ausgesprochen, den Ausdruck „Gleichteile“, der vor allem im Maschinen- und Fahrzeugbau verwendet wird, zu ersetzen. Statt durch einen geringen beziehungsweise hohen Anteil Gleichteile werden die ersten beiden Ausprägung des Indikators nun durch Losgrößen und Rüstzeiten beschrieben.

Bezügliches des „Beschaffungsprozess(es)“ wurde angemerkt, dass dieser innerhalb eines Unternehmens stark unterschiedlich ausgeprägt sein könne, da er maßgeblich von der Software und dem Knowhow, das die Zulieferer einbringen, beeinflusst werde. Dieser Umstand lässt sich im Modell selbst schwer beachten und muss bei der Reifegradermittlung im Unternehmen individuell berücksichtigt werden. Erfolgskritische, aber digital noch unausgereifte Prozesse müssen hierbei identifiziert werden.

In der Dimension „Daten und IT“ wurden mehrere Indikatoren kritisiert. Zunächst wird empfohlen, die Ausprägungen des Indikators „Vernetzung der Produktion“ zu konkretisieren und die

Verwendung des ERP-Systems als Informationsquelle zu berücksichtigen, was so auch umgesetzt wird. Bezüglich der „Datenerhebung, -nutzung, und -verarbeitung“ wurde betont, dass die Nutzung von Big Data Werkzeugen zunächst das Vorhandensein entsprechender Datensätze, deren Erhebung teils über Jahre erfolge, erfordere. Gerade in der Produktion liegen die Potenziale von Big Data jedoch in der Prognose und Früherkennung von Problemen auf Basis gegenwartsbezogener Maschinen-, Produkt- und Umgebungsdaten (Bitkom 2014, S. 38). Hierfür müssen keine weit in die Vergangenheit reichenden Datensätze vorliegen. Daher wird die Anmerkung nur begrenzt umgesetzt und ergänzt, dass je nach Analysezweck die entsprechenden, gegebenenfalls historischen Datenmengen vorliegen müssen. Beim Indikator „Datenspeicherung“ in der Cloud herrschte Unsicherheit bezüglich der Bezeichnung „Cloud on-premise“. Diese Bezeichnung ist in der Tat missverständlich gewählt, da on-premise Lösungen nicht das Nutzen von Cloud-Servern im eigentlichen Sinne, sondern lediglich das Anmieten der Softwarekomponente zum Betreiben interner Datenserver beschreiben (vgl. Abschnitt 5.4). Entsprechend wird dieser Indikator sprachlich angepasst. Für den Indikator „Datensicherheit“ wurde angemerkt, dass der Ort der Datenspeicherung ebenfalls berücksichtigt werden müsse. Eine auf viele Medien verteilte, unstrukturierte Speicherung birgt ein hohes Datenverlustrisiko durch menschliche Fehler. Eine Speicherung auf einem einzigen, zentralen Server ist dagegen hinsichtlich eines etwaigen technischen Ausfalls deutlich risikobehafteter. Vor technischem und menschlichem Versagen sicher ist letztlich erst die Sicherung in einer dezentralen Cloud (VerbundFDB 2020). Hierdurch entstehen zugleich jedoch neue Sicherheitsfragen, die allerdings den Indikator „IT-Sicherheit“ betreffen. Diese Überlegungen werden in das Modell aufgenommen.

Zuletzt wurde für den Indikator „Interne Kollaboration“ ergänzt, dass die Nutzung moderner Werkzeuge zur internen Kollaboration stark von der Unternehmensgröße und -komplexität abhängig sei. In KMU trauten sich demnach viele Mitarbeiter den Einsatz moderner IT-Tools nicht zu, weshalb eine traditionelle Teamtafel besser funktioniere. Hierbei muss betont werden, dass der Fokus des Indikators nicht auf den Kollaborationsmedien, sondern auf den Kollaborationsmöglichkeiten im Sinne dynamischer Arbeitsgruppen liegt. Die Teamtafel kann als formaler Kanal zum Informationsaustausch dienen und wird der zweiten Reifegradstufe als BeispielmEDIUM ergänzt. In einem agilen Unternehmen, wie es ab der Stufe des „Fortgeschrittenen“ vorliegt, ist eine Zusammenarbeit ohne Unterstützung durch IT-basierte Kollaborationsplattform jedoch schwer denkbar.

Darüber hinaus wurde folgende Kritik geäußert:

Eine befragte Person gab zu Beginn der Evaluation unter den Dimensionen „Produkte“ und „Produktion“ mehrfach an, dass eine Betrachtung der Mensch-Maschine-Schnittstelle, des E-Learnings zur Mitarbeiterschulung und der Ressourceneffizienz fehlten. Abgesehen vom letzten Aspekt werden diese Punkte jedoch alle in späteren Modelldimensionen aufgegriffen. Der

Aspekt der Ressourceneffizienz wird daher hinsichtlich einer möglichen Aufnahme in das Reifegradmodell überprüft. Ressourceneffizienz spiegelt sich zunächst nicht in einer konkreten Einzelmaßnahme oder Technologie wider, sondern kann als eines der Ziele von Industrie 4.0 nur im Zusammenspiel mehrerer Aspekte erreicht werden. Im Wesentlichen kann die Ressourceneffizienz durch eine durchgängige Datenintegration und Zustandsüberwachung gesteigert werden. Relevante Daten stellen hierbei die im Unternehmen genutzte elektrische und thermische Energie, die eingesetzten Roh- und Betriebsstoffe, abgegebene spezifische Emissionen und entstehende Abfälle dar. Werden diese Daten in gleichem Maße wie die klassischen Produktionsdaten erhoben und analysiert, können Potenziale zur Effizienzsteigerung erkannt und Maßnahmen abgeleitet und umgesetzt werden. Die Definition möglicher Ausprägungen des Indikators „Ressourceneffizienz“, der am ehesten in der Dimension „Daten und IT“ einzuordnen wäre, ist entsprechend sehr ähnlich zu der des Indikators „Datenerhebung, -nutzung, und -verarbeitung (in der Produktion)“. (VDI ZRE 2017, S. 169)



Abbildung 6-4: Potenzieller Modellindikator "Ressourceneffizienz"

In Abbildung 6-4 findet sich eine mögliche Umsetzung des Indikators. Aufgrund der großen Überschneidungen mit anderen Indikatoren und dem Mangel an neuen Erkenntnissen wird der Aspekt der Ressourceneffizienz nicht als eigener Indikator in das Modell übernommen. Stattdessen kann die Erfassung und Nutzung von Daten zu Ressourcenverbräuchen innerhalb des bestehenden Indikators „Datenerhebung, -nutzung, und -verarbeitung“ mitberücksichtigt werden.

Der Vertreter des Handelsunternehmens betont, dass die Dimensionen „Produkte“ und „Produktion“ großteils nicht auf den Handel übertragbar seien und dass ein betrachteter Prozess innerhalb eines Unternehmens allgemein vollkommen unterschiedliche Reifegrade aufweisen könne. Hier empfiehlt er die Betrachtung von Anteilen statt Indikatoren, womit vermutlich eine Gewichtung der Aspekte gemeint ist. Sowohl eine Differenzierung der Betrachtung in verschiedene Unternehmensbereiche mit etwaiger unterschiedlicher Industrie 4.0-Reife als auch eine Gewichtung der Inhalte wird vom Reifegradmodell in seinem derzeitigen Stand nicht abgedeckt. Eine zusätzliche Aufspaltung der Betrachtung in Unternehmensbereiche würde zum einen den Rahmen dieser Arbeit sprengen und zum anderen für die Anwendung in KMU deutlich zu umfangreich sein. Auch eine Gewichtung ist im vorgeschlagenen Modell nicht vorgesehen. Das Modell wird mit Unterstützung der Projektmitarbeiter/-innen des KMU-WisLab DF angewendet werden, weshalb bei der Reifegradermittlung stets die individuellen Gegebenheiten

ten des jeweiligen Unternehmens berücksichtigt werden können. In diesem Zuge kann ermittelt werden, in welchen Bereichen des Unternehmens die Digitale Transformation relevante Wertschöpfungspotenziale bietet. Diese können sowohl bei der Reifegradermittlung als auch bei der späteren Ableitung von Handlungsmaßnahmen priorisiert werden. Eine allgemeingültige Gewichtung und Aufteilung des Unternehmens in Bereiche oder -prozesse sind vor dem Hintergrund der Heterogenität der KMU-Landschaft (vgl. Abschnitt 2.2.3) schwierig und nicht zwangsläufig sinnvoll.

Die zuvor beschriebenen Anpassungen wurden in das Modell übertragen. Eine aktualisierte Version des vollständigen Modells befindet sich in L.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird eine KMU-spezifische Einschätzungsmethode der Unternehmenssituation im Kontext von Industrie 4.0 entwickelt, vorgestellt und evaluiert. Grundlage hierfür bildet eine Literaturrecherche in fünf Datenbanken, die der Ermittlung bestehender Industrie 4.0-Reifegradmodelle dient.

In Kapitel 2 werden die dafür notwendigen theoretischen Grundlagen aufgezeigt. Zuerst wird die Industrie 4.0 eingeführt, indem die wesentlichen Begrifflichkeiten erklärt werden und eine Einordnung in die Historie vergangener industrieller Revolutionen erfolgt. Darüber hinaus werden die Charakteristika der Digitalen Transformation, die mit ihr einhergehenden Anforderungen an die Digitale Fabrikplanung sowie Potenziale und Hemmnisse aufgezeigt. Anschließend werden in Abschnitt 2.2 KMU eingeführt, indem sie definiert werden und ihre wirtschaftliche Bedeutung sowie ihre charakteristischen Eigenschaften und Geschäftsprozesse dargestellt werden. Zuletzt wird in Abschnitt 2.3 der theoretische Hintergrund der darauffolgenden Literaturrecherche gelegt. Hierfür werden Recherchesystematiken und -medien sowie mögliche Vorgehensmodelle und Bewertungsmethoden vorgestellt.

Der Betrachtung der erforderlichen Grundlagen schließt sich die Durchführung der Literaturrecherche und -analyse in Kapitel 3 an. Hierbei wird zunächst die gewählte Systematik vorgestellt, dann der Prozess der Recheredurchführung, der auch die Selektion der Rechercheergebnisse und das Bilden der Ergebnisliste umfasst, geschildert. Daraufhin werden die identifizierten Industrie 4.0-Reifegradmodelle aus der Literatur beschrieben und hinsichtlich ihrer Gemeinsamkeiten und Unterschiede untersucht. Die Ergebnisse der Analyse sind zusammengefasst in Abschnitt 3.5 dargestellt.

Als Grundlage für die Erstellung der Einschätzungsmethode werden in Kapitel 4 die identifizierten Reifegradmodelle hinsichtlich ihrer Eignung zur Anwendung in KMU bewertet. Dafür werden zunächst die Bewertungsmethode, -kriterien und -skala definiert. Die Kriterien ergeben sich dabei aus den im Rahmen der theoretischen Grundlagen aufgezeigten Eigenschaften von KMU. Der Bewertung schließt sich eine Handlungsempfehlung an, in der die Bewertungsergebnisse zusammengefasst und die hinsichtlich der Neuentwicklung eines Reifegradmodells abgeleiteten Erkenntnisse dargestellt werden.

Die eigentliche Entwicklung der KMU-spezifischen Einschätzungsmethodik erfolgt schließlich in Kapitel 5. Dabei werden zunächst die Anforderungen an die Methodik zusammengefasst, anschließend geeignete Digitalisierungsstufe als Teil des Modells definiert und die Methode auf Basis der Ergebnisse des vierten Kapitels erstellt. Eine ausführliche Vorstellung des Modells und seiner einzelnen Betrachtungsebenen (Dimensionen) sowie der zugehörigen Konzepte und Technologien (Indikatoren) schließt das Kapitel ab.

Das entstandene Reifegradmodell wurde durch das Projektkonsortium des KMU-WisLab DF, in dessen Forschungsarbeit sich diese Arbeit eingliedert, evaluiert. Das zugrundeliegende Evaluationskonzept und der Prozess der Evaluationsdurchführung sowie die erhaltenen Ergebnisse werden im sechsten Kapitel erläutert. Eine Kritische Würdigung der Evaluationsergebnisse schließt diese Arbeit ab.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Industrie 4.0-Reifegradmodell kann nun in die weiteren Aktivitäten des KMU-WisLab DF eingebunden werden. Im Rahmen der Evaluation, die durch Vertreter genau der Unternehmen, in denen es auch angewendet werden soll, erfolgte, konnte die grundsätzliche Eignung des Reifegradmodells für den vorliegenden Anwendungsfall nachgewiesen werden. Das erhaltene Feedback wurde genutzt, um Anpassungen am Modell vorzunehmen, was die Eignung und Anwendbarkeit des Modells aller Wahrscheinlichkeit nach weiter erhöht hat. Um dies zu verifizieren, müsste jedoch eine erneute Evaluation durchgeführt werden.

Darüber hinaus wurden im Rahmen der Evaluation aber auch Schwachstellen aufgezeigt, deren Ausbesserung eine grundsätzliche Restrukturierung des Modells erfordern würde. Eine solche Schwachstelle stellt die Anwendbarkeit des Modells in nicht-produzierenden Unternehmen dar.

Im weiteren Projektverlauf wird das Reifegradmodell durch eine Interviewstudie ergänzt. Der zugehörige Fragenkatalog wird im Rahmen einer anderen Arbeit erstellt und schließlich durch die Projektmitarbeiter/-innen in den Partnerunternehmen erhoben. Anhand dieser Ergebnisse wird das Unternehmen anschließend in die hier vorgestellte Methodik eingeordnet und somit sein Status Quo bezüglich der Digitalen Transformation aufgezeigt. Die Identifikation bestehender Problemfelder ermöglicht die Ausarbeitung unternehmensspezifischer Planungs- und Experimentierszenarien. Aus diesen werden schließlich Workshops, die die Unternehmen an der Universität Kassel absolvieren können, abgeleitet. Es entsteht eine bedarfsorientierte Unterstützungsmöglichkeit, die KMU den Aufbau einschlägiger Industrie 4.0-Kompetenzen ermöglicht.

Es wird deutlich, dass das in dieser Arbeit entwickelte Industrie 4.0-Reifegradmodell die Basis für die weiteren Projektaktivitäten des KMU-WisLab DF bildet. Damit leistet es einen Beitrag zur bedarfsorientierten Förderung nordhessischer KMU auf ihrem Weg zur Industrie 4.0 und unterstützt sie bei der Erschließung bestehender, bisher ungenutzter Wertschöpfungspotenziale.

## Literaturverzeichnis

- acatech; Forschungsunion (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Online verfügbar unter: [https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen\\_Industrie4\\_0.pdf](https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf); Zugriff am 22.04.2020.
- Agca, O.; Gibson, J.; Godsell, J.; Ignatius, J.; Davies, C. Wyn; Xu, O. (2017): An Industry 4 readiness assessment tool. Online verfügbar unter: [https://warwick.ac.uk/fac/sci/wmg/research/scip/reports/final\\_version\\_of\\_i4\\_report\\_for\\_use\\_on\\_websites.pdf](https://warwick.ac.uk/fac/sci/wmg/research/scip/reports/final_version_of_i4_report_for_use_on_websites.pdf); Zugriff am 07.08.2020.
- Akdil, K. Yagiz; Ustundag, A.; Cevikcan, E. (2018): Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy. In: Industry 4.0: Managing The Digital Transformation, Springer International Publishing, S. 61–94, Cham.
- Akkasoglu, G. (2013): Methodik zur Konzeption und Applikation anwendungsspezifischer Reifegradmodelle unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Nürnberg. Online verfügbar unter: <https://opus4.kobv.de/opus4-fau/frontdoor/index/index/year/2014/docId/4121>; Zugriff am 26.08.2020.
- Altuntas, M.; Uhl, P. (2016): Grundlagen der Entwicklung von Reifegradmodellen. In: Altuntas, M. (Hrsg.): Industrielle Exzellenz in der Versicherungswirtschaft, Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 127–133, Wiesbaden.
- Andelfinger, V. P.; Hänisch, T. (2017): Industrie 4.0. Wie cyber-physische Systeme die Arbeitswelt verändern. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Anderl, R. (2015): Leitfaden Industrie 4.0. Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand. Online verfügbar unter: [https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/5356229/VDMA\\_Leitfaden\\_I40\\_neu.pdf/762e5ad4-978a-4e4a-bece-47fac3df4a86](https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/5356229/VDMA_Leitfaden_I40_neu.pdf/762e5ad4-978a-4e4a-bece-47fac3df4a86); Zugriff am 20.05.2020.
- Asdecker, B.; Felch, V. (2018): Development of an Industry 4.0 maturity model for the delivery process in supply chains. In: Journal of Modelling in Management (JM2), Jg. 13 (2018), H. 4, S. 840–883.
- Back, A.; Berghaus, S. (2016): Digital Maturity & Transformation Studie. Über das Digital Maturity Model. Online verfügbar unter: [https://aback.iwi.unisg.ch/fileadmin/projects/aback/web/pdf/digitalmaturitymodel\\_download\\_v2.0.pdf](https://aback.iwi.unisg.ch/fileadmin/projects/aback/web/pdf/digitalmaturitymodel_download_v2.0.pdf); Zugriff am 07.08.2020.

- Bandara, O. K. K.; Tharaka, V. K.; Wickramarachchi, A. P. R. (2019): Industry 4.0 maturity assessment of the Banking Sector of Sri Lanka. In: 2019 International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE), IEEE, S. 190–195.
- Basl, J. (2017): Pilot Study of Readiness Of Czech Companies To Implement The Principles Of Industry 4.0. In: Management and Production Engineering Review (MPER), Jg. 8 (2017), H. 2, S. 3–8.
- Basl, J. (2018): Analysis of Industry 4.0 Readiness Indexes and Maturity Models and Proposal of the Dimension for Enterprise Information Systems. In: Tjoa, A. M. (Hrsg.): Research and Practical Issues of Enterprise Information Systems, Springer International Publishing, S. 57–68.
- Basl, J.; Doucek, P. (2019): A Metamodel for Evaluating Enterprise Readiness in the Context of Industry 4.0. In: Information, Jg. 10 (2019), H. 3.
- Bauernhansl, T. (2017): Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Bd. 4: Allgemeine Grundlagen, Springer Vieweg, S. 1–31, Berlin.
- Bauernhansl, T.; Krüger, J.; Reinhart, G.; Schuh, G. (2016): WGP-Standpunkt Industrie 4.0. Online verfügbar unter: [https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Presse/Presseinformationen/2016/Juni/WGP\\_Standpunkt\\_Industrie\\_40.pdf](https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Presse/Presseinformationen/2016/Juni/WGP_Standpunkt_Industrie_40.pdf); Zugriff am 22.04.2020.
- BCG Global (2018): Embracing Industry 4.0 and Rediscovering Growth. Online verfügbar unter: <https://www.bcg.com/capabilities/operations/embracing-industry-4.0-rediscovering-growth>; Zugriff am 08.08.2020.
- Becker, J.; Knackstedt, R.; Pöppelbuß, J. (2009): Entwicklung von Reifegradmodellen für das IT-Management. In: Wirtsch. Inform., Jg. 51 (2009), H. 3, S. 249–260.
- Becker, W.; Ulrich, P.; Botzkowski, T. (2017): Industrie 4.0 im Mittelstand. Best Practices und Implikationen für KMU. Springer Gabler, Wiesbaden (Management und Controlling im Mittelstand).
- Benias, N.; Markopoulos, A. P. (2017): A review on the readiness level and cyber-security challenges in Industry 4.0. In: 2017 South Eastern European Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM), IEEE, S. 1–5.
- Bertelsmann Stiftung (2018): Zukunft der Arbeit in deutschen KMU. Online verfügbar unter: <https://www.bertelsmann->

- stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/Zukunft\_der\_Arbeit\_in\_deutschen\_KMU\_Werkstattbericht.pdf; Zugriff am 07.05.2020.
- Bibby, L.; Dehe, B. (2018): Defining and assessing industry 4.0 maturity levels - case of the defence sector. In: Production Planning & Control, Jg. 29 (2018), H. 12, S. 1030–1043.
- Biegler, C.; Steinwender, A.; Sala, A.; Sihm, W.; Rocchi, V. (2018): Adoption of Factory of the Future Technologies. Concept of an impact indicator system to track the path towards the Factory of the Future. In: 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE ITMC), IEEE, S. 1–8.
- Bischoff, J. (Hrsg.) (2015): Erschließen der Potenziale der Anwendung von Industrie 4.0 im Mittelstand. Kurzfassung der Studie. Online verfügbar unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/erschliessen-der-potenziale-der-anwendung-von-industrie-4-0-im-mittelstand.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/erschliessen-der-potenziale-der-anwendung-von-industrie-4-0-im-mittelstand.pdf?__blob=publicationFile&v=5); Zugriff am 22.04.2020.
- Bitkom (Hrsg.) (2014): Big Data Technologien - Wissen für Entscheider. Leitfaden. Online verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/sites/default/files/file/import/140228-Big-Data-Technologien-Wissen-fuer-Entscheider.pdf>; Zugriff am 08.09.2020.
- Bitkom; VDMA; ZVEI (2016): Implementation Strategy Industrie 4.0. Report on the results of the Industrie 4.0 Platform. Online verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/sites/default/files/file/import/2016-01-Implementation-Strategy-Industrie40.pdf>; Zugriff am 09.08.2020.
- Bittighofer, D.; Dust, M.; Irslinger, A.; Liebich, M.; Martin, L. (2018): State of Industry 4.0 Across German Companies. In: 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE ITMC), IEEE, S. 1–8.
- BMI (2020): Organisationshandbuch - Qualitative Bewertungsmethoden. Online verfügbar unter: [https://www.orghandbuch.de/OHB/DE/Organisationshandbuch/6\\_MethodenTechniken/65\\_Wirtschaftlichkeitsuntersuchung/652\\_Qualitative/qualitative-node.html](https://www.orghandbuch.de/OHB/DE/Organisationshandbuch/6_MethodenTechniken/65_Wirtschaftlichkeitsuntersuchung/652_Qualitative/qualitative-node.html); Zugriff am 30.09.2020.
- BMWi (2015): Industrie 4.0 und Digitale Wirtschaft. Impulse für Wachstum, Beschäftigung und Innovation. Online verfügbar unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/I/industrie-4-0-und-digitale-wirtschaft.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/I/industrie-4-0-und-digitale-wirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=3); Zugriff am 22.04.2020.
- BMWi (Hrsg.) (2016): IT-Security in der Industrie 4.0. Handlungsfelder für Betreiber. Online verfügbar unter: <https://www.plattform->

- i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/leitfaden-it-security-i40.pdf?\_\_blob=publicationFile; Zugriff am 20.08.2020.
- Bogner, E.; Voelklein, T.; Schroedel, O.; Franke, J. (2016): Study Based Analysis on the Current Digitalization Degree in the Manufacturing Industry in Germany. In: *Procedia CIRP*, Jg. 57 (2016), S. 14–19.
- Boland, A.; Cherry, M. G.; Dickson, R. (2017): *Doing a systematic review. A student's guide.* 2nd edition. SAGE Publications Ltd, London.
- Booth, A.; Papaioannou, D.; Sutton, A. (2012): *Systematic Approaches to a Successful Literature Review.* SAGE, Los Angeles.
- Bosse, C.; Zink, K. (2019): *Arbeit 4.0 im Mittelstand. Chancen und Herausforderungen des digitalen Wandels für KMU.* Springer Gabler, Berlin, Heidelberg.
- Botha, A. P. (2018): Rapidly Arriving Futures. Future Readiness For Industry 4.0. In: *South African Journal of Industrial Engineering (SAJIE)*, Jg. 29 (2018), H. 3, S. 148–160.
- Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S. (2018): *Digitale Fabrik.* Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- Braun, T. (2017): *Chancen und Risiken von Industrie 4.0 für kleine und mittlere Unternehmen. Eine Untersuchung am Beispiel der mittelständischen Automobilzulieferer.* 1st ed. Diplomica Verlag, Hamburg.
- Brettschneider, F. (Hrsg.) (2017): *Interne Kommunikation neu gedacht. Perspektiven der Digitalisierung.* Online verfügbar unter: [https://komm.uni-hohenheim.de/fileadmin/einrichtungen/komm/PDFs/Komm/Unternehmenskomm/Interne\\_Kommunikation\\_neu\\_gedacht.pdf](https://komm.uni-hohenheim.de/fileadmin/einrichtungen/komm/PDFs/Komm/Unternehmenskomm/Interne_Kommunikation_neu_gedacht.pdf); Zugriff am 20.08.2020.
- Brozzi, R.; D'Amico, R. D.; Pasetti Monizza, G.; Marcher, C.; Riedl, M.; Matt, D. (2018): Design of Self-assessment Tools to Measure Industry 4.0 Readiness. A Methodological Approach for Craftsmanship SMEs. In: *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Jg. 540 (2018), S. 566–578.
- Brunner, M.; Jodlbauer, H.; Schagerl, M. (2016): Reifegradmodell Industrie 4.0. Unternehmen durch Industrie 4.0 stärken. In: *Industrie 4.0 Management*, Jg. 32 (2016), H. 5, S. 49–52.
- Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H.-J.; Westkämper, E. (2009): *Handbuch Unternehmensorganisation.* Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Buxmann, P.; Hess, T.; Ruggaber, R. (2009): Internet der Dienste. In: *Wirtschaftsinformatik*, Jg. 51 (2009), H. 5, S. 393–395.

- Cabral Pereira dos Santos, Kassio; Freitas Rocha Loures, E. de; Canciglieri, O. jun.; Alves Portela Santos, E. (2018): Product Lifecycle Management Maturity Models in Industry 4.0. In: IFIP Advances in Information and Communication Technology, Jg. 540 (2018), S. 659–669.
- Canetta, L.; Barni, A.; Montini, E. (2018): Development of a Digitalization Maturity Model for the Manufacturing Sector. In: 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE ITMC), IEEE, S. 1–7.
- Castelo-Branco, I.; Cruz-Jesus, F.; Oliveira, T. (2019): Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union. In: Computers in Industry, Jg. 107 (2019), S. 22–32.
- Chonsawat, N.; Sopadang, A. (2019): The Development of the Maturity Model to evaluate the Smart SMEs 4.0 Readiness. Online verfügbar unter: <http://www.ieomsociety.org/ieom2019/papers/97.pdf>; Zugriff am 07.08.2020.
- Chromjakova, F. (2016): Flexible man-man motivation performance management system for Industry 4.0. In: International Journal of Management Excellence, Jg. 7 (2016), H. 2, S. 829–840.
- Colli, M.; Berger, U.; Bockholt, M.; Madsen, O.; Møller, C.; Wæhrens, B. Vejrum (2019): A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era. In: Annual Reviews in Control, Jg. 48 (2019), S. 165–177.
- Colli, M.; Madsen, O.; Berger, U.; Møller, C.; Wæhrens, B. Vejrum; Bockholt, M. (2018): Contextualizing the outcome of a maturity assessment for Industry 4.0. In: IFAC-PapersOnLine, Jg. 51 (2018), H. 11, S. 1347–1352.
- De Carolis, A.; Macchi, M.; Negri, E.; Terzi, S. (2017): A Maturity Model for Assessing the Digital Readiness of Manufacturing Companies. In: Lödding, H. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing, Springer International Publishing, S. 13–20.
- Demircan Keskin, F.; Kabasakal, İ.; Kaymaz, Y.; Soyuer, H. (2019): An Assessment Model for Organizational Adoption of Industry 4.0 Based on Multi-criteria Decision Techniques. In: Durakbasa, N. M. (Hrsg.): Proceedings of the International Symposium for Production Research 2018, Springer International Publishing, S. 85–100.
- Dennis, M.; Ramaswamy, C.; Ameen, M. N.; Jayaram, V. (2017): Asset Performance Management Maturity Model. Strategic Roadmap to Digital Manufacturing. Online verfügbar unter: [https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2017/08/asset\\_performance\\_management\\_maturity\\_model\\_paper\\_web\\_version.pdf](https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2017/08/asset_performance_management_maturity_model_paper_web_version.pdf); Zugriff am 07.08.2020.

VDI 4499 Blatt 1, 2008: Digitale Fabrik - Grundlagen.

Dombrowski, U.; Ernst, S.; Reimer, A. (2018): Fabrikplanung. In: Dombrowski, U. (Hrsg.): Klimaling - Planung klimagerechter Fabriken, Springer Vieweg, S. 51–80, Berlin, Heidelberg.

EDB Singapore (2017): The Singapore Smart Industry Readiness Index. Catalysing the transformation of manufacturing. Online verfügbar unter: <https://www.edb.gov.sg/content/dam/edb-japan/key-activities/advanced-manufacturing/the-singapore-smart-industry-readiness-index/the-sg-smart-industry-readiness-index-whitepaper.pdf>; Zugriff am 09.08.2020.

El Hamdi, S.; Oudani, M.; Abouabdellah, A. (2020): Morocco's Readiness to Industry 4.0. In: Smart Innovation, Systems and Technologies, Jg. 146 (2020), S. 463–472.

Ematinger, R. (2018): Von der Industrie 4.0 zum Geschäftsmodell 4.0. Chancen der digitalen Transformation. Springer Gabler, Wiesbaden (essentials).

VDI 5200 Blatt 1, 2011: Fabrikplanung - Planungsvorgehen.

Facchini, F.; Digiesi, S.; Mossa, G.; Mummolo, G. (2018): Evaluating the I4.0 transformation readiness of agri-food companies: from factories to smart factories. Online verfügbar unter: <http://www.summerschool-aidi.it/cms/extra/papers/1363.pdf>; Zugriff am 07.08.2020.

Fechtelpeter, C.; Heim, Y.; Löffler, T.; Niewöhner, N. (2019): Vorstudie zur Entwicklung einer bedarfs- und nutzergerechten Unterstützung von KMU bei der Einführung und Anwendung von Industrie 4.0. Online verfügbar unter: [https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/KMU-Vorstudie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/KMU-Vorstudie.pdf?__blob=publicationFile&v=5); Zugriff am 22.04.2020.

Fink, A. (2020): Conducting research literature reviews. From the internet to paper. Fifth edition. SAGE, Los Angeles.

Franke, F.; Kempe, H.; Klein, A.; Rumpf, L.; Schüller-Zwierlein, A. (2014): Schlüsselkompetenzen. Literatur recherchieren in Bibliotheken und Internet. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Verlag J.B. Metzler, Stuttgart, Weimar.

Fraunhofer ISI (2015): Internet-based self-assessment instrument Industrie 4.0 for Baden-Württemberg. Online verfügbar unter: [https://www.isi.fraunhofer.de/en/competence-center/politik-gesellschaft/projekte/readiness\\_i4-0.html](https://www.isi.fraunhofer.de/en/competence-center/politik-gesellschaft/projekte/readiness_i4-0.html); Zugriff am 08.08.2020.

Fraunhofer-Allianz Cloud Computing (2020): Was bedeutet Public, Private, Hybrid Cloud? Online verfügbar unter: <https://www.cloud.fraunhofer.de/de/faq/publicprivatehybrid.html>; Zugriff am 20.08.2020.

- Gajsek, B.; Marolt, J.; Rupnik, B.; Lerher, T.; Sternad, M. (2019): Using Maturity Model And Discrete-Event Simulation For Industry 4.0 Implementation. In: International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM), Jg. 18 (2019), H. 3, S. 488–499.
- Gajšek, B.; Sternad, M. (2018): Maturity Levels For Logistics 4.0 Based On Nrw'S Industry 4.0 Maturity Model. In: 2018: Proceedings of The 18th International Scientific Conference Business Logistics in Modern Management, S. 695–708.
- Ganzarain, J.; Errasti, N. (2016): Three Stage Maturity Model in SME's towards Industry 4.0. In: Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM), Jg. 9 (2016), H. 5, S. 1119–1128.
- Gärtner, B. (2018): Bereit für Industrie 4.0? Standortbestimmung mit dem Maturity Index. In: Industrie Management (2018), H. 1, S. 59–62.
- Gärtner, B. (2018): Industrie 4.0 Maturity Index. Mit individueller Roadmap zur vernetzten Produktion. In: Der Betriebsleiter (2018), H. 4, S. 14.
- Geissbauer, R.; Vedso, J.; Schrauf, S. (2016): Industry 4.0: Building the digital enterprise. Online verfügbar unter: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>; Zugriff am 07.08.2020.
- Gill, M.; VanBoskirk, S. (2016): The Digital Maturity Model 4.0. Benchmarks: Digital Business Transformation Playbook. Online verfügbar unter: <https://forrester.nitro-digital.com/pdf/Forrester-s%20Digital%20Maturity%20Model%204.0.pdf>; Zugriff am 07.08.2020.
- Gökalp, E.; Sener, U.; Eren, P. Erhan (2017): Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM. In: Mas, A. (Hrsg.): Software Process Improvement and Capability Determination, Springer International Publishing, S. 128–142.
- Günthner, W.; Klenk, E.; Tenerowicz-Wirth, P. (2017): Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0. In: Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Bd. 4: Allgemeine Grundlagen, Springer Vieweg, S. 99–125, Berlin.
- Häberer, S.; Lau, L. Katrin; Behrendt, F. (2017): Development of an Industrie 4.0 Maturity Index for Small and Medium-Sized Enterprises. Online verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/320415942\\_Development\\_of\\_an\\_Industrie\\_4\\_0\\_Maturity\\_Index\\_for\\_Small\\_and\\_Medium-Sized\\_Enterprises](https://www.researchgate.net/publication/320415942_Development_of_an_Industrie_4_0_Maturity_Index_for_Small_and_Medium-Sized_Enterprises); Zugriff am 07.08.2020.
- Halenár, I.; Juhásová, B.; Juhás, M. (2016): Design of a Communication Scheme in a Modern Factory in Accordance with the Standard of Industry 4.0. In: Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology, Jg. 24 (2016), H. 39, S. 101–109.

- Hamidi, S. Rahah; Aziz, A. Abdul; Shuhidan, S. Mohammed; Aziz, A. Abdul; Mokhsin, M. (2018): SMEs Maturity Model Assessment of IR4.0 Digital Transformation. In: Lokman, A. M. (Hrsg.): Proceedings of the 7th International Conference on Kansei Engineering and Emotion Research 2018, Springer Nature, S. 721–732.
- Hankel, M. (2015): Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0). Online verfügbar unter: [https://www.zvei.org/fileadmin/user\\_upload/Themen/Industrie\\_4.0/Das\\_Referenzarchitekturmodell\\_RAMI\\_4.0\\_und\\_die\\_Industrie\\_4.0-Komponente/pdf/ZVEI-Faktenblatt-Industrie4\\_0-RAMI-4\\_0.pdf](https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Themen/Industrie_4.0/Das_Referenzarchitekturmodell_RAMI_4.0_und_die_Industrie_4.0-Komponente/pdf/ZVEI-Faktenblatt-Industrie4_0-RAMI-4_0.pdf); Zugriff am 22.04.2020.
- Hofmann, E.; Rüsch, M. (2017): Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. In: Computers in Industry, Jg. 89 (2017), S. 23–34.
- Hüsselmann, C.; Litzenberger, R.; Schick, N.; Spannenberger, L. M. (2020): Sensitivitätsanalyse von Nutzwerten. Systematische Betrachtungen zur Nutzwertanalyse. In: WI-[Reports] (2020), H. 9.
- Ichsan, M.; Dachyar, M.; Farizal (2019): Readiness for Implementing Industry 4.0 in Food and Beverage Manufacturer in Indonesia. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Jg. 598 (2019), 012129/1-012129/7.
- IfM Bonn (Hrsg.) (2016): KMU-Definition des IfM Bonn. Online verfügbar unter: <https://www.ifm-bonn.org/definitionen/kmu-definition-des-ifm-bonn/>; Zugriff am 08.08.2020.
- IfM Bonn (Hrsg.) (2018): Verteilung der Auszubildenden auf die einzelnen Betriebsgrößenklassen. Online verfügbar unter: [https://www.ifm-bonn.org/fileadmin/\\_processed\\_/8/4/csm\\_St04-20a18\\_9070027fbb.jpg](https://www.ifm-bonn.org/fileadmin/_processed_/8/4/csm_St04-20a18_9070027fbb.jpg); Zugriff am 08.08.2020.
- Ihlau, S.; Duscha, H. (2019): Besonderheiten bei der Bewertung von KMU. Planungsplausibilisierung, Steuern, Kapitalisierung. 2. Aufl. 2019. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Indrawan, H.; Cahyo, N.; Simaremare, A.; Aisyah, S.; Paryanto; Tauviqirrahman, M. (2019): Readiness Index for Indonesian Power Plant toward Industry 4.0. In: 2019 International Conference on Technologies and Policies in Electric Power & Energy (ICT-PEP), IEEE, S. 1–6.
- Intel (Hrsg.) (2012): Einführung in Big Data. Die Analyse unstrukturierter Daten. Online verfügbar unter: <https://www.intel.de/content/dam/www/public/emea/de/de/pdf/unstructured-data-analytics-paper.pdf>; Zugriff am 13.08.2020.

- IPH Hannover (Hrsg.) (2020): Digitale Fabrik und Industrie 4.0. Werkzeuge, Methoden, Trends. Online verfügbar unter: <https://www.iph-hannover.de/de/information/fabrikplanung/digitale-fabrik/>; Zugriff am 02.08.2020.
- Ising, S. (2018): Digitalisierung im Werk. MES ist mehr als BDE und MDE. Online verfügbar unter: <https://www.it-production.com/fertigungsnahe-it/mes-digitalisierung-werk/>; Zugriff am 20.08.2020.
- Issa, A.; Hatiboglu, B.; Bildstein, A.; Bauernhansl, T. (2018): Industrie 4.0 roadmap: Framework for digital transformation based on the concepts of capability maturity and alignment. In: *Procedia CIRP*, Jg. 72 (2018), S. 973–978.
- IT-Sicherheitscluster e.V. (Hrsg.) (2020): Was ist ISIS12? InformationsSicherheitsmanagementSystem in 12 Schritten. Online verfügbar unter: <https://isis12.it-sicherheitscluster.de/ueber-isis12/>; Zugriff am 20.08.2020.
- IWD (Hrsg.) (2019): Datenmenge explodiert. Online verfügbar unter: <https://www.iwd.de/artikel/datenmenge-explodiert-431851/>; Zugriff am 13.08.2020.
- Jæger, B.; Halse, L. Lillebrygfjeld (2017): The IoT Technological Maturity Assessment Scorecard: A Case Study of Norwegian Manufacturing Companies. In: Lööding, H. (Hrsg.): *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing*, Springer International Publishing, S. 143–150.
- Jodlbauer, H.; Schagerl, M. (2016): Reifegradmodell Industrie 4.0. Ein Vorgehensmodell zur Identifikation von Industrie 4.0 Potentialen. In: Mayr, H. C. (Hrsg.): *INFORMATIK 2016*, Gesellschaft für Informatik e.V., S. 1473–1487.
- Jones, M.; Zarzycki, L.; Murray, G. (2019): Does Industry 4.0 Pose a Challenge for the SME Machine Builder? A Case Study and Reflection of Readiness for a UK SME. In: *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Jg. 530 (2019), S. 183–197.
- Jung, K.; Kulvatunyoo, B.; Choi, S.; Brundage, M. P. (2016): An Overview of a Smart Manufacturing System Readiness Assessment. In: Nääs, I. (Hrsg.): *Advances in Production Management Systems. Initiatives for a Sustainable World*, Springer International Publishing, S. 705–712.
- Justus, A. dos Santos; Pierin Ramos, L. Felipe; Rocha Loures, Eduardo de Freitas (2018): A Capability Assessment Model of Industry 4.0 Technologies for Viability Analysis of PoC (Proof Of Concept) in an Automotive Company. In: Peruzzini, M. (Hrsg.): *Transdisciplinary Engineering Methods for Social Innovation of Industry 4.0*, IOS Press, S. 936–945.

- Kagermann, H. (2017): Chancen von Industrie 4.0 nutzen. In: Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Bd. 4: Allgemeine Grundlagen, Springer Vieweg, S. 235–246, Berlin.
- Kaltenbach, F.; Marber, P.; Gosemann, C.; Bolts, T.; Kuhn, A. (2018): Smart Services Maturity Level in Germany. In: 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE ITMC), IEEE, S. 1–7.
- Kane, G. C.; Palmer, D.; Phillips, A. Nguyen; Kiron, D.; Buckley, N. (2017): Achieving Digital Maturity. Adapting Your Company to a Changing World. Online verfügbar unter: [https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3678\\_achieving-digital-maturity/DUP\\_Achieving-digital-maturity.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3678_achieving-digital-maturity/DUP_Achieving-digital-maturity.pdf); Zugriff am 09.08.2020.
- Kannan, S. Manoj; Suri, K.; Cadavid, J.; Barosan, I.; van den Brand, M.; Alferez, M.; Gerard, S. (2017): Towards Industry 4.0: Gap Analysis between Current Automotive MES and Industry Standards Using Model-Based Requirement Engineering. In: 2017 IEEE International Conference on Software Architecture Workshops (ICSAW), IEEE, S. 29–35.
- Karlstetter, F. (2017a): Was ist eine Private Cloud? Online verfügbar unter: <https://www.cloudcomputing-insider.de/was-ist-eine-private-cloud-a-631415/>; Zugriff am 20.08.2020.
- Karlstetter, F. (2017b): Was ist eine Public Cloud? Online verfügbar unter: <https://www.cloudcomputing-insider.de/was-ist-eine-public-cloud-a-633184/>; Zugriff am 20.08.2020.
- Katsma, C. P.; Moonen, H. M.; Hillegersberg, J. van (2011): Supply Chain Systems Maturing Towards the Internet-of-Things: A Framework. In: The 24th Bled eConference eFuture: Creating Solutions for the Individual, Organisations and Society Proceedings, S. 478–494.
- Kerkenberg, T. (2016): Digitale Fabrikplanung für zukunftsichere und Industrie 4.0-fähige Produktionssysteme. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF), Jg. 111 (2016), H. 3, S. 104–108.
- Kitchenham, B. (2004): Procedures for Performing Systematic Reviews. Online verfügbar unter: <http://www.inf.ufsc.br/~aldo.vw/kitchenham.pdf>; Zugriff am 27.05.2020.
- Klötzer, C.; Pflaum, A. (2017): Toward the Development of a Maturity Model for Digitalization within the Manufacturing Industry's Supply Chain. In: Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-50), S. 4210–4219.

- Kolla, S.; Minufekr, M.; Plapper, P. (2019): Deriving essential components of lean and industry 4.0 assessment model for manufacturing SMEs. In: *Procedia CIRP*, Jg. 81 (2019), S. 753–758.
- Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2003): Empfehlung der Kommission vom 6. Mai 2003 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen (Bekannt gegeben unter Aktenzeichen K(2003) 1422). 2003/361/EG2003. Online verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003H0361&from=DE>; Zugriff am 08.08.2020.
- Krowas, K.; Riedel, R. (2019): Planning Guideline and Maturity Model for Intra-logistics 4.0 in SME. In: Ameri, F. (Hrsg.): *Advances in Production Management Systems. Towards Smart Production Management Systems*, Springer International Publishing, S. 331–338, Cham.
- Kumar, R.; Enose, N. (2018): Making Industry 4.0 Real - Using the Acatech 4.0 Maturity Index. A systematic methodology for manufacturing enterprises to assess current readiness and strategize their industry 4.0 Journey. Online verfügbar unter: <https://www.infosys.com/services/engineering-services/white-paper/documents/industry-4.0-real.pdf>; Zugriff am 09.08.2020.
- Landwehr-Zloch, S.; Eichfelder, M. (2019): Checkliste zur Eigenbewertung der Industrie 4.0-Readiness für kleine und mittlere Unternehmen (KMU). In: *Controller Magazin*, Jg. 44 (2019), H. 4, S. 74–76.
- Lee, J.; Jun, S.; Chang, T.-W.; Park, J. (2017): A Smartness Assessment Framework for Smart Factories Using Analytic Network Process. In: *Sustainability*, Jg. 9 (2017), H. 5, S. 794.
- Leineweber, S.; Wienbruch, T.; Lins, D.; Kreimeier, D.; Kuhlenkötter, B. (2018): Concept for an evolutionary maturity based Industrie 4.0 migration model. In: *Procedia CIRP*, Jg. 72 (2018), S. 404–409.
- Leyh, C.; Schaeffer, T.; Bley, K.; Forstenhaeusler, S. (2017): Assessing the IT and Software Landscapes of Industry 4.0-Enterprises. The Maturity Model SIMMI 4.0. In: Ziemba, E. (Hrsg.): *Information Technology for Management: New Ideas and Real Solutions*, Springer International Publishing, S. 103–119.
- Leyh, C.; Schäffer, T.; Bley, K.; Forstenhäusler, S. (2016a): SIMMI 4.0 – A Maturity Model for Classifying the Enterprise-wide IT and Software Landscape Focusing on Industry 4.0. In: *2016 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*, IEEE, S. 1297–1302.

- Leyh, C.; Schäffer, T.; Forstenhäusler, S. (2016b): SIMMI 4.0 – Vorschlag eines Reifegradmodells zur Klassifikation der unternehmensweiten Anwendungssystemlandschaft mit Fokus Industrie 4.0.
- Li, C. H.; Lau, H. K. (2018): Integration of Industry 4.0 and Assessment Model for Product Safety. In: 2018 IEEE Symposium on Product Compliance Engineering (ISPC), IEEE, S. 1–5.
- Li, C. H.; Lau, H. K. (2019): A Critical Review of Maturity Models in Information Technology and Human Landscapes on Industry 4.0. In: 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), IEEE, S. 1575–1579.
- Li, Q.; Brundage, M.; Kulvatunyou, B.; Brandl, D.; Do Noh, S. (2017): Improvement Strategies for Manufacturers Using the MESA MOM Capability Maturity Model. In: Lödding, H. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing, Springer International Publishing, S. 21–29.
- Lichtblau, K.; Stich, V.; Bertenrath, R.; Blum, M.; Bleider, M.; Millack, A. et al. (2015): IMPULS. Industrie 4.0-Readiness. Online verfügbar unter: <http://www.impulsstiftung.de/documents/3581372/4875835/Industrie+4.0+Readiness+IMPULS+Studie+Oktober+2015.pdf/447a6187-9759-4f25-b186-b0f5eac69974>.
- Lin, W. D.; Low, M.Y.H.; Chong, Y. T.; Teo, C. L. (2019): Application of SIRI for Industry 4.0 Maturity Assessment and Analysis. In: 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management (IEEM), IEEE, S. 1450–1454.
- Lindner, D. (2019): KMU im digitalen Wandel. Ergebnisse empirischer Studien zu Arbeit, Führung und Organisation. Springer Fachmedien, Wiesbaden (essentials).
- Luber, S.; Litzel, N. (2017): Was ist Predictive Maintenance? In: BigData-Insider (2017).
- Lucato, W. Cezar; Pacchini, A. Paulo Tadeu; Facchini, F.; Mummolo, G. (2019): Model to evaluate the Industry 4.0 readiness degree in Industrial Companies. In: IFAC-PapersOnLine, Jg. 52 (2019), H. 13, S. 1808–1813.
- Maasz, G. Jacobus; Darwish, H. (2018): Towards an initiative-based industry 4.0 maturity improvement process. Master drilling as a case study. In: South African Journal of Industrial Engineering (SAJIE), Jg. 29 (2018), H. 3, S. 92–107.
- Machado, C. Gonçalves; Winroth, M.; Carlsson, D.; Almström, P.; Centerholt, V.; Hallin, M. (2019): Industry 4.0 readiness in manufacturing companies: challenges and enablers towards increased digitalization. In: Procedia CIRP, Jg. 81 (2019), S. 1113–1118.

- Machi, L.; McEvoy, B. (2016): The literature review. Six steps to success. Corwin, Thousand Oaks, California.
- Maisiri, W.; van Dyk, L. (2019): Industry 4.0 Readiness Assessment For South African Industries. In: South African Journal of Industrial Engineering (SAJIE), Jg. 30 (2019), H. 3, S. 134–148.
- Martinsen, K. (2019): Industry 4.0 Closed Loop Tolerance Engineering Maturity Evaluation. In: Lecture Notes in Electrical Engineering, Jg. 484 (2019).
- Mattern, F.; Flörkemeier, C. (2010): Vom Internet der Computer zum Internet der Dinge. In: Informatik Spektrum, Jg. 33 (2010), H. 2, S. 107–121.
- Mayusda, I.; Wiratmadja, I. Inrawan (2019): The Development of Industry 4.0 Readiness Model. Case Study in Indonesia's Priority Industrial Sector of Chemical. In: Lecture Notes in Mechanical Engineering (2019), S. 140–146.
- Meier, M. (2002): Auswählen und bewerten, the key to innovation: Vorlesungsskript ZPE, Version 2002, 1. Semester. Online verfügbar unter: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/146166/eth-25112-01.pdf?sequence=1&isAllowed=y>; Zugriff am 30.08.2020.
- Menig, A.; Zimmermann, V.; Vogt, J. (2019): Die digitale Transformation der Arbeitswelt – Chance oder Risiko? Online verfügbar unter: <http://publikationen.ub.uni-frankfurt.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/51026>; Zugriff am 09.08.2020.
- Menon, K.; Kärkkäinen, H.; Lasrado, L. Allan (2016): Towards a Maturity Modeling Approach for the Implementation of Industrial Internet. In: Proceeding of the 20th Pacific Asia Conference on Information Systems (PACIS 2016), College of Management, National Chung Cheng University.
- Meza-Ruiz, I. D.; Rocha-Lona, L.; del Rocio Soto-Flores, M.; Garza-Reyes, J. Arturo; Kumar, V.; Lopez-Torres, G. Citlalli (2017): Measuring Business Sustainability Maturity-levels and Best Practices. In: Procedia Manufacturing, Jg. 11 (2017), S. 751–759.
- Microsoft (Hrsg.) (2020): Transaktionsreplikation. Online verfügbar unter: <https://docs.microsoft.com/de-de/sql/relational-databases/replication/transactional/transactional-replication?view=sql-server-ver15>; Zugriff am 20.08.2020.
- Mittal, S.; Khan, M. Ahmad; Romero, D.; Wuest, T. (2018): A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). In: Journal of Manufacturing Systems, Jg. 49 (2018), S. 194–214.

- Modrák, V.; Šoltýsová, Z. (2020): Development of an organizational maturity model in terms of mass customization. In: Matt, D. (Hrsg.): Industry 4.0 for SMEs. Challenges, Opportunities and Requirements, Palgrave Macmillan, S. 215–250, Basingstoke.
- Montag, A. (2016): Industrie 4.0-Kommunikation in der Praxis. Online verfügbar unter: <https://www.jp-kom.de/blog/wissen/industrie-40-kommunikation-der-praxis>; Zugriff am 20.08.2020.
- Nafchi, M. Ziaei; Mohelska, H. (2020): Organizational Culture as an Indication of Readiness to Implement Industry 4.0. In: Information, Jg. 11 (2020), H. 3.
- Nausch, M.; Schumacher, A.; Sihm, W. (2020): Assessment of Organizational Capability for Data Utilization – A Readiness Model in the Context of Industry 4.0. In: Durakbasa, N. M. (Hrsg.): Proceedings of the International Symposium for Production Research 2019, Springer International Publishing, S. 243–252.
- Nhamo, G.; Nhemachena, C.; Nhamo, S. (2020): Using ICT indicators to measure readiness of countries to implement Industry 4.0 and the SDGs. In: Environmental Economics and Policy Studies, Jg. 22 (2020), H. 2, S. 315–337.
- Nick, G.; Szaller, Á.; Bergmann, J.; Várgedő, T. (2019): Industry 4.0 readiness in Hungary: model, and the first results in connection to data application. In: IFAC-PapersOnLine, Jg. 52 (2019), H. 13, S. 289–294.
- Niewiadomski, P.; Stachowiak, A.; Pawlak, N. (2019): Knowledge on IT Tools Based on AI Maturity – Industry 4.0 Perspective. In: Procedia Manufacturing, Jg. 39 (2019), S. 574–582.
- Nightingale, D. (2005): LESAT: The Lean Enterprise Self Assessment Tool. Online verfügbar unter: [https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-852j-integrating-the-lean-enterprise-fall-2005/lecture-notes/13\\_lesat.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-852j-integrating-the-lean-enterprise-fall-2005/lecture-notes/13_lesat.pdf); Zugriff am 09.08.2020.
- Nyhuis, P. (2008): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. PZH Produktionstechnisches Zentrum, Garbsen.
- Obermaier, R. (2017): Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe: Strategische und operative Handlungsfelder für Industriebetriebe. In: Obermaier, R. (Hrsg.): Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe. Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen, Springer Gabler, S. 3–34, Wiesbaden.
- Obermaier, R. (2019): Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation. Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen.

- Pacchini, A. Paulo Tadeu; Lucato, W. Cezar; Facchini, F.; Mummolo, G. (2019): The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0. In: Computers in Industry, Jg. 113 (2019), S. 103–125.
- Pessl, E.; Sorko, S. Romina; Mayer, B. (2017): Roadmap Industry 4.0 – Implementation Guideline for Enterprises. In: International Journal of Science, Technology and Society (IJSTS), Jg. 5 (2017), H. 6, S. 193–202.
- Peukert, S.; Treber, S.; Balz, S.; Haefner, B.; Lanza, G. (2020): Process model for the successful implementation and demonstration of SME-based industry 4.0 showcases in global production networks. In: Production Engineering, Jg. 14 (2020), H. 3, S. 275–288.
- Plattform Industrie 4.0 (Hrsg.) (2020a): Glossar: Horizontale Integration (horizontal integration). Online verfügbar unter: [https://www.plattform-i40.de/SiteGlobals/PI40/Forms/Listen/Glossar/DE/Glossar\\_Formular.html?resourceId=1022602&input\\_=1020842&pageLocale=de&titlePrefix=H#form-1022602](https://www.plattform-i40.de/SiteGlobals/PI40/Forms/Listen/Glossar/DE/Glossar_Formular.html?resourceId=1022602&input_=1020842&pageLocale=de&titlePrefix=H#form-1022602); Zugriff am 15.08.2020.
- Plattform Industrie 4.0 (Hrsg.) (2020b): Glossar: Smart Factory (smart factory). Online verfügbar unter: [https://www.plattform-i40.de/SiteGlobals/PI40/Forms/Listen/Glossar/DE/Glossar\\_Formular.html?resourceId=1022602&input\\_=1020842&pageLocale=de&titlePrefix=S#form-1022602](https://www.plattform-i40.de/SiteGlobals/PI40/Forms/Listen/Glossar/DE/Glossar_Formular.html?resourceId=1022602&input_=1020842&pageLocale=de&titlePrefix=S#form-1022602); Zugriff am 14.08.2020.
- Plattform Industrie 4.0 (Hrsg.) (2020c): Glossar: Vertikale Integration (vertical integration). Online verfügbar unter: [https://www.plattform-i40.de/SiteGlobals/PI40/Forms/Listen/Glossar/DE/Glossar\\_Formular.html?resourceId=1022602&input\\_=1020846&pageLocale=de&titlePrefix=V#form-1022602](https://www.plattform-i40.de/SiteGlobals/PI40/Forms/Listen/Glossar/DE/Glossar_Formular.html?resourceId=1022602&input_=1020846&pageLocale=de&titlePrefix=V#form-1022602); Zugriff am 15.08.2020.
- Plattform Industrie 4.0 (Hrsg.) (2020d): Was ist Industrie 4.0? Online verfügbar unter: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>; Zugriff am 12.08.2020.
- Puchan, J.; Zeifang, A.; Leu, J.-D. (2018): Industry 4.0 in Practice-Identification of Industry 4.0 Success Patterns. In: 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management (IEEM), IEEE, S. 1091–1095.
- Putri, N. T.; Jumeno, D.; Henmaidi; Wirdianto, E.; Fithri, P.; Zulkhaira, F. (2019): Designing Self-Assessment Tool for Library Performance Measurement Adopting Malcolm Baldrige Framework (Case Study). In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Jg. 528 (2019), 012032/1-012032/9.

- Qin, J.; Liu, Y.; Grosvenor, R. (2016): A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. In: *Procedia CIRP*, Jg. 52 (2016), S. 173–178.
- Rajnai, Z.; Kocsis, I. (2018): Assessing Industry 4.0 Readiness of Enterprises. In: *IEEE 16th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI)*, IEEE, S. 225–230.
- Ratnasingam, J.; Latib, H. A.; Yan Yi, L.; Liat, L. C.; Khoo, A. (2019): Extent of Automation and the Readiness for Industry 4.0 among Malaysian Furniture Manufacturers. In: *BioResources*, Jg. 14 (2019), H. 3, S. 7095–7110.
- Ratnasingam, J.; Lee, Y.; Amir, A.; Rasmina, H.; Liat, L. C.; Khoo, A. et al. (2020): Assessing the Awareness and Readiness of the Malaysian Furniture Industry for Industry 4.0. In: *BioResources*, Jg. 15 (2020), H. 3, S. 4866–4885.
- Rauch, E.; Unterhofer, M.; Rojas, R. A.; Gualtieri, L.; Woschank, M.; Matt, D. T. (2020): A Maturity Level-Based Assessment Tool to Enhance the Implementation of Industry 4.0 in Small and Medium-Sized Enterprises. In: *Sustainability*, Jg. 12 (2020), H. 9.
- Reder, L.; Steven, M.; Klünder, T. (2018): Industrie 4.0-Readiness von Supply Chain-Netzwerken - Qualitative und quantitative Analyse am Beispiel der Automobilindustrie. In: *Industrie Management* (2018), H. 5, S. 11–16.
- Reinemann, H. (2019): *Mittelstandsmanagement*. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Reinhart, G. (2017): *Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. Hanser, München.
- Reuter, C.; Gartzén, T.; Prote, J.-P.; Fränken, B. (2016): *Industrie-4.0-Audit für produzierende Unternehmen*. Online verfügbar unter: <https://www.ingenieur.de/fachmedien/vdi-z/industrie-4-0/industrie-4-0-audit-fuer-produzierende-unternehmen/>; Zugriff am 08.08.2020.
- Rockwell Automation (2014): *The Connected Enterprise Maturity Model*. Online verfügbar unter: [https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/cie-wp002\\_-en-p.pdf](https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/cie-wp002_-en-p.pdf); Zugriff am 09.08.2020.
- Rößler, M. Philipp; Haschemi, M. (2017): Smart Factory Assessment (SFA). In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)*, Jg. 112 (2017), H. 10, S. 699–703.
- Rübel, S.; Emrich, A.; Klein, S.; Loos, P. (2018): A Maturity Model for Business Model Management in Industry 4.0. In: *Drews, P. (Hrsg.): Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2018, Leuphana Universität Lüneburg Institut für Wirtschaftsinformatik*, S. 2031–2042.

- Samaranayake, P.; Ramanathan, K.; Laosirihongthong, T. (2017): Implementing Industry 4.0 - A Technological Readiness Perspective. In: 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management (IEEM), IEEE, S. 529–533.
- Sames, G. (2018): Das Reifegradmodell Industrie 4.0. Technische Hochschule Mittelhessen (THM), Gießen.
- Sames, G.; Diener, A. (2018): Stand der Digitalisierung von Geschäftsprozessen zu Industrie 4.0 im Mittelstand. Ergebnisse einer Umfrage bei Unternehmen. In: THM-Hochschulschriften (2018), H. Band 9.
- Sanchez, F.; Monticolo, D.; Bonjour, E.; Micaelli, J.-P. (2019): Towards a Better Modelling and Assessment of Project Management Maturity in Industry 4.0. In: Bonjour, E. (Hrsg.): Complex Systems Design & Management, Springer Nature Switzerland AG, S. 235.
- Sari, T.; Gules, H. K.; Yigitol, B. (2020): Awareness and readiness of Industry 4.0. The case of Turkish manufacturing industry. In: Advances in Production Engineering & Management (APEM), Jg. 15 (2020), H. 1, S. 57–68.
- Sarvari, P. Alipour; Ustundag, A.; Cevikcan, E.; Kaya, I.; Cebi, S. (2018): Technology Roadmap for Industry 4.0. In: Ustundag, A. (Hrsg.): Industry 4.0: Managing The Digital Transformation, Springer International Publishing, S. 95–103, Cham.
- Schallmo, D. R. A. (2019): Jetzt digital transformieren. So gelingt die erfolgreiche Digitale Transformation Ihres Geschäftsmodells. 2. Aufl. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Schenk, M. (2009): Digitale Fabrik. Realisierungsstand und Chancen. Online verfügbar unter: <https://docplayer.org/8710565-Digitale-fabrik-realisierungsstand-und-chancen.html>; Zugriff am 02.08.2020.
- Schiffer, M.; Wiendahl, H.-H.; Saretz, B. (2019): Self-assessment of Industry 4.0 Technologies in Intralogistics for SME's. In: Ameri, F. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. Towards Smart Production Management Systems, Springer International Publishing, S. 339–346, Cham.
- Schmitz, S. (2016): Wo stehen wir? Industrie-4.0-Reifegradindex zur Standortbestimmung der Unternehmen. In: Unternehmen der Zukunft (UdZ), Jg. 17 (2016), H. 1, S. 30–33.
- Schmitz, S. (2019): Nächster Halt Industrie 4.0 - Industrie 4.0 Maturity Index als Fahrplan der digitalen Transformation. In: Qualität und Zuverlässigkeit (QZ), Jg. 64 (2019), H. 2, S. 30–33.
- Schuh, G.; Anderl, R.; Gausemeier, J.; Ten Hompel, M.; Wahlster, W. (2017): Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten (acatech

- STUDIE). Online verfügbar unter: <https://www.acatech.de/publikation/industrie-4-0-maturity-index-die-digitale-transformation-von-unternehmen-gestalten/>; Zugriff am 22.04.2020.
- Schumacher, A.; Erol, S.; Sihn, W. (2016): A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. In: *Procedia CIRP*, Jg. 52 (2016), S. 161–166.
- Schumacher, A.; Nemeth, T.; Sihn, W. (2019): Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises. In: *Procedia CIRP*, Jg. 79 (2019), S. 409–414.
- Schwinghammer, K.; Buettner, R. (2016): Industrie 4.0-Readiness: Eine empirische Fallstudie in der Automobilproduktion. In: *Lecture Notes in Informatics*, Jg. 259 (2016), S. 1445–1457.
- Scremin, L.; Armellini, F.; Brun, A.; Solar-Pelletier, L.; Beaudry, C. (2018): Towards a Framework for Assessing the Maturity of Manufacturing Companies in Industry 4.0 Adoption. In: Tavana, M. (Hrsg.): *Analyzing the Impacts of Industry 4.0 in Modern Business Environments*, IGI Global, S. 224–254.
- SEF (Hrsg.) (2020): Intelligent Connectivity for Industry 4.0. Online verfügbar unter: [https://www.smartelectronicfactory.de/fileadmin/user\\_upload/dokumente/Smart\\_Electronic\\_Factory.pdf](https://www.smartelectronicfactory.de/fileadmin/user_upload/dokumente/Smart_Electronic_Factory.pdf); Zugriff am 02.08.2020.
- Shahzad, M. Atif; Gulzar, W. Ahmad (2020): Industrie 4.0 Readiness: Green Computing in Relation with Key Performance Indicator for a Manufacturing Industry. In: *Mobile Networks and Applications*, Jg. 25 (2020), H. 4, S. 1299–1306.
- Sheen, D.-P.; Yang, Y. (2018): Assessment of Readiness for Smart Manufacturing and Innovation in Korea. In: *2018 IEEE Technology and Engineering Management Conference (TEMSCON)*, IEEE, S. 1–5.
- Singh, P. M.; Sinderen, M. J. van; Wieringa, R. J. (2017): Smart logistics: An enterprise architecture perspective. In: Franch, X. (Hrsg.): *CAiSE 2017 Forum and Doctoral Consortium Papers*, S. 9–16.
- Statista Lexikon (2020a): Likert-Skala. Statista Definition. Online verfügbar unter: [https://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/82/likert\\_skala/](https://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/82/likert_skala/); Zugriff am 08.08.2020.
- Statista Lexikon (2020b): Skalenniveau - Statista Definition. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/123/skalenniveau/>; Zugriff am 30.08.2020.

- Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (2019): Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) in Deutschland. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/studie/id/46952/dokument/kleine-und-mittlere-unternehmen-kmu-in-deutschland/>; Zugriff am 08.08.2020.
- Stentoft, J.; Adsboll Wickstrom, K.; Philipsen, K.; Haug, A. (2020): Drivers and barriers for Industry 4.0 readiness and practice. Empirical evidence from small and medium-sized manufacturers. In: Production Planning & Control (2020).
- Steuerwald, D. (2019): Cloud oder On-Premise? Online verfügbar unter: <https://www.microtech.de/blog/cloud-on-premises/>; Zugriff am 20.08.2020.
- Stich, V.; Gudergan, G.; Zeller, V. (2018): Need and Solution to Transform the Manufacturing Industry in the Age of Industry 4.0. A Capability Maturity Index Approach. In: Camarinha-Matos, L. M. (Hrsg.): Collaborative Networks of Cognitive Systems, Springer International Publishing, S. 33–42.
- Stich, V.; Schmitz, S.; Zeller, V. (2017): Relevant Capabilities for Information Management to Achieve Industrie 4.0 Maturity. In: Camarinha-Matos, L. M. (Hrsg.): Collaboration in a Data-Rich World, Springer International Publishing, S. 28–38.
- Sundberg, L.; Gidlund, K. L.; Olsson, L. (2019): Towards Industry 4.0? Digital Maturity of the Manufacturing Industry in a Swedish Region. In: 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management (IEEM), IEEE, S. 731–735.
- Thiele, T.; Meisen, T.; Jeschke, S. (2018): Smart Factory. In: Kasprowicz, D. (Hrsg.): Handbuch Virtualität, Springer Fachmedien, S. 1–18, Wiesbaden.
- Trend Micro (2010): IT-Sicherheit für Dummies. Kleine Unternehmen. Wiley, Chichester, West Sussex, England.
- Trotta, D.; Garengo, P. (2019): Assessing Industry 4.0 Maturity: An Essential Scale for SMEs. In: 2019 8th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM), IEEE, S. 69–74.
- Trstenjak, M.; Cajner, H.; Opetuk, T. (2019): Industry 4.0 Readiness Factor Calculation. Criteria Evaluation Framework. In: FME Transactions, Jg. 47 (2019), H. 4, S. 841–845.
- TÜV Süd (2017): Leitfaden für die vernetzte Produktion. TÜV Süd beteiligte sich an Industrie 4.0-Maturity-Index - Digitalisierte Prozesse helfen beim Sparen. In: Produktion (2017), H. 46, S. 38.
- Unterhofer, M.; Rauch, E.; Matt, D. T.; Santiteerakul, S. (2018): Investigation of Assessment and Maturity Stage Models for Assessing the Implementation of Industry 4.0. In: 2018

- IEEE International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management (IEEM), IEEE, S. 720–725.
- VDI ZRE (2017): Studie: Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0. Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes. Online verfügbar unter: [https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Newsroom/Studie\\_Ressourceneffizienz\\_durch\\_Industrie\\_4.0.pdf](https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Newsroom/Studie_Ressourceneffizienz_durch_Industrie_4.0.pdf); Zugriff am 22.04.2020.
- VerbundFDB (Hrsg.) (2020): Datensicherheit: Forschungsdaten sicher und datenschutzkonform behandeln! Online verfügbar unter: <https://www.forschungsdaten-bildung.de/datensicherheit>; Zugriff am 08.09.2020.
- Veza, I.; Mladineo, M.; Peko, I. (2015): Analysis of the current state of Croatian manufacturing industry with regard to Industry 4.0. In: Abele, E. (Hrsg.): Proceedings of the CIM 2015.
- vom Brocke, J.; Simons, A.; Niehaves, B.; Riemer, K.; Cleven, A. (2009): Reconstructing the Giant. On the Importance of Rigour in Documenting the Literature Search Process. Online verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/259440652\\_Reconstructing\\_the\\_Giant\\_On\\_the\\_Importance\\_of\\_Rigour\\_in\\_Documenting\\_the\\_Literature\\_Search\\_Process](https://www.researchgate.net/publication/259440652_Reconstructing_the_Giant_On_the_Importance_of_Rigour_in_Documenting_the_Literature_Search_Process); Zugriff am 27.05.2020.
- Vrchota, J.; Maříková, M.; Řehoř, P.; Rolínek, L.; Toušek, R. (2020): Human Resources Readiness for Industry 4.0. In: Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity (JOItmC), Jg. 6 (2020), H. 1, S. 1–20.
- Vrchota, J.; Pech, M. (2019): Readiness of Enterprises in Czech Republic to Implement Industry 4.0. Index of Industry 4.0. In: Applied Sciences, Jg. 9 (2019), H. 24.
- Wagire, A. Anil; Joshi, R.; Rathore, A. Pal Singh; Jain, R. (2020): Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice. In: Production Planning & Control (2020).
- Weber, C.; Königsberger, J.; Kassner, L.; Mitschang, B. (2017): M2DDM – A Maturity Model for Data-Driven Manufacturing. In: Procedia CIRP, Jg. 63 (2017), S. 173–178.
- Webster, J.; Watson, R. (2002): Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. In: MIS Quarterly, Jg. 26 (2002), H. 2, S. xiii–xxiii.
- Werner-Lewandowska, K.; Kosacka-Olechnik, M. (2018): Logistics maturity model for service company – theoretical background. In: Procedia Manufacturing, Jg. 17 (2018), S. 791–802.

- Westermann, T.; Anacker, H.; Dumitrescu, R.; Czaja, A. (2016): Reference architecture and maturity levels for cyber-physical systems in the mechanical engineering industry. In: 2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE), IEEE.
- Weyer, S.; Schmitt, M.; Ohmer, M.; Gorecky, D. (2015): Towards Industry 4.0 - Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. In: IFAC-PapersOnLine, Jg. 48 (2015), H. 3, S. 579–584.
- Wiesner, S.; Gaiardelli, P.; Gritti, N.; Oberti, G. (2018): Maturity Models for Digitalization in Manufacturing - Applicability for SMEs. In: Moon, I. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0, Springer International Publishing, S. 81–88, Cham.
- Wikipedia (Hrsg.) (2020a): Cloud Computing. Online verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Cloud\\_Computing&oldid=202569512](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Cloud_Computing&oldid=202569512); Zugriff am 14.08.2020.
- Wikipedia (Hrsg.) (2020b): Feldbus. Online verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Feldbus&oldid=199454901>; Zugriff am 08.09.2020.
- Wikipedia (Hrsg.) (2020c): Schnappschuss (Informationstechnik). Online verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Schnappschuss\\_\(Informationstechnik\)&oldid=199392442](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Schnappschuss_(Informationstechnik)&oldid=199392442); Zugriff am 20.08.2020.
- Wikipedia (Hrsg.) (2020d): Ubiquitous computing. Online verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Ubiquitous\\_computing&oldid=200175531](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Ubiquitous_computing&oldid=200175531); Zugriff am 12.08.2020.
- WisLab DF (2020): KMU-Wissenstransferlabor "Digitale Fabrik". Universität Kassel. Online verfügbar unter: <https://www.uni-kassel.de/forschung/kmu-wislab-df/startseite>; Zugriff am 23.04.2020.
- Zeller, V.; Hocken, C.; Stich, V. (2018): acatech Industrie 4.0 Maturity Index - A Multidimensional Maturity Model. In: Moon, I. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0, Springer International Publishing, S. 105–113.

## Anhang

|          |                                                                                   |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>A</b> | <b>Auszug aus dem DBIS der Universität Kassel im Fachgebiet Technik allgemein</b> | <b>128</b> |
| <b>B</b> | <b>Ergebnisse der Primärrecherche .....</b>                                       | <b>133</b> |
| B 1      | Suchprozess und Ergebnisse aus Academic Search Ultimate (ASU) .....               | 133        |
| B 2      | Suchprozess und Ergebnisse aus IEEE Xplore / Electronic Library Online.....       | 134        |
| B 3      | Suchprozess und Ergebnisse aus ScienceDirect .....                                | 135        |
| B 4      | Suchprozess und Ergebnisse aus Web of Science Core Collection .....               | 136        |
| B 5      | Suchprozess und Ergebnisse aus WISO .....                                         | 138        |
| <b>C</b> | <b>Filtrierung der Ergebnisse der Primärrecherche .....</b>                       | <b>140</b> |
| <b>D</b> | <b>Filtrierung der Ergebnisse aus der Rückwärtssuche .....</b>                    | <b>148</b> |
| <b>E</b> | <b>Zitierte Modelle aus der Rückwärtssuche .....</b>                              | <b>152</b> |
| <b>F</b> | <b>Ermittlung der Zitierhäufigkeit (H) im Rahmen der Rückwärtssuche .....</b>     | <b>153</b> |
| <b>G</b> | <b>Ergänzungen zu den beschriebenen Reifegradmodellen.....</b>                    | <b>154</b> |
| G 1      | Ergänzungen zu Quelle [31]: Landwehr-Zloch, Eichfelder (2019, S. 75).....         | 154        |
| G 2      | Ergänzungen zu Quelle [44]: Gökalp et al. (2017, S. 139) .....                    | 155        |
| G 3      | Ergänzungen zu Quelle [61]: Lichtblau et al. (2015, S. 30 ff.) .....              | 156        |
| G 4      | Ergänzungen zu Quelle [100]: Leyh et al. (2016b, S. 990).....                     | 157        |
| G 5      | Ergänzungen zu Quelle [118]: Geissbauer et al. (2016, S. 28) .....                | 158        |
| G 6      | Ergänzungen zu Quelle [124]: Anderl (2015, S. 12, 14).....                        | 159        |
| <b>H</b> | <b>Analyse der identifizierten Reifegradmodelle .....</b>                         | <b>161</b> |
| H 1      | Dimensionen (inklusive Kennung) und Indikatoren .....                             | 161        |
| H 2      | Reifegradstufen.....                                                              | 166        |
| H 3      | Zusammenfassende Darstellung der Modellanalyse .....                              | 167        |
| <b>I</b> | <b>Bewertung der Reifegradmodelle.....</b>                                        | <b>168</b> |
| <b>J</b> | <b>Synthese der Modellindikatoren .....</b>                                       | <b>171</b> |
| <b>K</b> | <b>Evaluationsergebnisse .....</b>                                                | <b>173</b> |
| <b>L</b> | <b>Das KMU-spezifische Industrie 4.0-Reifegradmodell 2.0.....</b>                 | <b>180</b> |

**A Auszug aus dem DBIS der Universität Kassel im Fachgebiet Technik allgemein**

| Datenbank                                                                                                           |   | Ausschlusskriterium                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|----------------------------------------------------------|
| Academic Search Ultimate<br>(frei zugänglich bis 31.07.20)                                                          | ✓ |                                                          |
| ACM Digital Library                                                                                                 | ✗ | Datenbank liefert keine Suchresultate                    |
| ANNO - AustriaN Newspapers Online                                                                                   | ✗ | Betrachtungszeitraum bis 1949                            |
| Arabterm - technisches Wörterbuch                                                                                   | ✗ | Thematischer Ausschluss (Wörterbuch)                     |
| Architonic                                                                                                          | ✗ | Thematischer Ausschluss (Architektur)                    |
| ASME Digital Collection                                                                                             | ✗ | Thematischer Ausschluss (Mechanik)                       |
| Association Française pour l'Avancement des Sciences 1872-1914                                                      | ✗ | Französisch; Betrachtungszeitraum bis 1914               |
| Audio Engineering Society Paper Search                                                                              | ✗ | kein kostenfreier Volltextzugriff                        |
| Base brevets                                                                                                        | ✗ | Französisch; Patentdatenbank                             |
| Base Brevets du 19ème siècle                                                                                        | ✗ | Französisch; Patentdatenbank                             |
| Bases de Datos Bibliográficas del CSIC                                                                              | ✗ | Spanisch; kein kostenfreier Volltextzugriff              |
| Baufachinformation                                                                                                  | ✗ | Thematischer Ausschluss (Bauwesen)                       |
| BFW-Literaturdatenbank                                                                                              | ✗ | Thematischer Ausschluss (Forstwirtschaft)                |
| Bibliothekskatalog / Bibliothek der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin                              | ✗ | Thematischer Ausschluss (Arbeitsschutz/-medizin)         |
| Bionik-Kompetenz-Netz (BIOKON)                                                                                      | ✗ | Thematischer Ausschluss (Bionik)                         |
| Bureau Veritas: Registre international de classification de navires                                                 | ✗ | Thematischer Ausschluss (Schifffahrt)                    |
| Canadian Patents Database                                                                                           | ✗ | Patentdatenbank                                          |
| CiteSeerX                                                                                                           | ✗ | Datenbank liefert keine Suchresultate                    |
| Conservatoire numérique des Arts et Métiers                                                                         | ✗ | Französisch                                              |
| Cooperative Patent Classification                                                                                   | ✗ | Patentdatenbank                                          |
| De Gruyter Online / E-Books                                                                                         | ✗ | enthalten in "De Gruyter Online"                         |
| De Gruyter Online / Research Now E-Journals                                                                         | ✗ | Datenbank liefert keine Suchresultate                    |
| DEPATISnet                                                                                                          | ✗ | Patentdatenbank                                          |
| DergiPark Akademik                                                                                                  | ✗ | Türkisch                                                 |
| DESASTRES                                                                                                           | ✗ | Thematischer Ausschluss (Katastrophenmanagement/-schutz) |
| Designaddict                                                                                                        | ✗ | Thematischer Ausschluss (Design, Architektur)            |
| Deutsches Museum Digital                                                                                            | ✗ | Thematischer Ausschluss (Museumsarchiv)                  |
| DGUV-Regelwerk: Sicherheit & Gesundheitsschutz                                                                      | ✗ | Thematischer Ausschluss (Unfallverhütung)                |
| DigiPEER: Digitalisierung Großformatiger Pläne und Technischer Zeichnungen zur Erfassung und Erschließung des Raums | ✗ | Thematischer Ausschluss (Museumsarchiv)                  |

| Datenbank                                                                |   | Ausschlusskriterium                                          |
|--------------------------------------------------------------------------|---|--------------------------------------------------------------|
| Digital Edition of Fernando Pessoa: Projects and Publications - BETA!    | ✗ | Spanisch; Thematischer Ausschluss (Werke von F. Pessoa)      |
| DIN-Normen                                                               | ✗ | Normdatenbank                                                |
| DIN-TERMinologieportal                                                   | ✗ | Normdatenbank                                                |
| Directory of Open Access Books                                           | ✗ | Datenbank liefert keine Suchresultate                        |
| DMG-Lib: Digitale Mechanismen- und Getriebebibliothek                    | ✗ | Thematischer Ausschluss (Getriebe)                           |
| Dokumentenserver der Ostfalia HaW                                        | ✗ | Thematischer Ausschluss (Abschlussarbeiten der Ostfalia HaW) |
| DPMAregister                                                             | ✗ | Patentdatenbank                                              |
| DSpace at MIT                                                            | ✗ | Thematischer Ausschluss (Abschlussarbeiten des MIT)          |
| DTIC Technical Reports (TRs)                                             | ✗ | Thematischer Ausschluss (Verteidigungstechnik)               |
| engrXiv   Engineering Archive                                            | ✗ | Thematischer Ausschluss (Preprints)                          |
| Espacenet                                                                | ✗ | Patentdatenbank                                              |
| Europäisches Patentregister                                              | ✗ | Patentdatenbank                                              |
| F1000Research                                                            | ✗ | Thematischer Ausschluss (Horizon 2020 Förderprojekte)        |
| Fachbibliotheken zur Naturwissenschafts- und Technikgeschichte           | ✗ | Thematischer Ausschluss (Technikgeschichte)                  |
| Fachdokumentation Brandschutzwesen                                       | ✗ | Thematischer Ausschluss (Brandschutz)                        |
| Fachkatalog Technikgeschichte                                            | ✗ | Thematischer Ausschluss (Technikgeschichte)                  |
| Fahrradportal                                                            | ✗ | Thematischer Ausschluss (Fahrrad)                            |
| Firedoc                                                                  | ✗ | Thematischer Ausschluss (Brandschutz)                        |
| FPO                                                                      | ✗ | Patentdatenbank                                              |
| Fraunhofer-ePrints                                                       | ✗ | Datenbank liefert keine Suchresultate                        |
| Fraunhofer-Publica                                                       | ✗ | Bibliographische Datenbank                                   |
| FreeSearch                                                               | ✗ | Datenbank liefert keine Suchresultate                        |
| Gateway Bayern Aufsatzsuche plus                                         | ✗ | Thematischer Ausschluss (Aufsätze)                           |
| Google Patent Search                                                     | ✗ | Patentdatenbank                                              |
| HoWiLit: Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft, Literaturdatenbank | ✗ | Thematischer Ausschluss (Holzwirtschaft)                     |
| IBR standards portal                                                     | ✗ | Normdatenbank                                                |
| IEEE ConferenceSearch                                                    | ✗ | Thematischer Ausschluss (Tagungskalender)                    |
| IEEE Xplore / Electronic Library Online                                  | ✓ |                                                              |
| IHS Standards Store                                                      | ✗ | Normdatenbank                                                |
| INTECH                                                                   | ✗ | Thematischer Ausschluss (KI, Robotik, Fertigungstechnik)     |
| International Directory for Bio-based Businesses                         | ✗ | Thematischer Ausschluss (biologisch basierte Werkstoffe)     |

| Datenbank                                                               |   | Ausschlusskriterium                                    |
|-------------------------------------------------------------------------|---|--------------------------------------------------------|
| International Galilean Bibliography                                     | × | Betrachtungszeitraum bis 1964                          |
| Internationale Patentklassifikation                                     | × | Patentdatenbank                                        |
| IsisCB Explore                                                          | × | Thematischer Ausschluss (Wissenschaftsgeschichte)      |
| ISO Standards                                                           | × | Normdatenbank                                          |
| ITU iLibrary                                                            | × | Thematischer Ausschluss (Telekommunikation)            |
| Japan Platform for Patent Information                                   | × | Patentdatenbank                                        |
| Japan Science and Technology Information Aggregator, Electronic (JSTOR) | × | Datenbank liefert keine Suchresultate                  |
| JuSer                                                                   | × | Bibliographische Datenbank                             |
| Katalog der Meereswissenschaftlichen Bibliotheken Deutschlands (AMB)    | × | Thematischer Ausschluss (Meereswissenschaften)         |
| Kompetenzatlas Nanotechnologie in Deutschland                           | × | Thematischer Ausschluss (Nanotechnologie)              |
| Langenscheidt Online-Wörterbuch                                         | × | Thematischer Ausschluss (Wörterbuch)                   |
| Lecture Notes in Control and Information Sciences                       | × | Betrachtungszeitraum bis 1996                          |
| Leibniz Publik                                                          | × | Thematischer Ausschluss (preisgekrönte Literatur)      |
| Lexikon der Fernerkundung                                               | × | Thematischer Ausschluss (Geografie)                    |
| LIVIVO - Das Suchportal für Lebenswissenschaften                        | × | Thematischer Ausschluss (Lebenswissenschaften)         |
| Lloyds Register of Ships                                                | × | Thematischer Ausschluss (Schifffahrt)                  |
| Mediathek der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR)                 | × | Thematischer Ausschluss (Nachwachsende Rohstoffe)      |
| Medizintechnik                                                          | × | Thematischer Ausschluss (Medizin)                      |
| My green Dictionary                                                     | × | Thematischer Ausschluss (Umweltschutz, Nachhaltigkeit) |
| NOA: Scientific Image Search                                            | × | Thematischer Ausschluss (Abbildungsdatenbank)          |
| Norm-Entwurfs-Portal / Deutsches Institut für Normung                   | × | Normdatenbank                                          |
| Oberflächentechnik                                                      | × | Thematischer Ausschluss (Oberflächentechnik)           |
| OECD.Stat                                                               | × | Thematischer Ausschluss (Statistik, Metadaten)         |
| Österreichisches Patentamt                                              | × | Patentdatenbank                                        |
| OLC Technik - Online Contents                                           | × | Datenbank liefert keine Suchresultate                  |
| OLC Technikgeschichte - Online Contents                                 | × | Thematischer Ausschluss (Technikgeschichte)            |
| Open Research Library (ORL)                                             | × | Datenbank liefert keine Suchresultate                  |
| Open-Access-Netzwerk: OAN                                               | × | Datenbank liefert keine Suchresultate                  |
| OpenGrey                                                                | × | Bibliographische Datenbank                             |
| openTA-Publikationsdienst                                               | × | Bibliographische Datenbank                             |

| Datenbank                                                                                            |   | Ausschlusskriterium                                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pastel                                                                                               | × | Französisch                                                                                                                              |
| Patent Full-Text Databases (USPTO)                                                                   | × | Patentdatenbank                                                                                                                          |
| Patentportal des Instituts für geistiges Eigentum IGE                                                | × | Patentdatenbank                                                                                                                          |
| Perinorm                                                                                             | × | Normdatenbank                                                                                                                            |
| Perinorm / DIN-Normen / VDI-Richtlinien                                                              | × | Normdatenbank                                                                                                                            |
| Phonobase                                                                                            | × | Thematischer Ausschluss (Tonausschnitte)                                                                                                 |
| Publikationsdatenbank / Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH | × | Thematischer Ausschluss (Material- und Küstenforschung)                                                                                  |
| PubSpace                                                                                             | × | Thematischer Ausschluss (Publikationen der NASA)                                                                                         |
| REPIDISCA                                                                                            | × | Thematischer Ausschluss (Umweltmedizin)                                                                                                  |
| Research Collection / ETH Zürich                                                                     | × | Thematischer Ausschluss (Publikationen der ETH-Zürich)                                                                                   |
| RP Photonics Encyclopedia / Rüdiger Paschotta                                                        | × | Thematischer Ausschluss (Lasertechnik)                                                                                                   |
| RSWB@plus - Literaturhinweise zum Planen und Bauen International                                     | × | Thematischer Ausschluss (Bauwesen)                                                                                                       |
| SAE Mobilus                                                                                          | × | Thematischer Ausschluss (Luftfahrt- und Automobiltechnik)                                                                                |
| Schiffsliste                                                                                         | × | Thematischer Ausschluss (Schifffahrt)                                                                                                    |
| Scienca kaj Teknika Esperanto-Biblioteko                                                             | × | Spanisch                                                                                                                                 |
| Science Accelerator                                                                                  | × | Thematischer Ausschluss (Forschungsprojekte des amerikanischen Energieministeriums)                                                      |
| Science History Institute - Digital Collections                                                      | × | Thematischer Ausschluss (Technikgeschichte)                                                                                              |
| ScienceDirect (frei zugänglich)                                                                      | × | in Datenbank des Uninetzes enthalten                                                                                                     |
| ScienceDirect (im Universitätsnetzwerk)                                                              | ✓ |                                                                                                                                          |
| ScienceDirect / Elsevier Journal Backfiles                                                           | × | Betrachtungszeitraum bis 1994                                                                                                            |
| Science.gov                                                                                          | × | Thematischer Ausschluss (Publikationen der amerikanischen Regierung)                                                                     |
| Scientific Tools & Databases / European Commission, Joint Research Centre                            | × | Thematischer Ausschluss (Energie, Transport, Umwelt, Klimawandel, Landwirtschaft, Lebensmittelsicherheit, Gesundheit, Verbraucherschutz) |
| Scientific.Net / Materials Science and Engineering / Trans Tech Publications Archiv                  | × | Thematischer Ausschluss (Werkstoffkunde)                                                                                                 |
| SCImago Journal & Country Rank                                                                       | × | Bibliographische Datenbank                                                                                                               |
| SJN: Die Suchmaschine der Technik                                                                    | × | Thematischer Ausschluss (B2B)                                                                                                            |
| SLUB-Personen-Wiki                                                                                   | × | Thematischer Ausschluss (Personendaten)                                                                                                  |
| SPIE newsroom                                                                                        | × | Thematischer Ausschluss (Optik, Photonik)                                                                                                |
| SumoBrain                                                                                            | × | Patentdatenbank                                                                                                                          |
| Swissreg                                                                                             | × | Patentdatenbank                                                                                                                          |

| Datenbank                                                                               |   | Ausschlusskriterium                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---|-------------------------------------------------------------------------------|
| TechJournalContents                                                                     | × | Thematischer Ausschluss (Personendaten)                                       |
| Technical Paper Search / IBM                                                            | × | Thematischer Ausschluss (Publikationen von IBM)                               |
| Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS)                                         | × | Thematischer Ausschluss (Arbeitswissenschaft)                                 |
| TED                                                                                     | × | Thematischer Ausschluss (Vorträge)                                            |
| TEMA Technik und Management                                                             | × | Bibliographische Datenbank                                                    |
| TGL, ST-RGW                                                                             | × | Normdatenbank                                                                 |
| ThaiScience                                                                             | × | Thematischer Ausschluss (Publikationen aus Thailand)                          |
| ThomasNet                                                                               | × | Thematischer Ausschluss (Verzeichnis nordamerikanischer Industrieunternehmen) |
| TIB-Portal                                                                              | ✓ |                                                                               |
| TIB-Portal / Taylor & Francis Online Archives                                           | × | im TIB-Portal (s.o.) enthalten                                                |
| TIB AV-Portal                                                                           | × | Thematischer Ausschluss (Videoarchiv)                                         |
| TLB: Technologie-Lizenz-Büro der Baden-Württembergischen Hochschulen GmbH               | × | Thematischer Ausschluss (Publikationen baden-württembergischer Hochschulen)   |
| TOGA Textil                                                                             | × | Thematischer Ausschluss (Textilindustrie)                                     |
| TRAIL: Technical Report Archive & Image Library                                         | × | Betrachtungszeitraum bis 1989                                                 |
| Unfallverhütungsvorschriften der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie | × | Thematischer Ausschluss (Unfallverhütung)                                     |
| VDI-Richtlinien                                                                         | × | Thematischer Ausschluss (VDI-Richtlinien)                                     |
| VDI-Richtlinien-Suche                                                                   | × | Thematischer Ausschluss (VDI-Richtlinien)                                     |
| Verpackungstechnik                                                                      | × | Thematischer Ausschluss (Verpackungstechnik)                                  |
| Web de Historia de la Propriedad Industrial                                             | × | Spanisch; Patentdatenbank                                                     |
| Web of Science Core Collection                                                          | ✓ |                                                                               |
| Web of Science / Science Citation Index Expanded                                        | × | Bibliographische Datenbank                                                    |
| Wiley Online Library                                                                    | × | Thematischer Ausschluss (Gesundheit, Sozial- und Geisteswissenschaften)       |
| WIPO                                                                                    | × | Patentdatenbank                                                               |
| WISO                                                                                    | ✓ |                                                                               |
| WissTecMed *Lit                                                                         | × | Thematischer Ausschluss (Technikgeschichte)                                   |
| WolframAlpha                                                                            | × | Thematischer Ausschluss (Formeln)                                             |
| WTI Frankfurt                                                                           | × | Bibliographische Datenbank                                                    |
| WTI - Wissensbasis Mittelstand-Materialien                                              | × | keine erweiterte Suchoption                                                   |
| Zertifikatsdatenbank DGUV Test                                                          | × | Zertifikationsdatenbank                                                       |

## B Ergebnisse der Primärrecherche

### B 1 Suchprozess und Ergebnisse aus Academic Search Ultimate (ASU)

**UNI KASSEL BIBLIOTHEK** Searching: Academic Search Ultimate [Choose Databases](#)

“Industrie 4.0” OR “Industry 4.0” TI Title ▾ **Search**

AND ▾ Reifegrad OR Readiness OR Maturity OR Capability Mo TI Title ▾ [Create Alert](#)

AND ▾ Select a Field (optional) ▾ [Clear](#) [?](#)

[Basic Search](#) [Advanced Search](#) [Search History](#)

**Search Options**

**Search Modes and Expanders**

**Search modes** [?](#)

☒ Boolean/Phrase

☐ Find all my search terms

☐ Find any of my search terms

☐ SmartText Searching [Hint](#)

**Limit your results**

**Full Text**

☐

**Scholarly (Peer Reviewed) Journals**

☐

**Published Date**

Month ▾ Year: 2011 — Month ▾ Year: 2020

| Nr. | Titel                                                                                                  |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Rapidly Arriving Futures: Future Readiness For Industry 4.0                                            |
| 2   | Using Maturity Model And Discrete-Event Simulation For Industry 4.0 Implementation                     |
| 3   | Three Stage Maturity Model in SME's towards Industry 4.0                                               |
| 4   | Towards An Initiative-Based Industry 4.0 Maturity Improvement Process: Master Drilling As A Case Study |
| 5   | Industry 4.0 Readiness Assessment For South African Industries                                         |
| 6   | Extent of Automation and the Readiness for Industry 4.0 among Malaysian Furniture Manufacturers        |
| 7   | Assessing the Awareness and Readiness of the Malaysian Furniture Industry for Industry 4.0             |
| 8   | Awareness and readiness of Industry 4.0: The case of Turkish manufacturing industry                    |
| 9   | Human Resources Readiness for Industry 4.0                                                             |

## B 2 Suchprozess und Ergebnisse aus IEEE Xplore / Electronic Library Online

Advanced Search
Command Search
Citation Search

Enter keywords, phrases, or a Boolean expression

Use the drop down lists to choose Data Fields and Operators. [Learn how to use Boolean expressions in Command Search.](#)

Data Fields
Operators

Operators need to be in all caps - i.e. AND/OR/NOT/NEAR/ONEAR. There is a maximum of 20 search terms.

Search Expression Examples ?

```
((("Document Title": "Industrie 4.0" OR "Document Title": "Industry 4.0") AND ("Document Title": Reifegrad OR "Document Title": Readiness OR "Document Title": Maturity OR "Document Title": Capability Model OR "Document Title": "Assessment Model" OR "Document Title": "Assessment Tool" OR "Document Title": "Process Improvement Model")))
```

| Nr. | Titel                                                                                                               |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Industry 4.0 maturity assessment of the Banking Sector of Sri Lanka                                                 |
| 2   | A review on the readiness level and cyber-security challenges in Industry 4.0                                       |
| 3   | Readiness Index for Indonesian Power Plant toward Industry 4.0                                                      |
| 4   | SIMMI 4.0 – A Maturity Model for Classifying the Enterprise-wide IT and Software Landscape Focusing on Industry 4.0 |
| 5   | Integration of Industry 4.0 and Assessment Model for Product Safety                                                 |
| 6   | A Critical Review of Maturity Models in Information Technology and Human Landscapes on Industry 4.0                 |
| 7   | Application of SIRI for Industry 4.0 Maturity Assessment and Analysis                                               |
| 8   | Assessing Industry 4.0 Readiness of Enterprises                                                                     |
| 9   | Implementing Industry 4.0 - A Technological Readiness Perspective                                                   |
| 10  | Towards Industry 4.0? Digital Maturity of the Manufacturing Industry in a Swedish Region                            |
| 11  | Assessing Industry 4.0 Maturity: An Essential Scale for SMEs                                                        |
| 12  | Investigation of Assessment and Maturity Stage Models for Assessing the Implementation of Industry 4.0              |

## B 3 Suchprozess und Ergebnisse aus ScienceDirect

Find articles with these terms

---

In this journal or book title Year(s)

2011-2020

---

Author(s) Author affiliation

---

Title, abstract or author-specified keywords

---

Title

("Industrie 4.0" OR "Industry 4.0") AND (Reifegrad OR Readiness OR Maturity OF

---

Volume(s) Issue(s) Page(s) ISSN or ISBN

---

| Nr. | Titel                                                                                                                               |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union                                                  |
| 2   | A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era                                     |
| 3   | Contextualizing the outcome of a maturity assessment for Industry 4.0                                                               |
| 4   | Industrie 4.0 roadmap: Framework for digital transformation based on the concepts of capability maturity and alignment              |
| 5   | Deriving essential components of lean and industry 4.0 assessment model for manufacturing SMEs                                      |
| 6   | Model to evaluate the Industry 4.0 readiness degree in Industrial Companies                                                         |
| 7   | Industry 4.0 readiness in manufacturing companies: challenges and enablers towards increased digitalization                         |
| 8   | A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs) |
| 9   | Industry 4.0 readiness in Hungary: model, and the first results in connection to data application                                   |
| 10  | Knowledge on IT Tools Based on AI Maturity – Industry 4.0 Perspective                                                               |
| 11  | The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0                                                                      |
| 12  | A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises                                     |
| 13  | Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises                 |
| 14  | Concept for an evolutionary maturity based Industrie 4.0 migration model                                                            |

## B 4 Suchprozess und Ergebnisse aus Web of Science Core Collection

TI=("Industrie 4.0" OR "Industry 4.0") AND TI=(Reifegrad OR Readiness OR Maturity OR Capability Model OR "Assessment Model" OR "Assessment Tool" OR "Process Improvement Model")

Search

Restrict results by languages and document types:

All languages  
English  
Afrikaans  
Arabic

All document types  
Article  
Abstract of Published Item  
Art Exhibit Review

Timespan

Custom year range ▼ 2011 ▼ to 2020 ▼

| Nr. | Titel                                                                                                                                |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy                                                                               |
| 2   | Development of an Industry 4.0 maturity model for the delivery process in supply chains                                              |
| 3   | Pilot Study of Readiness Of Czech Companies To Implement The Principles Of Industry 4.0                                              |
| 4   | A Metamodel for Evaluating Enterprise Readiness in the Context of Industry 4.0                                                       |
| 5   | A review on the readiness level and cyber-security challenges in Industry 4.0                                                        |
| 6   | Defining and assessing industry 4.0 maturity levels - case of the defence sector                                                     |
| 7   | Rapidly Arriving Futures: Future Readiness for Industry 4.0                                                                          |
| 8   | Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union                                                   |
| 9   | A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era                                      |
| 10  | Contextualizing the outcome of a maturity assessment for Industry 4.0                                                                |
| 11  | Using Maturity Model And Discrete-Event Simulation For Industry 4.0 Implementation                                                   |
| 12  | Three Stage Maturity Model in SME's towards Industry 4.0                                                                             |
| 13  | Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM                                                                 |
| 14  | Industrie 4.0 roadmap: Framework for digital transformation based on the concepts of capability maturity and alignment               |
| 15  | A Capability Assessment Model of Industry 4.0 Technologies for Viability Analysis of PoC (Proof Of Concept) in an Automotive Company |
| 16  | Concept for an evolutionary maturity based Industrie 4.0 migration model                                                             |
| 17  | SIMMI 4.0 – A Maturity Model for Classifying the Enterprise-wide IT and Software Landscape Focusing on Industry 4.0                  |
| 18  | Assessing the IT and Software Landscapes of Industry 4.0-Enterprises: The Maturity Model SIMMI 4.0                                   |
| 19  | Model to evaluate the Industry 4.0 readiness degree in Industrial Companies                                                          |
| 20  | Towards An Initiative-Based Industry 4.0 Maturity Improvement Process: Master Drilling As A Case Study                               |
| 21  | A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs)  |

|    |                                                                                                                            |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 22 | Organizational Culture as an Indication of Readiness to Implement Industry 4.0                                             |
| 23 | Using ICT indicators to measure readiness of countries to implement Industry 4.0 and the SDGs                              |
| 24 | Industry 4.0 readiness in Hungary: model, and the first results in connection to data application                          |
| 25 | Assessing Industry 4.0 Readiness of Enterprises                                                                            |
| 26 | A Maturity Level-Based Assessment Tool to Enhance the Implementation of Industry 4.0 in Small and Medium-Sized Enterprises |
| 27 | Implementing Industry 4.0 - A Technological Readiness Perspective                                                          |
| 28 | Towards a Better Modelling and Assessment of Project Management Maturity in Industry 4.0                                   |
| 29 | Awareness and readiness of Industry 4.0: The case of Turkish manufacturing industry                                        |
| 30 | A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises                            |
| 31 | Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises        |
| 32 | Industrie 4.0 Readiness: Green Computing in Relation with Key Performance Indicator for a Manufacturing Industry           |
| 33 | Drivers and barriers for Industry 4.0 readiness and practice: empirical evidence from small and medium-sized manufacturers |
| 34 | Need and Solution to Transform the Manufacturing Industry in the Age of Industry 4.0-A Capability Maturity Index Approach  |
| 35 | Relevant Capabilities for Information Management to Achieve Industrie 4.0 Maturity                                         |
| 36 | The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0                                                             |
| 37 | Assessing Industry 4.0 Maturity: An Essential Scale for SMEs                                                               |
| 38 | Industry 4.0 Readiness Factor Calculation: Criteria Evaluation Framework                                                   |
| 39 | Investigation of Assessment and Maturity Stage Models for Assessing the Implementation of Industry 4.0                     |
| 40 | Readiness of Enterprises in Czech Republic to Implement Industry 4.0: Index of Industry 4.0                                |
| 41 | Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice          |
| 42 | acatech Industrie 4.0 Maturity Index - A Multidimensional Maturity Model                                                   |

## B 5 Suchprozess und Ergebnisse aus WISO

**Suche in Alle Quellen**

☐ nur im Abstract  ☒ nur im Titel 

 **Erweiterte Suche**

☐ Grafik

Titel   
 Person   
 Firma   
 Schlagworte   
 Branche   
 Land

☒ Erscheinungsdatum   bis  

| Nr. | Titel                                                                                                                                         |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Industrie 4.0 Maturity Index - Managing the Digital Transformation of Companies                                                               |
| 2   | Leitfaden für die vernetzte Produktion - TÜV Süd beteiligte sich an Industrie 4.0-Maturity-Index - Digitalisierte Prozesse helfen beim Sparen |
| 3   | Pilot Study of Readiness Of Czech Companies To Implement The Principles Of Industry 4.0                                                       |
| 4   | Defining and assessing industry 4.0 maturity levels - case of the defence sector                                                              |
| 5   | Design of Self-assessment Tools to Measure Industry 4.0 Readiness. A Methodological Approach for Craftsmanship SMEs                           |
| 6   | Product Lifecycle Management Maturity Models in Industry 4.0                                                                                  |
| 7   | Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union                                                            |
| 8   | Contextualizing the outcome of a maturity assessment for Industry 4.0                                                                         |
| 9   | Morocco's Readiness to Industry 4.0                                                                                                           |
| 10  | Using Maturity Model And Discrete-Event Simulation For Industry 4.0 Implementation                                                            |
| 11  | Three Stage Maturity Model in SME's towards Industry 4.0                                                                                      |
| 12  | Bereit für Industrie 4.0? Standortbestimmung mit dem Maturity Index                                                                           |
| 13  | Industrie 4.0 Maturity Index - Mit individueller Roadmap zur vernetzten Produktion                                                            |
| 14  | Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM                                                                          |
| 15  | Industry 4.0 readiness in manufacturing companies: challenges and enablers towards increased digitalization                                   |
| 16  | Readiness for Implementing Industry 4.0 in Food and Beverage Manufacturer in Indonesia                                                        |
| 17  | Industrie 4.0 roadmap: Framework for digital transformation based on the concepts of capability maturity and alignment                        |

|    |                                                                                                                                           |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 18 | Does Industry 4.0 Pose a Challenge for the SME Machine Builder? A Case Study and Reflection of Readiness for a UK SME                     |
| 19 | Deriving essential components of lean and industry 4.0 assessment model for manufacturing SMEs                                            |
| 20 | Checkliste zur Eigenbewertung der Industrie 4.0-Readiness für kleine und mittlere Unternehmen (KMU)                                       |
| 21 | SIMMI 4.0 – Vorschlag eines Reifegradmodells zur Klassifikation der unternehmensweiten Anwendungssystemlandschaft mit Fokus Industrie 4.0 |
| 22 | Industrie 4.0-Readiness                                                                                                                   |
| 23 | Industry 4.0 Closed Loop Tolerance Engineering Maturity Evaluation                                                                        |
| 24 | The Development of Industry 4.0 Readiness Model. Case Study in Indonesia's Priority Industrial Sector of Chemical                         |
| 25 | Measuring Business Sustainability Maturity-levels and Best Practices                                                                      |
| 26 | A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs)       |
| 27 | Development of an organizational maturity model in terms of mass customization                                                            |
| 28 | Assessment of Organizational Capability for Data Utilization – A Readiness Model in the Context of Industry 4.0                           |
| 29 | Using ICT indicators to measure readiness of countries to implement Industry 4.0 and the SDGs                                             |
| 30 | Designing Self-Assessment Tool for Library Performance Measurement Adopting Malcolm Baldrige Framework (Case Study)                       |
| 31 | Industrie 4.0-Readiness von Supply Chain-Netzwerken - Qualitative und quantitative Analyse am Beispiel der Automobilindustrie             |
| 32 | Awareness and readiness of Industry 4.0: The case of Turkish manufacturing industry                                                       |
| 33 | Nächster Halt Industrie 4.0 - Industrie 4.0 Maturity Index als Fahrplan der digitalen Transformation                                      |
| 34 | Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises                       |
| 35 | Industrie 4.0-Readiness: Eine empirische Fallstudie in der Automobilproduktion                                                            |
| 36 | Concept for an evolutionary maturity based Industrie 4.0 migration model                                                                  |
| 37 | Relevant Capabilities for Information Management to Achieve Industrie 4.0 Maturity                                                        |
| 38 | acatech Industrie 4.0 Maturity Index - A Multidimensional Maturity Model                                                                  |

## C Filtrierung der Ergebnisse der Primärrecherche

(Farbliche Kennzeichnung gemäß der Kategorie: **Eigenständiges Modell**, **Review** oder **Ausschluss**)

| [Nr.] | Autor, Jahr              | Titel                                                                                                                                | Quelle         | Inhalt/Ausschluss                                                                                  |
|-------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [1]   | Justus et al. 2018       | A Capability Assessment Model of Industry 4.0 Technologies for Viability Analysis of PoC (Proof Of Concept) in an Automotive Company | Web of Science | Ausschluss: Spezialfall (Referenzarchitektur für Predictive Maintenance in der Automobilindustrie) |
| [2]   | Li, Lau 2019             | A Critical Review of Maturity Models in Information Technology and Human Landscapes on Industry 4.0                                  | IEEE Explore   | Review (Fokus: IT und HR-Perspektive)                                                              |
| [3]   | Mittal et al. 2018       | A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs)  | Science Direct | Review (Fokus: KMU)                                                                                |
| [4]   | Mittal et al. 2018       | A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs)  | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [3]                                                                |
| [5]   | Mittal et al. 2018       | A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs)  | WISO           | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [3]                                                                |
| [6]   | Colli et al. 2019        | A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era                                      | Science Direct | Eigenständiges Modell (Fokus: Individuelle Roadmaps auf Basis der Einstufung)                      |
| [7]   | Colli et al. 2019        | A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era                                      | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [6]                                                                |
| [8]   | Rauch et al. 2020        | A Maturity Level-Based Assessment Tool to Enhance the Implementation of Industry 4.0 in Small and Medium-Sized Enterprises           | Web of Science | Eigenständiges Modell (Fokus: KMU)                                                                 |
| [9]   | Schumacher et al. 2016   | A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises                                      | Science Direct | Eigenständiges Modell (allgemein) s. hierzu auch Quelle [95]                                       |
| [10]  | Schumacher et al. 2016   | A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises                                      | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [9]                                                                |
| [11]  | Basl, Doucek 2019        | A Metamodel for Evaluating Enterprise Readiness in the Context of Industry 4.0                                                       | Web of Science | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                  |
| [12]  | Benias, Markopoulos 2017 | A review on the readiness level and cyber-security challenges in Industry 4.0                                                        | IEEE Explore   | Ausschluss: Spezialfall (Cyber-Sicherheit im Kontext von Industrie 4.0)                            |

| [Nr.] | Autor, Jahr                | Titel                                                                                                           | Quelle         | Inhalt/Ausschluss                                                                                   |
|-------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [13]  | Benias, Markopoulos 2017   | A review on the readiness level and cyber-security challenges in Industry 4.0                                   | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [12]                                                                |
| [14]  | Zeller et al. 2018         | acatech Industrie 4.0 Maturity Index - A Multidimensional Maturity Model                                        | Web of Science | Ausschluss: Kurzfassung von Quelle [55]                                                             |
| [15]  | Zeller et al. 2018         | acatech Industrie 4.0 Maturity Index - A Multidimensional Maturity Model                                        | WISO           | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [14]                                                                |
| [16]  | Lin et al. 2019            | Application of SIRI for Industry 4.0 Maturity Assessment and Analysis                                           | IEEE Explore   | Ausschluss: Anwendungsfall (Beispielhafte Anwendung von Quelle [143])                               |
| [17]  | Trotta, Garengo 2019       | Assessing Industry 4.0 Maturity: An Essential Scale for SMEs                                                    | IEEE Explore   | Eigenständiges Modell (Fokus: KMU)                                                                  |
| [18]  | Trotta, Garengo 2019       | Assessing Industry 4.0 Maturity: An Essential Scale for SMEs                                                    | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [17]                                                                |
| [19]  | Castelo-Branco et al. 2019 | Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union                              | Science Direct | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness der EU)                          |
| [20]  | Castelo-Branco et al. 2019 | Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union                              | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [19]                                                                |
| [21]  | Castelo-Branco et al. 2019 | Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union                              | WISO           | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [19]                                                                |
| [22]  | Rajnai, Kocsis 2018        | Assessing Industry 4.0 Readiness of Enterprises                                                                 | IEEE Explore   | Review                                                                                              |
| [23]  | Rajnai, Kocsis 2018        | Assessing Industry 4.0 Readiness of Enterprises                                                                 | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [22]                                                                |
| [24]  | Ratnasingam et al. 2020    | Assessing the Awareness and Readiness of the Malaysian Furniture Industry for Industry 4.0                      | ASU            | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness der malaysischen Möbelindustrie) |
| [25]  | Leyh et al. 2017           | Assessing the IT and Software Landscapes of Industry 4.0-Enterprises: The Maturity Model SIMMI 4.0              | Web of Science | Ausschluss: englische Version von Quelle [100]                                                      |
| [26]  | Nausch et al. 2020         | Assessment of Organizational Capability for Data Utilization – A Readiness Model in the Context of Industry 4.0 | WISO           | Ausschluss: Spezialfall (Industrielle Datennutzung im Kontext von Industrie 4.0)                    |
| [27]  | Sari et al. 2020           | Awareness and readiness of Industry 4.0: The case of Turkish manufacturing industry                             | ASU            | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness türkischer Unternehmen)          |
| [28]  | Sari et al. 2020           | Awareness and readiness of Industry 4.0: The case of Turkish manufacturing industry                             | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [27]                                                                |
| [29]  | Sari et al. 2020           | Awareness and readiness of Industry 4.0: The case of Turkish manufacturing industry                             | WISO           | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [27]                                                                |

| [Nr.] | Autor, Jahr                     | Titel                                                                                                               | Quelle         | Inhalt/Ausschluss                                                                                                                         |
|-------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [30]  | Gärtner 2018a                   | Bereit für Industrie 4.0? Standortbestimmung mit dem Maturity Index                                                 | WISO           | Ausschluss: Anwendungsfall (Beispielhafte Anwendung von Quelle [55])                                                                      |
| [31]  | Landwehr-Zloch, Eichfelder 2019 | Checkliste zur Eigenbewertung der Industrie 4.0-Readiness für kleine und mittlere Unternehmen (KMU)                 | WISO           | Eigenständiges Modell (Fokus: KMU)                                                                                                        |
| [32]  | Leineweber et al. 2018          | Concept for an evolutionary maturity based Industrie 4.0 migration model                                            | Science Direct | Eigenständiges Modell (Fokus: KMU)                                                                                                        |
| [33]  | Leineweber et al. 2018          | Concept for an evolutionary maturity based Industrie 4.0 migration model                                            | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [32]                                                                                                      |
| [34]  | Leineweber et al. 2018          | Concept for an evolutionary maturity based Industrie 4.0 migration model                                            | WISO           | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [32]                                                                                                      |
| [35]  | Colli et al. 2018               | Contextualizing the outcome of a maturity assessment for Industry 4.0                                               | Science Direct | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                                                         |
| [36]  | Colli et al. 2018               | Contextualizing the outcome of a maturity assessment for Industry 4.0                                               | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [35]                                                                                                      |
| [37]  | Colli et al. 2018               | Contextualizing the outcome of a maturity assessment for Industry 4.0                                               | WISO           | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [35]                                                                                                      |
| [38]  | Bibby, Dehe 2018                | Defining and assessing industry 4.0 maturity levels - case of the defence sector                                    | Web of Science | Eigenständiges Modell (Fokus: Großunternehmen aus dem Verteidigungssektor)                                                                |
| [39]  | Bibby, Dehe 2018                | Defining and assessing industry 4.0 maturity levels - case of the defence sector                                    | WISO           | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [38]                                                                                                      |
| [40]  | Kolla et al. 2019               | Deriving essential components of lean and industry 4.0 assessment model for manufacturing SMEs                      | Science Direct | Review und Modell-Vorstufe: Mapping von KMU-Eigenschaften und Industrie 4.0/Lean Technologien als Basis für ein neues Modell (Fokus: KMU) |
| [41]  | Kolla et al. 2019               | Deriving essential components of lean and industry 4.0 assessment model for manufacturing SMEs                      | WISO           | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [40]                                                                                                      |
| [42]  | Brozzi et al. 2018              | Design of Self-assessment Tools to Measure Industry 4.0 Readiness. A Methodological Approach for Craftmanship SMEs  | WISO           | Eigenständiges Modell (Fokus: Handwerksbetriebe)                                                                                          |
| [43]  | Putri et al. 2019               | Designing Self-Assessment Tool for Library Performance Measurement Adopting Malcolm Baldrige Framework (Case Study) | WISO           | Ausschluss: themenfremd (Bewertung von Universitätsbibliotheken)                                                                          |

| [Nr.] | Autor, Jahr              | Titel                                                                                                                      | Quelle         | Inhalt/Ausschluss                                                                                                |
|-------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [44]  | Gökalp et al. 2017       | Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM                                                       | Web of Science | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                                |
| [45]  | Gökalp et al. 2017       | Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM                                                       | WISO           | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [44]                                                                             |
| [46]  | Asdecker, Felch 2018     | Development of an Industry 4.0 maturity model for the delivery process in supply chains                                    | Web of Science | Eigenständiges Modell (Fokus: Supply Chain Management)                                                           |
| [47]  | Modrák, Šoltysová 2020   | Development of an organizational maturity model in terms of mass customization                                             | WISO           | Eigenständiges Modell (Fokus: kundenindividuelle Massenfertigung)                                                |
| [48]  | Wagire et al. 2020       | Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice          | Web of Science | Eigenständiges Modell (Fokus: produzierendes Gewerbe in Indien)                                                  |
| [49]  | Jones et al. 2019        | Does Industry 4.0 Pose a Challenge for the SME Machine Builder? A Case Study and Reflection of Readiness for a UK SME      | WISO           | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness des englischen Maschinenherstellers TQC Ltd.) |
| [50]  | Stentoft et al. 2020     | Drivers and barriers for Industry 4.0 readiness and practice: Empirical evidence from small and medium-sized manufacturers | Web of Science | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness in Dänischen KMUs)                            |
| [51]  | Ratnasingam et al. 2019  | Extent of Automation and the Readiness for Industry 4.0 among Malaysian Furniture Manufacturers                            | ASU            | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness der Malaysischen Möbelindustrie)              |
| [52]  | Vrchota et al. 2020      | Human Resources Readiness for Industry 4.0                                                                                 | ASU            | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness von Angestellten in Tschechien)               |
| [53]  | Samaranayake et al. 2017 | Implementing Industry 4.0 - A Technological Readiness Perspective                                                          | IEEE Explore   | Ausschluss: Spezialfall (Gewichtung technologischer Faktoren im Kontext von Industrie 4.0)                       |
| [54]  | Samaranayake et al. 2017 | Implementing Industry 4.0 - A Technological Readiness Perspective                                                          | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [53]                                                                             |
| [55]  | Schuh et al. 2017        | Industrie 4.0 Maturity Index - Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten (acatech STUDIE)                      | WISO           | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                                |
| [56]  | Gärtner 2018b            | Industrie 4.0 Maturity Index - Mit individueller Roadmap zur vernetzten Produktion                                         | WISO           | Ausschluss: Quelle besitzt sehr geringen Umfang und stellt lediglich einen Teilaspekt von Quelle [55] dar        |
| [57]  | Shahzad, Gulzar 2020     | Industrie 4.0 Readiness: Green Computing in Relation with Key Performance Indicator for a Manufacturing Industry           | Web of Science | Ausschluss: themenfremd (Nutzung von Key Performance Indicators im Kontext von Industrie 4.0)                    |

| [Nr.] | Autor, Jahr                  | Titel                                                                                                                         | Quelle         | Inhalt/Ausschluss                                                                                                     |
|-------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [58]  | Issa et al. 2018             | Industrie 4.0 roadmap: Framework for digital transformation based on the concepts of capability maturity and alignment        | Science Direct | Eigenständiges Modell (Fokus: Roadmap-Entwicklung)                                                                    |
| [59]  | Issa et al. 2018             | Industrie 4.0 roadmap: Framework for digital transformation based on the concepts of capability maturity and alignment        | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [58]                                                                                  |
| [60]  | Issa et al. 2018             | Industrie 4.0 roadmap: Framework for digital transformation based on the concepts of capability maturity and alignment        | WISO           | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [58]                                                                                  |
| [61]  | Lichtblau et al. 2015        | IMPULS: Industrie 4.0-Readiness                                                                                               | WISO           | Eigenständiges Modell (Fokus: Maschinen- und Anlagenbau in Deutschland)                                               |
| [62]  | Reder et al. 2018            | Industrie 4.0-Readiness von Supply Chain-Netzwerken - Qualitative und quantitative Analyse am Beispiel der Automobilindustrie | WISO           | Ausschluss: Anwendungsfall (Anwendung des "Industrie 4.0-Readiness Kompass" in der deutschen Automobilindustrie)      |
| [63]  | Schwinghammer, Buettner 2016 | Industrie 4.0-Readiness: Eine empirische Fallstudie in der Automobilproduktion                                                | WISO           | Ausschluss: Anwendungsfall (Fallstudie zur Industrie 4.0-Readiness der deutschen Automobilindustrie)                  |
| [64]  | Martinsen 2019               | Industry 4.0 Closed Loop Tolerance Engineering Maturity Evaluation                                                            | WISO           | Ausschluss: Spezialfall (Modell zur Ermittlung des Reifegrades hinsichtlich Closed Loop Tolerance Engineering (CLTE)) |
| [65]  | Bandara et al. 2019          | Industry 4.0 maturity assessment of the Banking Sector of Sri Lanka                                                           | IEEE Explore   | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness des Bankensektors in Sri Lanka)                    |
| [66]  | Maisiri, van Dyk 2019        | Industry 4.0 Readiness Assessment For South African Industries                                                                | ASU            | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness in Südafrika)                                      |
| [67]  | Trstenjak et al. 2019        | Industry 4.0 Readiness Factor Calculation: Criteria Evaluation Framework                                                      | Web of Science | Eigenständiges Modell (Fokus: Pareto-Optimierung der Modellfaktoren)                                                  |
| [68]  | Nick et al. 2019             | Industry 4.0 readiness in Hungary: model, and the first results in connection to data application                             | Science Direct | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness der Automobilindustrie in Ungarn)                  |
| [69]  | Nick et al. 2019             | Industry 4.0 readiness in Hungary: model, and the first results in connection to data application                             | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [68]                                                                                  |
| [70]  | Machado et al. 2019          | Industry 4.0 readiness in manufacturing companies: challenges and enablers towards increased digitalization                   | Science Direct | Ausschluss: Anwendungsfall (Anwendung von Quelle [61])                                                                |
| [71]  | Machado et al. 2019          | Industry 4.0 readiness in manufacturing companies: challenges and enablers towards increased digitalization                   | WISO           | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [70]                                                                                  |

| [Nr.] | Autor, Jahr              | Titel                                                                                                                                         | Quelle         | Inhalt/Ausschluss                                                                                       |
|-------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [72]  | Li, Lau 2018             | Integration of Industry 4.0 and Assessment Model for Product Safety                                                                           | IEEE Explore   | Ausschluss: themenfremd (Modell(e) zur Bewertung von Produktsicherheit)                                 |
| [73]  | Unterhofer et al. 2018   | Investigation of Assessment and Maturity Stage Models for Assessing the Implementation of Industry 4.0                                        | IEEE Explore   | Review (Fokus: KMU)<br>Grundlage für Quelle [8]                                                         |
| [74]  | Unterhofer et al. 2018   | Investigation of Assessment and Maturity Stage Models for Assessing the Implementation of Industry 4.0                                        | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [73]                                                                    |
| [75]  | Niewiadomski et al. 2019 | Knowledge on IT Tools Based on AI Maturity – Industry 4.0 Perspective                                                                         | Science Direct | Ausschluss: Spezialfall (Umsetzung von AI-Lösungen)                                                     |
| [76]  | TÜV Süd 2017             | Leitfaden für die vernetzte Produktion - TÜV Süd beteiligte sich an Industrie 4.0-Maturity-Index - Digitalisierte Prozesse helfen beim Sparen | WISO           | Ausschluss: Quelle besitzt sehr geringen Umfang und stellt lediglich einen Kommentar zu Quelle [55] dar |
| [77]  | Akdil et al. 2018        | Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy                                                                                        | Web of Science | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                       |
| [78]  | Meza-Ruiz et al. 2017    | Measuring Business Sustainability Maturity-levels and Best Practices                                                                          | WISO           | Ausschluss: Spezialfall (Reifegrad hinsichtlich Nachhaltigkeit)                                         |
| [79]  | Lucato et al. 2019       | Model to evaluate the Industry 4.0 readiness degree in Industrial Companies                                                                   | Science Direct | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                       |
| [80]  | Lucato et al. 2019       | Model to evaluate the Industry 4.0 readiness degree in Industrial Companies                                                                   | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [79]                                                                    |
| [81]  | El Hamdi et al. 2020     | Morocco's Readiness to Industry 4.0                                                                                                           | WISO           | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness in Marokko)                          |
| [82]  | Schmitz 2019             | Nächster Halt Industrie 4.0 - Industrie 4.0 Maturity Index als Fahrplan der digitalen Transformation                                          | WISO           | Ausschluss: Kurzfassung von Quelle [55]                                                                 |
| [83]  | Stich et al. 2018        | Need and Solution to Transform the Manufacturing Industry in the Age of Industry 4.0-A Capability Maturity Index Approach                     | Web of Science | Ausschluss: Anwendungsfall (Möglichkeiten zur Umsetzung von Industrie 4.0)                              |
| [84]  | Nafchi, Mohelska 2020    | Organizational Culture as an Indication of Readiness to Implement Industry 4.0                                                                | Web of Science | Ausschluss: Spezialfall (Reifegradermittlung ausschließlich hinsichtlich der Unternehmenskultur)        |
| [85]  | Basl 2017                | Pilot Study of Readiness Of Czech Companies To Implement The Principles Of Industry 4.0                                                       | Web of Science | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness in Tschechien)                       |
| [86]  | Basl 2017                | Pilot Study of Readiness Of Czech Companies To Implement The Principles Of Industry 4.0                                                       | WISO           | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [85]                                                                    |

| [Nr.] | Autor, Jahr                                   | Titel                                                                                                                                     | Quelle         | Inhalt/Ausschluss                                                                                           |
|-------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [87]  | Cabral Pereira dos Santos, Kassio et al. 2018 | Product Lifecycle Management Maturity Models in Industry 4.0                                                                              | WISO           | Ausschluss: Spezialfall (Reifegrad hinsichtlich PLM)                                                        |
| [88]  | Botha 2018                                    | Rapidly Arriving Futures: Future Readiness For Industry 4.0                                                                               | ASU            | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                           |
| [89]  | Botha 2018                                    | Rapidly Arriving Futures: Future Readiness for Industry 4.0                                                                               | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [88]                                                                        |
| [90]  | Ichsan et al. 2019                            | Readiness for Implementing Industry 4.0 in Food and Beverage Manufacturer in Indonesia                                                    | WISO           | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness der Lebensmittelindustrie in Indonesien) |
| [91]  | Indrawan et al. 2019                          | Readiness Index for Indonesian Power Plant toward Industry 4.0                                                                            | IEEE Explore   | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness des Energiesektors in Indonesien)        |
| [92]  | Vrchota, Pech 2019                            | Readiness of Enterprises in Czech Republic to Implement Industry 4.0: Index of Industry 4.0                                               | Web of Science | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness in Tschechien)                           |
| [93]  | Stich et al. 2017                             | Relevant Capabilities for Information Management to Achieve Industrie 4.0 Maturity                                                        | Web of Science | Ausschluss: Spezialfall (Anforderungen an die Datenverwaltung im Kontext von Industrie 4.0)                 |
| [94]  | Stich et al. 2017                             | Relevant Capabilities for Information Management to Achieve Industrie 4.0 Maturity                                                        | WISO           | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [93]                                                                        |
| [95]  | Schumacher et al. 2019                        | Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises                       | Science Direct | Eigenständiges Modell (Weiterentwicklung von Quelle [9])                                                    |
| [96]  | Schumacher et al. 2019                        | Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises                       | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [95]                                                                        |
| [97]  | Schumacher et al. 2019                        | Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises                       | WISO           | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [95]                                                                        |
| [98]  | Leyh et al. 2016a                             | SIMMI 4.0 – A Maturity Model for Classifying the Enterprise-wide IT and Software Landscape Focusing on Industry 4.0                       | IEEE Explore   | Ausschluss: englische Kurzversion von Quelle [100]                                                          |
| [99]  | Leyh et al. 2016a                             | SIMMI 4.0 – A Maturity Model for Classifying the Enterprise-wide IT and Software Landscape Focusing on Industry 4.0                       | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [98]                                                                        |
| [100] | Leyh et al. 2016b                             | SIMMI 4.0 – Vorschlag eines Reifegradmodells zur Klassifikation der unternehmensweiten Anwendungssystemlandschaft mit Fokus Industrie 4.0 | WISO           | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                           |

| [Nr.] | Autor, Jahr              | Titel                                                                                                             | Quelle         | Inhalt/Ausschluss                                                                                         |
|-------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [101] | Pacchini et al. 2019     | The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0                                                    | Science Direct | Eigenständiges Modell (Fokus: Bereitschaft zur Umsetzung im Unternehmen)                                  |
| [102] | Pacchini et al. 2019     | The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0                                                    | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [101]                                                                     |
| [103] | Mayusda, Wiratmadja 2019 | The Development of Industry 4.0 Readiness Model. Case Study in Indonesia's Priority Industrial Sector of Chemical | WISO           | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness der Primärindustrie in Indonesien)     |
| [104] | Ganzarain, Errasti 2016  | Three Stage Maturity Model in SME's towards Industry 4.0                                                          | ASU            | Eigenständiges Modell (Fokus: KMU)                                                                        |
| [105] | Ganzarain, Errasti 2016  | Three Stage Maturity Model in SME's towards Industry 4.0                                                          | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [104]                                                                     |
| [106] | Ganzarain, Errasti 2016  | Three Stage Maturity Model in SME's towards Industry 4.0                                                          | WISO           | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [104]                                                                     |
| [107] | Sanchez et al. 2019      | Towards a Better Modelling and Assessment of Project Management Maturity in Industry 4.0                          | Web of Science | Ausschluss: Spezialfall (Reifegrad des Projektmanagements im Kontext von Industrie 4.0)                   |
| [108] | Maasz, Darwish 2018      | Towards An Initiative-Based Industry 4.0 Maturity Improvement Process: Master Drilling As A Case Study            | ASU            | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness des Bergbausektors in Südafrika)       |
| [109] | Maasz, Darwish 2018      | Towards An Initiative-Based Industry 4.0 Maturity Improvement Process: Master Drilling As A Case Study            | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [108]                                                                     |
| [110] | Sundberg et al. 2019     | Towards Industry 4.0? Digital Maturity of the Manufacturing Industry in a Swedish Region                          | IEEE Explore   | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness in Schweden)                           |
| [111] | Nhamo et al. 2020        | Using ICT indicators to measure readiness of countries to implement Industry 4.0 and the SDGs                     | Web of Science | Ausschluss: themenfremd (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness mittels ICT-Kennzahlen)                   |
| [112] | Nhamo et al. 2020        | Using ICT indicators to measure readiness of countries to implement Industry 4.0 and the SDGs                     | WISO           | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [111]                                                                     |
| [113] | Gajsek et al. 2019       | Using Maturity Model And Discrete-Event Simulation For Industry 4.0 Implementation                                | ASU            | Ausschluss: Anwendungsfall (Anwendung von Quelle [55] in Kombination mit ereignisorientierter Simulation) |
| [114] | Gajsek et al. 2019       | Using Maturity Model And Discrete-Event Simulation For Industry 4.0 Implementation                                | Web of Science | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [113]                                                                     |
| [115] | Gajsek et al. 2019       | Using Maturity Model And Discrete-Event Simulation For Industry 4.0 Implementation                                | WISO           | Ausschluss: Dopplung mit Quelle [113]                                                                     |

**D Filtrierung der Ergebnisse aus der Rückwärtssuche**

| [Nr.] | Autor, Jahr              | Titel                                                                                                                              | Inhalt/Ausschluss                                                                                                  |
|-------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [116] | Pessl et al. 2017        | Roadmap Industry 4.0 – Implementation Guideline for Enterprises                                                                    | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                                  |
| [117] | Scremin et al. 2018      | Towards a framework for Assessing the Maturity of Manufacturing Companies in Industry 4.0 Adoption                                 | Ausschluss: kein Volltextzugriff                                                                                   |
| [118] | Geissbauer et al. 2016   | Industry 4.0: Building the digital enterprise                                                                                      | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                                  |
| [119] | Rockwell Automation 2014 | The Connected Enterprise Maturity Model                                                                                            | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                                  |
| [120] | Qin et al. 2016          | A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond                                                               | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                                  |
| [121] | Kannan et al. 2017       | Towards Industry 4.0: Gap Analysis between Current Automotive MES and Industry Standards using Model-Based Requirement Engineering | Ausschluss: kein Modell, sondern Gap-Analyse                                                                       |
| [122] | Weyer et al. 2015        | Towards Industry 4.0 - Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems                | Ausschluss: themenfremd (Standardisierung im Kontext der Industrie 4.0)                                            |
| [123] | Jung et al. 2016         | An Overview of a Smart Manufacturing System Readiness Assessment                                                                   | Eigenständiges Modell (sehr mathematisch)                                                                          |
| [124] | Anderl 2015              | Leitfaden Industrie 4.0 - Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand                                                     | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                                  |
| [125] | Lee et al. 2017          | A Smartness Assessment Framework for Smart Factories Using Analytic Network Process                                                | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                                  |
| [126] | De Carolis et al. 2017   | A Maturity Model for Assessing the Digital Readiness of Manufacturing Companies                                                    | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                                  |
| [127] | Bittighofer et al. 2018  | State of Industry 4.0 Across German Companies                                                                                      | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness deutscher Unternehmen)                          |
| [128] | Puchan et al. 2018       | Industry 4.0 in Practice - Identification of Industry 4.0 Success Patterns                                                         | Ausschluss: Anwendungsfall (Anwendung eines nicht näher erläuterten Modells)                                       |
| [129] | Hamidi et al. 2018       | SMEs Maturity Model Assessment of IR4.0 Digital Transformation                                                                     | Ausschluss: Anwendungsfall (Anwendung von Quelle [61] zur Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness malaysischer KMU) |
| [130] | Sheen, Yang 2018         | Assessment of Readiness for Smart Manufacturing and Innovation in Korea                                                            | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness koreanischer KMU)                               |
| [131] | Chonsawat, Sopadang 2019 | The Development of the Maturity Model to evaluate the Smart SMEs 4.0 Readiness                                                     | Ausschluss: mindere Qualität (extrem schlechter Sprachgebrauch)                                                    |
| [132] | Schiffer et al. 2019     | Self-assessment of Industry 4.0 Technologies in Intralogistics for SME's                                                           | Ausschluss: Spezialfall (betrachtet nur Intralogistik)                                                             |

| [Nr.] | Autor, Jahr              | Titel                                                                                                                                      | Inhalt/Ausschluss                                                                                         |
|-------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [133] | Krowas, Riedel 2019      | Planning Guideline and Maturity Model for Intra-logistics 4.0 in SME                                                                       | Ausschluss: Spezialfall (betrachtet nur Intralogistik)                                                    |
| [134] | Brunner et al. 2016      | Reifegradmodell Industrie 4.0 - Unternehmen durch Industrie 4.0 stärken                                                                    | Ausschluss: Kurzfassung von Quelle [139]                                                                  |
| [135] | Hankel 2015              | RAMI 4.0                                                                                                                                   | Ausschluss: themenfremd (kein Maturity Model, sondern allgemeine Richtlinie zu Industrie 4.0)             |
| [136] | Weber et al. 2017        | M2DDM - A Maturity Model for Data-Driven Manufacturing                                                                                     | Ausschluss: Spezialfall (betrachtet nur Datenverwaltung/-nutzung)                                         |
| [137] | Bogner et al. 2016       | Study Based Analysis on the Current Digitalization Degree in the Manufacturing Industry in Germany                                         | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness in Deutschland)                        |
| [138] | Jodlbauer, Schagerl 2016 | Reifegradmodell Industrie 4.0 - Ein Vorgehensmodell zur Identifikation von Industrie 4.0 Potentialen                                       | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                         |
| [139] | Back, Berghaus 2016      | Digital Maturity & Transformation Studie - Über das Digital Maturity Model                                                                 | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                         |
| [140] | Halenár et al. 2016      | Design of a Communication Scheme in a Modern Factory in Accordance with the Standard of Industry 4.0                                       | Ausschluss: kein Reifegradmodell                                                                          |
| [141] | Agca et al. 2017         | An Industry 4 Readiness Assessment Tool                                                                                                    | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                         |
| [142] | Dennis et al. 2017       | Asset Performance Management Maturity Model - Strategic Roadmap to Digital Manufacturing                                                   | Eigenständiges Modell (Fokus: kapitalintensive (Groß-)Unternehmen)                                        |
| [143] | EDB Singapore 2017       | The Singapore Smart Industry Readiness Index                                                                                               | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                         |
| [144] | Kaltenbach et al. 2018   | Smart Services Maturity Level in Germany                                                                                                   | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung des Reifegrades deutscher Unternehmen hinsichtlich Smart Services) |
| [145] | Biegler et al. 2018      | Adoption of Factory of the Future technologies - Concept of an impact indicator system to track the path towards the Factory of the Future | Ausschluss: Spezialfall (Ermittlung eines Kennzahlensystems zur Bewertung von Industrie 4.0-Maßnahmen)    |
| [146] | Canetta et al. 2018      | Development of a Digitalization Maturity Model for the Manufacturing Sector                                                                | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                         |
| [147] | Basl 2018                | Analysis of Industry 4.0 Readiness Indexes and Maturity Models and Proposal of the Dimension for Enterprise Information Systems            | Review (Fokus: Reifegrad des Informationssystem des Unternehmens)                                         |
| [148] | Rübel et al. 2018        | A Maturity Model for Business Model Management in Industry 4.0                                                                             | Ausschluss: Spezialfall (betrachtet nur Geschäftsmodellmanagement)                                        |
| [149] | Gill, VanBoskirk 2016    | The Digital Maturity Model 4.0 - Benchmarks Digital Business Transformation Playbook                                                       | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                                         |
| [150] | Nightingale 2005         | LESAT: The Lean Enterprise Self Assessment Tool                                                                                            | Ausschluss: Jahrgang vor 2011                                                                             |

| [Nr.] | Autor, Jahr                              | Titel                                                                                                          | Inhalt/Ausschluss                                                                         |
|-------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| [151] | Häberer et al. 2017                      | Development of an Industrie 4.0 Maturity Index for Small and Medium-Sized Enterprises                          | Eigenständiges Modell (Fokus: KMU)                                                        |
| [152] | Fraunhofer ISI 2015                      | Internet-based self-assessment instrument - Readiness I 4.0                                                    | Ausschluss: kein Volltextzugriff                                                          |
| [153] | Kane et al. 2017                         | Achieving Digital Maturity - Adapting Your Company to a Changing World                                         | Ausschluss: kein Reifegradmodell                                                          |
| [154] | Menon et al. 2016                        | Towards a Maturity Modeling Approach for the Implementation of Industrial Internet                             | Ausschluss: kein Reifegradmodell                                                          |
| [155] | Katsma et al. 2011                       | Supply Chain Systems Maturing Towards the Internet-of-Things: A Framework                                      | Ausschluss: kein Reifegradmodell i.e.S., sondern ein Framework (betrachtet zudem nur SCM) |
| [156] | Westermann et al. 2016                   | Reference Architecture and Maturity Levels for Cyber-Physical Systems in the Mechanical Engineering Industry   | Ausschluss: Spezialfall (betrachtet nur Reifegrade von CPS)                               |
| [157] | Klötzer, Pflaum 2017                     | Toward the Development of a Maturity Model for Digitalization within the Manufacturing Industry's Supply Chain | Eigenständiges Modell (Fokus: Supply Chain Management)                                    |
| [158] | Jæger, Halse 2017                        | The IoT Technological Maturity Assessment Scorecard - A Case Study of Norwegian Manufacturing Companies        | Ausschluss: kein Reifegradmodell i.e.S., sondern Scorecard                                |
| [159] | Bitkom et al. 2016                       | Implementation Strategy Industrie 4.0                                                                          | Ausschluss: kein Reifegradmodell                                                          |
| [160] | Chromjakova 2016                         | Flexible man-man motivation performance management system for Industry 4.0                                     | Ausschluss: kein Reifegradmodell                                                          |
| [161] | Singh et al. 2017                        | Smart Logistics: An Enterprise Architecture Perspective                                                        | Ausschluss: kein Reifegradmodell                                                          |
| [162] | Kumar, Enose 2018                        | Making Industry 4.0 Real - Using the Acatech I 4.0 Maturity Index                                              | Ausschluss: Anwendungsfall (Anwendung von Quelle [55])                                    |
| [163] | Hofmann, Rüsch 2017                      | Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics                                   | Ausschluss: kein Reifegradmodell                                                          |
| [164] | Li et al. 2017                           | Improvement Strategies for Manufacturers Using the MESA MOM Capability Maturity Model                          | Ausschluss: kein eigenständiges Modell, sondern Review des "MESA MOM CMM" Modells         |
| [165] | Werner-Lewandowska, Kosacka-Olejnik 2018 | Logistics maturity model for service company - theoretical background                                          | Ausschluss: Spezialfall (betrachtet nur Logistikprozesse von Service-DL)                  |
| [166] | Gajšek, Sternad 2018                     | Maturity Levels For Logistics 4.0 Based On NRW's Industry 4.0 Maturity Model                                   | Ausschluss: betrachtet nur logistische Prozesse                                           |
| [167] | Demircan Keskin et al. 2019              | An Assessment Model for Organizational Adoption of Industry 4.0 Based on Multi-criteria Decision Techniques    | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                         |
| [168] | Veza et al. 2015                         | Analysis Of The Current State Of Croatian Manufacturing Industry With Regard To Industry 4.0                   | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness in Kroatien)           |

| [Nr.] | Autor, Jahr           | Titel                                                                                                                                            | Inhalt/Ausschluss                                                                  |
|-------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| [169] | BCG Global 2018       | Embracing Industry 4.0 and Redis-covering Growth                                                                                                 | Ausschluss: kein Reifegradmodell i.e.S. (stellt nur Industrie 4.0 Aspekte vor)     |
| [170] | Facchini et al. 2018  | Evaluating the I4.0 transformation readiness of agri-food companies - from factories to smart factories                                          | Ausschluss: Anwendungsfall (Ermittlung der Industrie 4.0-Readiness im Agrarsektor) |
| [171] | Schmitz 2016          | Wo stehen wir? Industrie-4.0-Reifegradindex zur Standortbestimmung der Unternehmen                                                               | Ausschluss: Kommentar zu Quelle [55]                                               |
| [172] | Rößler, Haschemi 2017 | Smart Factory Assessment (SFA) - Eine Methodik zur integralen Reifegradbewertung von Produktion und Logistik hinsichtlich Lean und Industrie 4.0 | Ausschluss: Reifegradmodell wird nicht vollständig vorgestellt                     |
| [173] | Reuter et al. 2016    | Industrie-4.0-Audit für produzierende Unternehmen                                                                                                | Eigenständiges Modell (allgemein)                                                  |
| [174] | Sarvari et al. 2018   | Technology Roadmap for Industry 4.0                                                                                                              | Ausschluss: kein Reifegradmodell                                                   |

**E Zitierte Modelle aus der Rückwärtssuche**

| [Nr.] | Autor, Jahr                     | Zitierte Modelle                                                                                                                       |
|-------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [2]   | Li, Lau 2019                    | [9], [100], [116]                                                                                                                      |
| [3]   | Mittal et al. 2018              | [9], [44], [55], [61], [77], [104], [117], [118], [119], [120], [121], [122], [123], [124], [125]                                      |
| [6]   | Colli et al. 2019               | [9], [55], [61], [77], [117], [118], [119], [126]                                                                                      |
| [8]   | Rauch et al. 2020               | [3], [17], [40], [42], [104], [127], [128], [129], [130], [131], [132], [133]                                                          |
| [9]   | Schumacher et al. 2016          | [61], [118], [119], [134]                                                                                                              |
| [11]  | Basl, Doucek 2019               | [9], [44], [55], [61], [100], [104], [118], [119], [126], [135], [136], [137], [138], [139], [140], [141], [142], [143]                |
| [17]  | Trotta, Garengo 2019            | [38], [53], [100], [134], [144], [145], [146], [147], [148]                                                                            |
| [22]  | Rajnai, Kocsis 2018             | [61], [55], [118], [149]                                                                                                               |
| [26]  | Nausch et al. 2020              | Ausschluss: betrachtete Modelle haben keinen Industrie 4.0 Bezug                                                                       |
| [31]  | Landwehr-Zloch, Eichfetter 2019 | Ausschluss: keine explizite Betrachtung bestehender Modelle                                                                            |
| [32]  | Leineweber et al. 2018          | [61], [9], [55], [124]                                                                                                                 |
| [35]  | Colli et al. 2018               | [9], [55], [61], [100]                                                                                                                 |
| [38]  | Bibby, Dehe 2018                | [9], [61], [118], [120]                                                                                                                |
| [40]  | Kolla et al. 2019               | [9], [55], [100], [124], [150], [151]                                                                                                  |
| [42]  | Brozzi et al. 2018              | [61], [118], [149], [134], [152], [153]                                                                                                |
| [44]  | Gökalp et al. 2017              | [9], [61], [100], [118], [119], [154]                                                                                                  |
| [46]  | Asdecker, Felch 2018            | [9], [44], [100], [104], [126], [136], [155], [156], [157], [158]                                                                      |
| [47]  | Modrák et al. 2020              | [9], [44], [61], [100], [104], [118], [119], [126], [136], [155], [157], [158], [159], [160], [161], [162], [163], [164], [165], [166] |
| [48]  | Wagire et al. 2020              | [9], [38], [44], [55], [61], [77], [100], [101], [118], [119], [127], [141], [167]                                                     |
| [55]  | Schuh et al. 2017               | Ausschluss: keine explizite Betrachtung bestehender Modelle                                                                            |
| [58]  | Issa et al. 2018                | Ausschluss: keine explizite Betrachtung bestehender Modelle                                                                            |
| [61]  | Lichtblau et al. 2015           | Ausschluss: keine explizite Betrachtung bestehender Modelle                                                                            |
| [67]  | Trstenjak et al. 2019           | [9], [61], [104], [118], [119], [122], [168], [169]                                                                                    |
| [73]  | Unterhofer et al. 2018          | [9], [44], [124]                                                                                                                       |
| [77]  | Akdil et al. 2018               | [9], [61], [118], [119]                                                                                                                |
| [79]  | Lucato et al. 2019              | [9], [104], [116], [126], [170]                                                                                                        |
| [88]  | Botha 2018                      | [9], [61], [118], [119]                                                                                                                |
| [95]  | Schumacher et al. 2019          | [22], [55], [58], [123], [124], [126], [138], [171], [172], [173]                                                                      |
| [100] | Leyh et al. 2016b               | Ausschluss: keine Nennung der betrachteten Literatur                                                                                   |
| [101] | Pacchini et al. 2019            | [3], [9], [11], [32], [38], [55], [61], [100], [104], [174]                                                                            |
| [104] | Ganzarain, Errasti 2016         | Ausschluss: keine explizite Betrachtung bestehender Modelle                                                                            |

**F Ermittlung der Zitierhäufigkeit (H) im Rahmen der Rückwärtssuche**

| Lfd. Nr. | [Nr.] | H  |
|----------|-------|----|
| 1        | [9]   | 18 |
| 2        | [61]  | 16 |
| 3        | [118] | 13 |
| 4        | [55]  | 10 |
| 5        | [100] | 10 |
| 6        | [119] | 10 |
| 7        | [104] | 8  |
| 8        | [44]  | 6  |
| 9        | [126] | 6  |
| 10       | [124] | 5  |
| 11       | [38]  | 3  |
| 12       | [77]  | 3  |
| 13       | [134] | 3  |
| 14       | [136] | 3  |
| 15       | [3]   | 2  |
| 16       | [116] | 2  |
| 17       | [117] | 2  |
| 18       | [120] | 2  |
| 19       | [122] | 2  |
| 20       | [123] | 2  |
| 21       | [127] | 2  |
| 22       | [138] | 2  |
| 23       | [141] | 2  |
| 24       | [149] | 2  |
| 25       | [155] | 2  |
| 26       | [157] | 2  |

| Lfd. Nr. | [Nr.] | H |
|----------|-------|---|
| 27       | [158] | 2 |
| 28       | [11]  | 1 |
| 29       | [17]  | 1 |
| 30       | [22]  | 1 |
| 31       | [32]  | 1 |
| 32       | [40]  | 1 |
| 33       | [42]  | 1 |
| 34       | [53]  | 1 |
| 35       | [58]  | 1 |
| 36       | [101] | 1 |
| 37       | [121] | 1 |
| 38       | [125] | 1 |
| 39       | [128] | 1 |
| 40       | [129] | 1 |
| 41       | [130] | 1 |
| 42       | [131] | 1 |
| 43       | [132] | 1 |
| 44       | [133] | 1 |
| 45       | [135] | 1 |
| 46       | [137] | 1 |
| 47       | [139] | 1 |
| 48       | [140] | 1 |
| 49       | [142] | 1 |
| 50       | [143] | 1 |
| 51       | [144] | 1 |
| 52       | [145] | 1 |

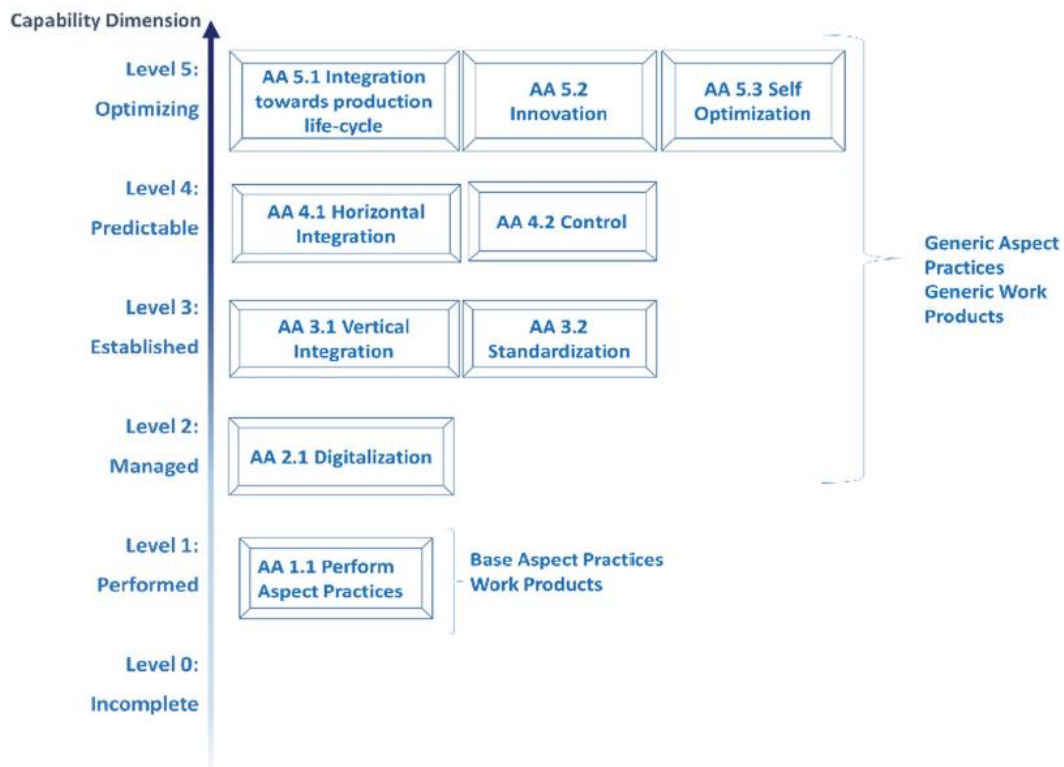
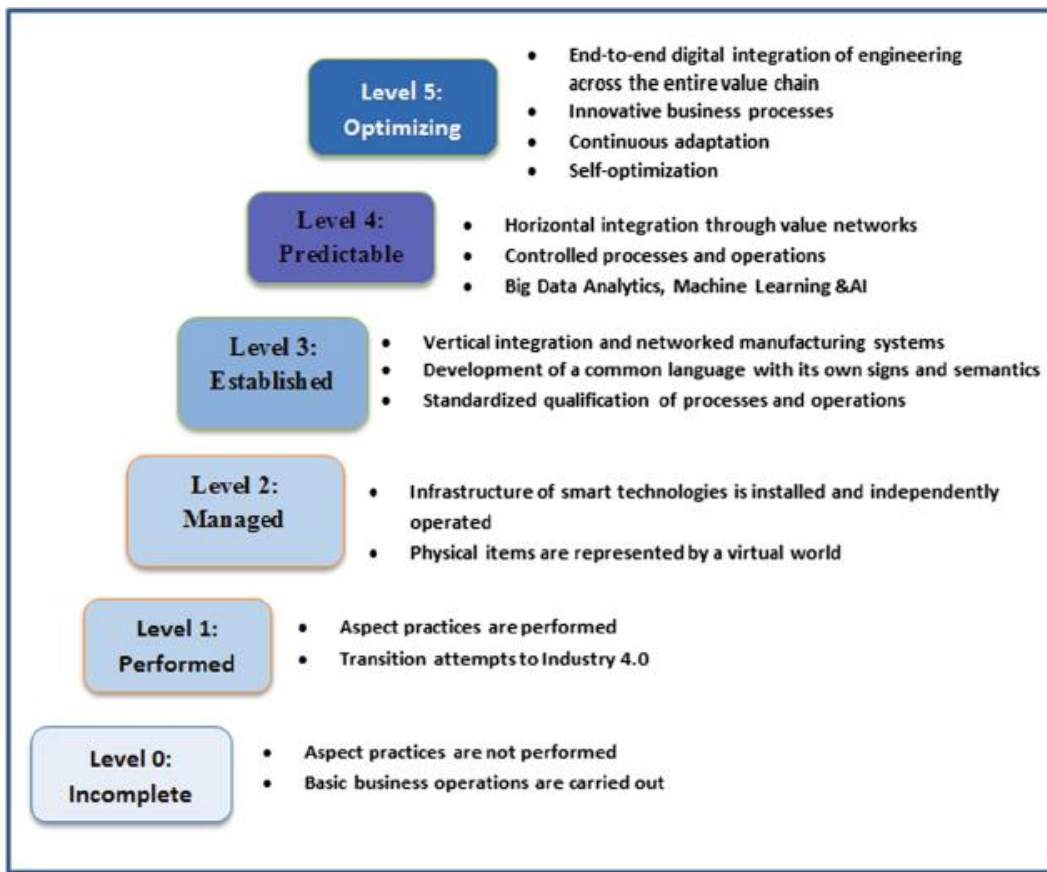
| Lfd. Nr. | [Nr.] | H |
|----------|-------|---|
| 53       | [146] | 1 |
| 54       | [147] | 1 |
| 55       | [148] | 1 |
| 56       | [150] | 1 |
| 57       | [151] | 1 |
| 58       | [152] | 1 |
| 59       | [153] | 1 |
| 60       | [154] | 1 |
| 61       | [156] | 1 |
| 62       | [159] | 1 |
| 63       | [160] | 1 |
| 64       | [161] | 1 |
| 65       | [162] | 1 |
| 66       | [163] | 1 |
| 67       | [164] | 1 |
| 68       | [165] | 1 |
| 69       | [166] | 1 |
| 70       | [167] | 1 |
| 71       | [168] | 1 |
| 72       | [169] | 1 |
| 73       | [170] | 1 |
| 74       | [171] | 1 |
| 75       | [172] | 1 |
| 76       | [173] | 1 |
| 77       | [174] | 1 |

## G Ergänzungen zu den beschriebenen Reifegradmodellen

G 1 Ergänzungen zu Quelle [31]: Landwehr-Zloch, Eichfelder (2019, S. 75)

| <b><u>Checkliste „Readiness-Industrie 4.0“</u></b>             |                                 |                               |                                |                                |               |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------|
| <b><u>Anforderungen erfüllt?</u></b>                           | <b>Trifft<br/>völlig<br/>zu</b> | <b>Trifft<br/>eher<br/>zu</b> | <b>Trifft<br/>wenig<br/>zu</b> | <b>Trifft<br/>nicht<br/>zu</b> | <b>Notiz</b>  |
| <b>Kommunikationsnetzwerke</b>                                 |                                 |                               |                                |                                |               |
| Hochverfügbares Internet fürs Unternehmen ist vorhanden.       | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| Netzwerke im Unternehmen (LAN/WLAN) bestehen.                  | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| Datengeschwindigkeit (Mbit/s) ist ausreichend.                 | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| Einsatz von z. B. Smartphones, Tablet-PCs ist möglich.         | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| <b>Maschinen, Anlagen, FTS und Produkte</b>                    |                                 |                               |                                |                                |               |
| Internetfähigkeit ist gegeben.                                 | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| Sensorik zur Datenaufnahme ist vorhanden.                      | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| Kommunikationsschnittstellen sind vorhanden.                   | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| Einheitlicher Kommunikationsstandard ist vorhanden.            | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| <b>Mensch-Maschine-Interaktion/Mitarbeiter</b>                 |                                 |                               |                                |                                |               |
| 3D-Brillen, Smartphones, Tablet-PCs sind im Einsatz.           | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| Mitarbeiter sind ausreichend geschult in der Nutzung.          | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| Bedarfsgerechte arbeitsplatznahe Informationen sind verfügbar. | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| <b>Erhebung, Verarbeitung und Schutz von Daten</b>             |                                 |                               |                                |                                |               |
| Cloud-Plattform ist eingerichtet.                              | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| Maschinen, Anlagen, etc. sind mit Cloud verbunden.             | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| Daten werden verdichtet, analysiert und bewertet.              | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| Datenschutz ist sichergestellt.                                | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| <b>IT-Security</b>                                             |                                 |                               |                                |                                |               |
| Verantwortliche Person ist benannt.                            | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| Netzwerkzugänge durch „Fremde“ sind gesichert.                 | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| Mitarbeiter sind sensibilisiert und geschult.                  | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| <b>Management</b>                                              |                                 |                               |                                |                                |               |
| Notwendige Ressourcen sind bereitgestellt.                     | <input type="checkbox"/>        | <input type="checkbox"/>      | <input type="checkbox"/>       | <input type="checkbox"/>       |               |
| <b>Berechnung Gesamtpunktzahl =</b>                            | <b>3x__+</b>                    | <b>2x__+</b>                  | <b>1x__+</b>                   | <b>0x__</b>                    | <b>= ____</b> |

G 2 Ergänzungen zu Quelle [44]: Gökalp et al. (2017, S. 139)



## G 3 Ergänzungen zu Quelle [61]: Lichtblau et al. (2015, S. 30 ff.)

| Dimension                | RG | Ausprägungen                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Strategie & Organisation | 0  | Keine Anforderungen werden erfüllt (gilt für jede Dimension)                                                                                                                                                                                                                    |
|                          | 1  | Pilotinitiativen in den Fachabteilungen; Erste Investitionen im Kontext von Industrie 4.0                                                                                                                                                                                       |
|                          | 2  | Erarbeitung einer Industrie 4.0-Strategie und Definition von Kennzahlen zur Messung Investitionen im Kontext von Industrie 4.0 in geringem Umfang                                                                                                                               |
|                          | 3  | Formulierte Industrie 4.0-Strategie liegt vor; Industrie 4.0 Investitionen in wenigen Bereichen<br>Vereinzelte Bereiche haben ein Innovationsmanagement                                                                                                                         |
|                          | 4  | Eine Strategie befindet sich in Umsetzung und wird sporadisch überprüft<br>Investitionen im Kontext von Industrie 4.0 in mehreren Bereichen<br>Ein Innovationmanagement ist in mehreren Fachabteilungen installiert                                                             |
|                          | 5  | Eine Strategie wurde umgesetzt und wird regelmäßig überprüft<br>Unternehmensweite Investitionen im Kontext von Industrie 4.0<br>Einheitliches, die Bereiche integrierendes Management aufgebaut                                                                                 |
| Smart Factory            | 1  | Derzeitiger Maschinenpark erfüllt teilweise die zukünftigen Anforderungen<br>Hauptgeschäftsprozess durch IT-Systeme unterstützt                                                                                                                                                 |
|                          | 2  | Die zukünftigen Funktionalitäten werden (teilweise) erfüllt bzw. sind teilweise nachrüstbar<br>Daten werden aufgenommen (größtenteils jedoch manuell) und für einzelne Maßnahmen genutzt<br>Einzelne Unternehmensbereiche werden durch IT-Systeme unterstützt und sind vernetzt |
|                          | 3  | Die zukünftigen Funktionalitäten werden (teilweise) erfüllt bzw. sind vollständig nachrüstbar<br>In einzelnen Bereichen werden die relevanten Daten digital erfasst und genutzt<br>IT-Systeme unterstützen Prozesse und sind über Schnittstellen angebunden                     |
|                          | 4  | Aktueller Maschinenpark erfüllt die Anforderungen bzw. nachrüstbar<br>Daten werden weitreichend aufgenommen und teilweise genutzt<br>Umfangreiche Unterstützung der Prozesse über IT (systemintegriert)                                                                         |
|                          | 5  | Maschinenpark erfüllt bereits die zukünftigen Funktionalitäten<br>Daten werden vollständig automatisch aufgenommen und genutzt<br>Vollumfängliche Systemunterstützung der Prozesse über IT                                                                                      |
| Smart Operations         | 1  | Ansätze von betriebsinternem, systemintegriertem Informationsaustausch<br>Erste IT-Sicherheitslösungen sind geplant                                                                                                                                                             |
|                          | 2  | Betriebsinterner Informationsaustausch teilweise systemintegriert<br>Mehrere IT-Sicherheitslösungen sind geplant oder erste Lösungen in Arbeit                                                                                                                                  |
|                          | 3  | Teilweise systemintegrierter Informationsaustausch<br>IT-Sicherheitslösungen sind teilweise implementiert<br>Erste Lösungen für Bereiche Software aus der Cloud, Datenspeicherung und -auswertung                                                                               |
|                          | 4  | Weitreichender systemintegrierter Informationsaustausch<br>Erprobung von autonomer Steuerung und reagierenden Prozessen<br>Weitreichende IT-Sicherheits- und Cloud-Lösungen im Einsatz                                                                                          |
|                          | 5  | Vollständiger systemintegrierter Informationsaustausch<br>Autonome Steuerung und reagierende Prozesse umgesetzt<br>Umfangreiche IT-Sicherheits- und Cloud-Lösungen implementiert                                                                                                |
| Smart Products           | 1  | Die Produkte besitzen erste Ansätze von Zusatzfunktionen                                                                                                                                                                                                                        |
|                          | 2  | Die Produkte besitzen erste Zusatzfunktionen<br>Aufnahme von Daten, aber keine Analyse/Nutzung der Daten                                                                                                                                                                        |
|                          | 3  | Die Produkte besitzen mehrere zusammenhängende Zusatzfunktionen<br>Die aufgenommenen Daten werden anteilig für die Auswertung genutzt                                                                                                                                           |
|                          | 4  | Die Produkte besitzen Zusatzfunktionen aus verschiedenen Bereichen<br>Die aufgenommenen Daten werden gezielt für bestimmte Funktionen genutzt                                                                                                                                   |
|                          | 5  | Die Produkte besitzen umfangreiche Zusatzfunktionen<br>Die aufgenommenen Daten werden umfangreich für verschiedene Funktionen genutzt                                                                                                                                           |
| Data-driven Services     | 1  | Datenbasierte Dienstleistungen, jedoch ohne Vernetzung mit dem Kunden<br>Generierung von ersten Umsätzen über die Dienstleistung (<1%)                                                                                                                                          |
|                          | 2  | Datenbasierte Dienstleistungen, jedoch ohne Vernetzung mit dem Kunden<br>Geringe Umsätze über die Dienstleistung (<2,5%); Nutzung der aufgenommenen Daten zu <20%                                                                                                               |
|                          | 3  | Datenbasierte Dienstleistungen, jedoch ohne Vernetzung mit dem Kunden<br>Geringe Umsätze über die Dienstleistung (<7,5%); Nutzung der aufgenommenen Daten zu 20%-50%                                                                                                            |
|                          | 4  | Datenbasierte Dienstleistungen über Vernetzung mit den Kunden<br>Umsätze über die Dienstleistung (<10%); Nutzung der aufgenommenen Daten zu 20%-50%                                                                                                                             |
|                          | 5  | Datenbasierte Dienstleistungen über Vernetzung mit den Kunden<br>Umsätze über die Dienstleistung (>10%); Hohe Nutzung der aufgenommenen Daten zu >50%                                                                                                                           |

## G 4 Ergänzungen zu Quelle [100]: Leyh et al. (2016b, S. 990)

| Dimension<br><b>Vertikale<br/>Integration</b>                                                                                                                                    | Dimension<br><b>Horizontale<br/>Integration</b>                                                 | Dimension<br><b>Digitale Produkt-<br/>entstehung</b>                                                                            | Dimension<br><b>Querschnitts-<br/>technologien</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Reifegrad 5 – Optimierte vollständige Digitalisierung</b>                                                                                                                     |                                                                                                 |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Das Unternehmen ist ein Aushängeschild für Industrie 4.0.<br>Es tauscht sich mit Kollaborationspartnern aus und optimiert die Wertschöpfungsnetzwerke.                           |                                                                                                 |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Durchgängige unternehmensübergreifende Integration, die ständig optimiert wird.                                                                                                  | Durchgängige unternehmensübergreifende Integration und Kollaboration im Wertschöpfungsnetzwerk. | Produktentstehung findet durchgängig digital innerhalb und außerhalb des Unternehmens statt (digitalisierte End-to-End Lösung). | Simulation und Optimierung der Wert- und Informationsflüsse innerhalb der Wertschöpfungsflüsse in Echtzeit. IT-Sicherheit passt sich neuen Risiken zeitnah an und Sicherheitslücken werden umgehend geschlossen. Verschlüsselung entlang der Wertschöpfungsnetzwerke wird optimiert.                                                                                                                          |
| <b>Reifegrad 4 – Vollständige Digitalisierung</b>                                                                                                                                |                                                                                                 |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Das Unternehmen ist vollständig über Unternehmensgrenzen hinweg digitalisiert.<br>Industrie 4.0 wird aktiv im Unternehmen gelebt und ist in der Unternehmensstrategie verankert. |                                                                                                 |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Durchgängige unternehmensübergreifende Integration.                                                                                                                              | Durchgängige unternehmensübergreifende Integration im Wertschöpfungsnetzwerk.                   | Informationen aus der Produktentstehung werden digital weitergeleitet.                                                          | Service-orientierte cloud-basierte Plattform. Services werden im Werkschöpfungsnetzwerk angeboten. Informationsflüsse werden entlang der SC in Echtzeit austauscht. Optimierung der gesamten Produktion durch Big Data Lösungen. Zugriff auf Daten ist geschützt. Unternehmensübergreifende Verschlüsselung der Daten und Authentifizierung für den globalen Zugriff.                                         |
| <b>Reifegrad 3 – Horizontale und vertikale Digitalisierung</b>                                                                                                                   |                                                                                                 |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Das Unternehmen ist horizontal und vertikal digitalisiert.<br>Industrie 4.0 Anforderungen sind innerhalb des Unternehmens umgesetzt.                                             |                                                                                                 |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Vollständige innerbetriebliche Integration der Anwendungssysteme und Maschinen.                                                                                                  | Vollständige innerbetriebliche Integration der Anwendungssysteme und Maschinen.                 | Produktentstehung wird durchgängig digital unterstützt.                                                                         | SOA hat sich etabliert. Alle Funktionalitäten sind als Services abgebildet. (Halb-)Produkte und deren Funktionalitäten sind als Services vorhanden. Austausch der Informationen im Unternehmen erfolgt mit Cloud-Prinzipien. Produktion wird in Echtzeit angepasst und optimiert. IT-Sicherheit wurde durch den Einsatz der Modelle erhöht. Daten werden innerhalb des Unternehmens verschlüsselt übertragen. |
| <b>Reifegrad 2 – Bereichsübergreifende Digitalisierung</b>                                                                                                                       |                                                                                                 |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Das Unternehmen beschäftigt sich aktiv mit Industrie 4.0.<br>Digitalisierung wird bereichsübergreifend vorgenommen und erste Anforderungen werden umgesetzt.                     |                                                                                                 |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Bereichsübergreifende Integration                                                                                                                                                | Bereichsübergreifende Integration                                                               | Produktentstehung wird einzeln digital unterstützt.<br>Informationen werden nicht ausgetauscht.                                 | Einführung einer SOA mit ESB. / Erste Prozesse mit Services werden bereitgestellt. / Erste Erfahrung mit Big Data und angewandt. / Entwicklung erster IT-Sicherheitsmodellen                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Reifegrad 1 – Bereichsübergreifende Digitalisierung</b>                                                                                                                       |                                                                                                 |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Das Unternehmen beschäftigt sich (noch) nicht mit Industrie 4.0.<br>Anforderungen werden nur teilweise erfüllt.                                                                  |                                                                                                 |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Bereichsintegration der Anwendungssysteme                                                                                                                                        | Bereichsintegration der Anwendungssysteme                                                       | Produktentstehung ist nicht digital unterstützt.                                                                                | Keine service-orientierten und cloud-basierten Ansätze. / Daten werden nicht zur Produktverbesserung eingesetzt. / Vertraulichkeit, Verfügbarkeit und Integrität der Daten ist nicht gewährleistet.                                                                                                                                                                                                           |

## G 5 Ergänzungen zu Quelle [118]: Geissbauer et al. (2016, S. 28)

|                                                                             | 1 <i>Digital novice</i>                                                                                                                                                      | 2 <i>Vertical integrator</i>                                                                                                                           | 3 <i>Horizontal collaborator</i>                                                                                                                                          | 4 <i>Digital champion</i>                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Digital business models and customer access</i>                          | First digital solutions and isolated applications                                                                                                                            | Digital product and service portfolio with software, network (M2M) and data as key differentiator                                                      | Integrated customer solutions across supply chain boundaries, collaboration with external partners                                                                        | Development of new disruptive business models with innovative product and service portfolio, lot size 1                                                                                                    |
| <i>Digitisation of product and service offerings</i>                        | Online presence is separated from offline channels, product focus instead of customer focus                                                                                  | Multi-channel distribution with integrated use of online and offline channels; data analytics deployed, e. g. for personalisation                      | Individualised customer approach and interaction together with value-chain partners. Shared, integrated interfaces.                                                       | Integrated Customer Journey Management across all digital marketing and sales channels with customer empathy and CRM                                                                                       |
| <i>Digitisation and integration of vertical and horizontal value chains</i> | Digitised and automated sub processes. Partial integration including production or with internal and external partners. Standard processes for collaboration partly in place | Vertical digitisation and standardised and harmonised internal processes and data flows within the company; limited integration with external partners | Horizontal integration of processes and data flows with customers and external partners, intensive data use through full integration across the network.                  | Fully digitised, integrated partner ecosystem with self-optimised, virtualised processes, focus on core competency; decentralised autonomy. Near real-time access to extended set of operative information |
| <i>Data &amp; Analytics as core capability</i>                              | Analytical capabilities mainly based on semi-manual data extracts; Selected monitoring and data processing, no event management                                              | Analytical capabilities supported by central business intelligence (BI) system. Isolated, not standardised decision support systems                    | Central BI system consolidating all relevant internal and external information sources, some predictive analytics. Specific decision support and event management systems | Central use of predictive analytics for real-time optimisation and automated event handling with intelligent database and self-learning algorithm enabling impact analysis and decision support            |
| <i>Agile IT architecture</i>                                                | Fragmented IT architecture in-house.                                                                                                                                         | Homogeneous IT architecture in-house. Connection between different data cubes developing.                                                              | Common IT architectures in partner network. Interconnected single data lake with high-performance architecture                                                            | Single data lake with external data integration functionalities and flexible organisation. Partner service bus, secure data exchange                                                                       |
| <i>Compliance, security, legal &amp; tax</i>                                | Traditional structures, digitisation not in focus                                                                                                                            | Digital challenges recognised but not comprehensively addressed                                                                                        | Legal risk consistently addressed with collaboration partners,                                                                                                            | Optimising the value-chain network for compliance, security, legal and tax                                                                                                                                 |
| <i>Organisation, employees and digital culture</i>                          | Functional focus in "silos"                                                                                                                                                  | Cross-functional collaboration but not structured and consistently performed                                                                           | Collaboration across company boundaries, culture and encouragement of sharing                                                                                             | Collaboration as a key value driver                                                                                                                                                                        |

G 6 Ergänzungen zu Quelle [124]: Anderl (2015, S. 12, 14)

| Produkte                                                       |                                            |                                              |                                                                |                                                               |                                                                  |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Integration von Sensoren / Aktoren                             |                                            |                                              |                                                                |                                                               |                                                                  |
|                                                                | Keine Nutzung von Sensoren/Aktoren         | Sensoren/Aktoren sind eingebunden            | Sensordaten werden vom Produkt verarbeitet                     | Daten werden vom Produkt für Analysen ausgewertet             | Das Produkt reagiert auf Basis der gewonnenen Daten eigenständig |
| Kommunikation / Connectivity                                   |                                            |                                              |                                                                |                                                               |                                                                  |
|                                                                | Keine Schnittstellen am Produkt            | Das Produkt sendet bzw. empfängt I/O-Signale | Das Produkt verfügt über Feldbus-Schnittstellen                | Das Produkt verfügt über Industrial Ethernet-Schnittstellen   | Das Produkt verfügt über Zugang zum Internet                     |
| Funktionalitäten zu Datenspeicherung und Informationsaustausch |                                            |                                              |                                                                |                                                               |                                                                  |
|                                                                | Keine Funktionalitäten                     | Möglichkeit zur eindeutigen Identifikation   | Produkt verfügt über passiven Datenspeicher                    | Produkt mit Datenspeicher zum autonomen Informationsaustausch | Daten- und Informationsaustausch als integraler Bestandteil      |
| Monitoring                                                     |                                            |                                              |                                                                |                                                               |                                                                  |
|                                                                | Kein Monitoring durch das Produkt          | Detektion von Ausfällen                      | Erfassung des Betriebszustands zur Diagnose                    | Prognose der eigenen Funktionsfähigkeit                       | Selbstständige Maßnahmen zur Steuerung                           |
| Produkt-bezogene IT-Services                                   |                                            |                                              |                                                                |                                                               |                                                                  |
|                                                                | Keine Services                             | Services über Online-Portale                 | Service-Ausführung direkt über Produkt                         | Selbstständige Ausführung von Services                        | Vollständige Eingliederung in IT-Service-Infrastruktur           |
| Geschäftsmodelle um das Produkt                                |                                            |                                              |                                                                |                                                               |                                                                  |
|                                                                | Gewinne durch Verkauf der Standardprodukte | Verkauf und Beratung zum Produkt             | Verkauf, Beratung und Anpassung des Produktes an Kundenwünsche | Zusätzlicher Verkauf produktbezogener Dienstleistungen        | Verkauf von Produktfunktionen                                    |

| Produktion                                                    |                                                                                      |                                                                       |                                                                               |                                                                                   |                                                                               |
|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Daten-<br>verarbeitung<br>in der<br>Produktion                |    |                                                                       |                                                                               |                                                                                   |                                                                               |
|                                                               | Keine Verarbeitung<br>von Daten                                                      | Speicherung von<br>Daten zur<br>Dokumentation                         | Auswertung von<br>Daten zur Prozess-<br>überwachung                           | Auswertung zur<br>Prozessplanung<br>/-steuerung                                   | Automatische<br>Prozessplanung<br>/-steuerung                                 |
| Maschine-<br>zu-<br>Maschine-<br>Kommunikation (M2M)          |    |                                                                       |                                                                               |                                                                                   |                                                                               |
|                                                               | Keine<br>Kommunikation                                                               | Feldbus-<br>Schnittstellen                                            | Industrial Ethernet-<br>Schnittstellen                                        | Maschinen verfügen<br>über Zugang zum<br>Internet                                 | Webdienste (M2M-<br>Software)                                                 |
| Unterneh-<br>mensweite<br>Vernetzung<br>mit der<br>Produktion |    |                                                                       |                                                                               |                                                                                   |                                                                               |
|                                                               | Keine Vernetzung<br>der Produktion mit<br>anderen Unterneh-<br>mensbereichen         | Informations-<br>austausch über Mail /<br>Telekommunikation           | Einheitliche<br>Datenformate und<br>Regeln zum<br>Datenaustausch              | Einh. Dateiformate<br>und Abteilungs-<br>übergreifend ver-<br>netzte Datenserver  | Abteilungsübergreif-<br>ende, vollständig<br>vernetzte IT-<br>Lösungen        |
| IKT-<br>Infrastruktur<br>in der<br>Produktion                 |  |                                                                       |                                                                               |                                                                                   |                                                                               |
|                                                               | Informations-<br>austausch über Mail/<br>Telekommunikation                           | Zentrale<br>Datenserver in der<br>Produktion                          | Internetbasierte<br>Portale mit<br>gemeinsamer<br>Datennutzung                | Automatisierter<br>Informations-<br>austausch (z.B. Auf-<br>tragsnachverfolgung)  | Zulieferer / Kunden<br>sind vollständig in<br>Prozessgestaltung<br>integriert |
| Mensch-<br>Maschine-<br>Schnitt-<br>stellen                   |  |                                                                       |                                                                               |                                                                                   |                                                                               |
|                                                               | Kein Informations-<br>austausch zwischen<br>Mensch und<br>Maschine                   | Einsatz lokaler<br>Anzeigegegeräte                                    | Zentrale / dezentrale<br>Produktionsüber-<br>wachung/-steuerung               | Einsatz mobiler<br>Anzeigegegeräte                                                | Erweiterte und<br>assistierte Realität                                        |
| Effizienz bei<br>kleinen<br>Losgrößen                         |  |                                                                       |                                                                               |                                                                                   |                                                                               |
|                                                               | Starre Produktions-<br>mittel und geringer<br>Anteil von<br>Gleichtteilen            | Nutzung von<br>flexiblen Produkti-<br>onsmitteln und<br>Gleichtteilen | Flexible Produkti-<br>onsmittel und<br>modulare Baukästen<br>für die Produkte | Bauteilgetriebene,<br>flexible Produktion<br>modularer Produkte<br>im Unternehmen | Bauteilgetriebene,<br>modulare Produktion<br>in Wertschöpfungs-<br>netzen     |

## H Analyse der identifizierten Reifegradmodelle

### H 1 Dimensionen (inklusive Kennung) und Indikatoren

| Nr.                   | D-Nr. | Dimensionen                    | Indikatoren                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------|-------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [8] Rauch et al. 2020 | [8.1] | Operations                     | Agile Manufacturing Systems<br>Self-Adapting Manufacturing Systems<br>Continuous and Uninterrupted Material Flow Models<br>Plug and Produce<br>Integrated and Digital Real-Time Monitoring Systems<br>Decision Support System<br>Remote Monitoring of Products<br>Big Data Analysis<br>ERP/MES                  |
|                       | [8.2] | Organization                   | Digital Product-Service Systems<br>Servitization and Sharing Economy<br>Digital Add-on or Upgrade<br>Digital Lock-In<br>Freemium<br>Digital Point of Sales<br>Open Innovation<br>Industry 4.0 Roadmap<br>Sustainable Supply Chain Design<br>Collaboration Network Models                                        |
|                       | [8.3] | Socio-Cultural                 | Training 4.0<br>Role of the Operator<br>Cultural Transformation                                                                                                                                                                                                                                                 |
|                       | [8.4] | Technology<br>(data-driven)    | Cloud Computing<br>Communication & Connectivity<br>Digital and Connected Workstations<br>E-Kanban<br>IoT and Cyber-Physical Systems<br>Cyber Security<br>Artificial Intelligence<br>Identification and Tracking Technology<br>Additive Manufacturing (3D Printing)<br>Predictive Maintenance<br>Telemaintenance |
|                       | [8.5] | Technology<br>(process-driven) | Object Self Service<br>Automated Storage Systems<br>Automated Transport Systems<br>Automated Manufacturing/Assembly<br>Collaborative Robotics<br>Smart Assistance Systems<br>Product Data- and Lifecycle Management (PDM/PLM)<br>Cyber-Physical System Standards<br>Virtual and Augmented Reality<br>Simulation |

|                                      |        |                                             |                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------|--------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [9] Schumacher et al. 2016           | [9.1]  | Strategy                                    | Implementation I40 roadmap<br>Available resources for realization<br>Adaption of business models                                                                  |
|                                      | [9.2]  | Leadership                                  | Willingness of leaders<br>Management competences and methods<br>Existence of central coordination for I40                                                         |
|                                      | [9.3]  | Customers                                   | Utilization of customer data<br>Digitalization of sales/services<br>Customer's Digital media competence,                                                          |
|                                      | [9.4]  | Products                                    | Individualization of products<br>Digitalization of products<br>Product integration into other systems                                                             |
|                                      | [9.5]  | Operations                                  | Decentralization of processes<br>Modelling and simulation<br>Interdisciplinary, interdepartmental collaboration                                                   |
|                                      | [9.6]  | Culture                                     | Knowledge sharing<br>Open-innovation and cross company collaboration<br>Value of ICT in company                                                                   |
|                                      | [9.7]  | People                                      | ICT competences of employees<br>openness of employees to new technology<br>autonomy of employees                                                                  |
|                                      | [9.8]  | Governance                                  | Labour regulations for I40<br>Suitability of technological standards<br>Protection of intellectual property                                                       |
|                                      | [9.9]  | Technology                                  | Existence of modern ICT<br>Utilization of mobile devices<br>Utilization of machine-to-machine communication                                                       |
| [17] Trotta, Garengo 2019            | [17.1] | Strategy                                    | S1: Do you have a strategy for implementing Industry 4.0?<br>S2: Do you have a digital technical officer?                                                         |
|                                      | [17.2] | Technology                                  | T1: Did you implement big data?<br>T2: Did you implement cloud manufacturing?                                                                                     |
|                                      | [17.3] | Production                                  | Pr1: Do your machines exchange data automatically?<br>Pr2: Are you able to produce in small batches?                                                              |
|                                      | [17.4] | Products                                    | Pd1: Do your product have integrated sensors?<br>Pd2: Are your products able of collecting data about their usage?                                                |
|                                      | [17.5] | People                                      | Pe1: Do you regularly train your employees?<br>Pe2: Do your employees welcome new technologies?<br>Pe3: Do you have a recruiter dedicated to Industry 4.0 needs?  |
| [31] Landwehr-Zloch, Eichfelder 2019 | [31.1] | Kommunikationsnetzwerke                     | Hochverfügbares Internet im gesamten UN<br>Netzwerke (LAN/WLAN) eingerichtet<br>Ausreichende Datengeschwindigkeit<br>Einsatz von Smartphones, Tablets,... möglich |
|                                      | [31.2] | Maschinen, Anlagen, Produkte                | Sind internetfähig<br>Sensorik zur Datenaufnahme<br>Kommunikationsschnittstellen<br>Einheitlicher Kommunikationsstandard                                          |
|                                      | [31.3] | Mensch-Maschine-Interaktion                 | 3D-Brillen, Smartphones, Tablets<br>Schulung der MA<br>Bedarfsgerechte, arbeitsplatznahe Informationen                                                            |
|                                      | [31.4] | Erhebung, Verarbeitung und Schutz von Daten | Cloud Plattform eingerichtet<br>Maschinen/Anlagen mit Cloud verbunden<br>Daten verdichtet, analysiert, bewertet<br>Datenschutz                                    |
|                                      | [31.5] | IT-Sicherheit                               | Verantwortliche Person bekannt<br>Netzwerkzugänge vor Fremden gesichert<br>MA sensibilisiert                                                                      |
|                                      | [31.6] | Management                                  | Bereitstellung notwendiger Ressourcen                                                                                                                             |

|                             |        |                          |                                           |                                                                                                                                                    |
|-----------------------------|--------|--------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [32] Leineweber et al. 2018 | [32.1] | Technology               |                                           | Machine Data Acquisition<br>Maintenance<br>Evaluation of Data and Mass Data                                                                        |
|                             | [32.2] | Organization             |                                           | IT-Security / Industrial Security<br>Deployment of Personnel<br>Personnel Capacity Data                                                            |
|                             | [32.3] | Personnel                |                                           | Expertise<br>Methodical Expertise<br>Personnel Development and Qualification                                                                       |
| [38] Bibby, Dehe 2018       | [38.1] | Factory of Future        |                                           | 3D Printing<br>Cloud<br>MES<br>IoT, CPS<br>Big Data<br>Sensors<br>E-Value-Chain<br>Autonomous Robots                                               |
|                             | [38.2] | People and Culture       |                                           | Innovation Openness<br>Continuous Improvement capabilities                                                                                         |
|                             | [38.3] | Strategy                 |                                           | Technological Investment<br>Agility Vision<br>Manufacturing Strategy                                                                               |
| [44] Gökalp et al. 2017     | [44.1] | Asset Management         |                                           |                                                                                                                                                    |
|                             | [44.2] | Data Governance          |                                           |                                                                                                                                                    |
|                             | [44.3] | Application Management   |                                           |                                                                                                                                                    |
|                             | [44.4] | Organizational Alignment |                                           |                                                                                                                                                    |
|                             | [44.5] | Process Transformation   |                                           |                                                                                                                                                    |
| [55] Schuh et al. 2017      | [55.1] | Ressourcen               | Strukturierte Kommunikation               | Effizient kommunizieren<br>Schnittstellen aufgabengerecht gestalten                                                                                |
|                             |        |                          | Digitale Befähigung                       | Digitale Kompetenzen vorhalten<br>Rückmeldedaten automatisiert erzeugen<br>Daten dezentral (vor-)verarbeiten                                       |
|                             | [55.2] | Informationssysteme      | Integration                               | Horizontale und vertikale Integration<br>Data Governance<br>Standardisierte Datenschnittstelle<br>IT-Sicherheit                                    |
|                             |        |                          | Informationsverarbeitung                  | Automatische Datenanalyse<br>Kontextbasierte Informationsverarbeitung<br>Anwendungsgerechte Benutzerschnittstelle<br>Resiliente IT-Infrastruktur   |
|                             | [55.3] | Organisationsstruktur    | Interne Organisation                      | Flexible Communities<br>Management von Entscheidungsrechten<br>Motivierende Zielsysteme                                                            |
|                             |        |                          | Kollaboration in Wertschöpfungsnetzwerken | Agiles Management<br>Ausrichtung am Kundennutzen<br>Kooperation im Netzwerk                                                                        |
|                             | [55.4] | Kultur                   | Bereitschaft für Veränderung              | Fehler als Schätze<br>Offenheit für Innovation<br>Datenbasiertes Lernen und Entscheiden<br>Fortlaufende Qualifikation<br>Gestalten von Veränderung |
|                             |        |                          | Soziale Kollaboration                     | Demokratischer Führungsstil<br>Offene Kommunikation<br>Vertrauen in Prozesse und Informationssysteme                                               |

|                              |         |                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------|---------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [61] Lichtblau et al. 2015   | [61.1]  | Strategie und Organisation                                           | Strategie<br>Investition<br>Innovationsmanagement                                                                                                                                                                                             |
|                              | [61.2]  | Smart Factory                                                        | Digitales Abbild<br>Maschinenpark<br>Datennutzung<br>IT-Systeme                                                                                                                                                                               |
|                              | [61.3]  | Smart Operations                                                     | Cloud<br>IT-Sicherheit<br>Autonome Prozesse<br>Informationsaustausch                                                                                                                                                                          |
|                              | [61.4]  | Smart Products                                                       | Datenanalyse Nutzungsphase<br>IKT-Zusatzfunktionalitäten                                                                                                                                                                                      |
|                              | [61.5]  | Data-driven Services                                                 | Anteil Datennutzung<br>Umsatzanteil<br>Datenbasierte Dienstleistungen                                                                                                                                                                         |
|                              | [61.6]  | Mitarbeiter                                                          | Aufbau der Kompetenzen<br>Kompetenzen der Mitarbeiter                                                                                                                                                                                         |
| [77] Akdıl et al. 2018       | [77.1]  | Smart Products and Services                                          | Smart Products and Services                                                                                                                                                                                                                   |
|                              | [77.2]  | Smart business processes                                             | Production, logistics and procurement<br>R&D—Product development                                                                                                                                                                              |
|                              |         |                                                                      | After sales service<br>Pricing/Promotion<br>Sales and Distribution channels                                                                                                                                                                   |
|                              |         |                                                                      | Human resources<br>Information technologies<br>Smart finance                                                                                                                                                                                  |
|                              | [77.3]  | Strategy and Organization                                            | Business models<br>Strategic partnerships<br>Technology investments<br>Organizational structure and leadership                                                                                                                                |
| [100] Leyh et al. 2016b      | [100.1] | Vertikale Integration                                                |                                                                                                                                                                                                                                               |
|                              | [100.2] | Horizontale Integration                                              |                                                                                                                                                                                                                                               |
|                              | [100.3] | Digitale Produktentstehung                                           |                                                                                                                                                                                                                                               |
|                              | [100.4] | Querschnittstechnologien                                             |                                                                                                                                                                                                                                               |
| [118] Geissbauer et al. 2016 | [118.1] | Digital business models and customer access                          |                                                                                                                                                                                                                                               |
|                              | [118.2] | Digitisation of product and service offerings                        |                                                                                                                                                                                                                                               |
|                              | [118.3] | Digitisation and integration of vertical and horizontal value chains |                                                                                                                                                                                                                                               |
|                              | [118.4] | Data and Analytics as core capability                                |                                                                                                                                                                                                                                               |
|                              | [118.5] | Agile IT architecture                                                |                                                                                                                                                                                                                                               |
|                              | [118.6] | Compliance, security, legal and tax                                  |                                                                                                                                                                                                                                               |
|                              | [118.7] | Organisation, employees and digital culture                          |                                                                                                                                                                                                                                               |
| [124] Anderl 2015            | [124.1] | Produkte                                                             | Sensoren/Aktoren<br>Kommunikation/Connectivity<br>Datenspeicherung, Informationsaustausch<br>Monitoring<br>Produktbezogene IT-Services<br>Geschäftsmodelle um das Produkt                                                                     |
|                              | [124.2] | Produktion                                                           | Datenverarbeitung in der Produktion<br>Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M)<br>Unternehmensweite Vernetzung mit der Produktion<br>IKT-Infrastruktur in der Produktion<br>Mensch-Maschine-Schnittstelle<br>Effizienz bei kleinen Losgrößen |

|                                |         |                            |                                                                                                |                                                                                                                                                   |
|--------------------------------|---------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [126] De Carolis et al. 2017   | [126.1] | Process                    |                                                                                                |                                                                                                                                                   |
|                                | [126.2] | Monitoring and Control     |                                                                                                |                                                                                                                                                   |
|                                | [126.3] | Technology                 |                                                                                                |                                                                                                                                                   |
|                                | [126.4] | Organization               |                                                                                                |                                                                                                                                                   |
| [138] Jodlbauer, Schagerl 2016 | [138.1] | Daten                      | Big Data                                                                                       | Volume<br>Velocity<br>Variety<br>Veracity<br>Visualization                                                                                        |
|                                |         |                            | Open                                                                                           | -                                                                                                                                                 |
|                                |         |                            | Security                                                                                       | -                                                                                                                                                 |
|                                | [138.2] | Intelligenz                | Enabler                                                                                        | Identifizierbarkeit<br>Lokalisierbarkeit<br>Connectivity-Grad<br>Speicherfähigkeit<br>Sensorausstattung<br>Ausstattung Aktoren<br>Rechenfähigkeit |
|                                |         |                            | Nutzung maschineller Intelligenz                                                               | Selbstständigkeit<br>Reaktionsfähigkeit<br>Anpassungsfähigkeit<br>Kooperationsfähigkeit<br>Mensch-Maschine Symbiose                               |
|                                | [138.3] | Digitale Transformation    | Mitarbeiter                                                                                    | Mitarbeiter (Können & Wollen)<br>Führung (Dürfen)                                                                                                 |
|                                |         |                            | Transformation                                                                                 | Durchgehende digitale Modellbildung<br>Simulation & Optimierung<br>Ersetzen Materielles durch Digitales                                           |
| [151] Häberer et al. 2017      | [151.1] | Business management        | Strategy<br>Buisness models<br>Internal communication<br>Staff & knowledge                     |                                                                                                                                                   |
|                                | [151.2] | Development                | Construction<br>Production scheduling                                                          |                                                                                                                                                   |
|                                | [151.3] | Manufacturing (Production) | Process of manufacture<br>Networking<br>Production planning                                    |                                                                                                                                                   |
|                                | [151.4] | Logistics (Supply Chain)   | Receipt<br>Internal logistics<br>Outbound                                                      |                                                                                                                                                   |
|                                | [151.5] | Service                    | Marketing & After Sales<br>Quality Management<br>Maintenance & repair<br>Energy<br>IT services |                                                                                                                                                   |

## H 2 Reifegradstufen

| [Nr.] | Z | Bez.            | RG 1                                     | RG 2                                  | RG 3                                      | RG 4                         | RG 5                                    | RG 6            |
|-------|---|-----------------|------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|-----------------|
| [8]   | 1 | Maturity Level  | X                                        | X                                     | X                                         | X                            | X                                       | -               |
| [9]   | 1 | Level           | not distinct                             | X                                     | X                                         | X                            | very distinct                           |                 |
| [17]  | 1 | Level           | not implemented/ present                 | X                                     | X                                         | X                            | completely implemented/present          |                 |
| [31]  | 0 | -               | trifft nicht zu                          | trifft wenig zu                       | trifft eher zu                            | trifft völlig zu             | -                                       | -               |
| [32]  | 0 | Characteristics | 3-8 (individuell für jeden Indikator)    |                                       |                                           |                              |                                         |                 |
| [38]  | 1 | Level           | Minimal                                  | Development                           | Defined                                   | Excellence                   | -                                       | -               |
| [44]  | 1 | Level           | Incomplete                               | Performed                             | Managed                                   | Established                  | Predictable                             | Optimizing      |
| [55]  | 1 | Stufe           | Computersierung                          | Konnektivität                         | Sichtbarkeit                              | Transparenz                  | Prognosefähigkeit                       | Adaptierbarkeit |
| [61]  | 0 | Stufe           | Außenstehender                           | Anfänger                              | Fortgeschrittener                         | Erfahrener                   | Experte                                 | Exzellenz       |
| [77]  | 0 | Level           | Absence                                  | Existence                             | Survival                                  | Maturity                     | -                                       | -               |
| [100] | 1 | Reifegrade      | Bereichsübergreifende Digitalisierung    | Bereichsübergreifende Digitalisierung | Horizontale und vertikale Digitalisierung | Vollständige Digitalisierung | optimierte vollständige Digitalisierung | -               |
| [118] | 1 | Stage           | Digital novice                           | Vertical integrator                   | Horizontal collaborator                   | Digital champion             |                                         | -               |
| [124] | - | -               | X                                        | X                                     | X                                         | X                            | X                                       | -               |
| [126] | 1 | Maturity Level  | Initial                                  | Managed                               | Defined                                   | Integrated and Interoperable | Digital-oriented                        | -               |
| [138] | 0 | Reifegrade      | Skala von 0 - 10 (nicht näher definiert) |                                       |                                           |                              |                                         |                 |
| [151] | 1 | Stufe           | standards                                | big data                              | smart data                                | dark factory                 | Industrial ecosystem                    | -               |

RG = Reifegrad

Z = Startwert der Zahlenskala

X = Reifegradstufe vorhanden, aber nicht näher definiert

## H 3 Zusammenfassende Darstellung der Modellanalyse

| [Nr.] | RKM                                                               | Gewichtung                                            | Erhebung                                                               | Visualisierung                               | Sonstiges                                                                              |
|-------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| [8]   | Ja (unvollständig)                                                | Ja (1-5), vom Unternehmen definiert                   | Gemäß RKM                                                              | Netzdiagramm für jede Dimension              | Strategie-Matrix (Gap & Potenzial)                                                     |
| [9]   | Nein                                                              | Ja (1-4), vom Modell vorgegeben                       | Fragebogen (gemäß RG)                                                  | Netzdiagramm für jede Dimension und gesamt   |                                                                                        |
| [17]  | Nein                                                              | Nein                                                  | Fragebogen (gemäß RG)                                                  | Netzdiagramm gesamt                          |                                                                                        |
| [31]  | Nein                                                              | Nein                                                  | Checkliste (gemäß RG)                                                  | Nein                                         |                                                                                        |
| [32]  | Ja, in anderer Darstellung (unvollständig)                        | Nein                                                  | Gemäß RKM                                                              | Nein                                         | Beziehungen & Abhängigkeiten der Indikatoren untereinander                             |
| [38]  | Nein                                                              | Nein                                                  | Fragebogen (gemäß RG)                                                  | Nein (aber Gesamt-RG als Punktzahl)          |                                                                                        |
| [44]  | Nein                                                              | Nein                                                  | Nicht definiert                                                        | Nein                                         |                                                                                        |
| [55]  | Ja, in Form definierter Antworten des Fragebogens (unvollständig) | Nein, wird individuell durch externe Berater bestimmt | Fragebogen (gemäß RG aber Anzahl variiert), aber mit externen Beratern | Kreisförmiges Netzdiagramm                   | GAP-Analyse & Aufwand-Nutzen-Matrix; Einteilung der Unternehmensprozesse in 5 Bereiche |
| [61]  | Ja, aber nicht gegeben                                            | Ja (vorgegeben aus Evaluation)                        | Fragebogen (bei Modellerstellung und Evaluation und Erhebung)          | Balken- und Kreisdiagramme beim Benchmarking | Handlungsempfehlungen (allgemein) basierend auf RG einer Dimension                     |
| [77]  | Nein                                                              | Nein                                                  | Fragebogen (geschlossen aber nicht an RG gebunden)                     |                                              | Umrechnung der Antworten in RG mittels Tabellen (Gesamt-RG 0-3,00)                     |
| [100] | Ja                                                                | Nein                                                  | Gemäß RKM                                                              | Nein                                         | Für Anwendungssystemlandschaft                                                         |
| [118] | Ja                                                                | Nein                                                  | Fragebogen: 33 Fragen, Likert-Skala (nicht geg.)                       | Nein                                         |                                                                                        |
| [124] | Ja                                                                | Nein                                                  | Nicht definiert                                                        | Piktogramme in RKM                           |                                                                                        |
| [126] | Nein                                                              | Nein, aber modularer Aufbau                           | Modularer Fragebogen (gemäß RG)                                        | Nein                                         | Ausrichtung an 5 Unternehmensbereichen                                                 |
| [138] | Ja, aber nicht gegeben                                            | Nein (individuell durch Berater)                      | Workshop im UN (gemäß RG)                                              | Nein                                         |                                                                                        |
| [151] | Nein                                                              | Ja (vom Unternehmen festgelegt)                       | Fragebogen online (nicht gegeben)                                      | Netzdiagramm gesamt mit allen 17 Indikatoren | Ausrichtung an 5 Unternehmensbereichen                                                 |

## I Bewertung der Reifegradmodelle

| [Nr.] | Level 0                                                                                                                                                            | Einfachheit & Verständlichkeit                                                                                                                                                         | Transformations-schritte                                                                                                                            | Nicht-technologische Aspekte                                                                                                                                                          |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [8]   | RKM zeigt, dass unterste Reifegradstufe keine Voraussetzungen an die IT-Infrastruktur stellt (z.B.: „kein ERP-System“, „kein Monitoring“)                          | klare und einfach Modellanwendung und Visualisierung der Ergebnisse                                                                                                                    | Explizite Darstellung der Transformationsschritte gemäß der RG mittels einer RKM                                                                    | Eigenständige Dimension „Socio-Culture“                                                                                                                                               |
|       | Keine Konkrete Definition von Digitalisierungsstufen                                                                                                               | Dimensionen (z.B. „Technology“, „Organization“) sehr weit gefasst und dadurch etwas unübersichtlich; Zuordnung der Indikatoren teils unverständlich                                    |                                                                                                                                                     | Dimension ist mit 3 Indikatoren in Relation zum restlichen Modell sehr klein; weitere nicht-technologische Aspekte finden sich jedoch teils in „Organization“ wieder                  |
| [9]   | Assesment mittels Fragebogen, wobei erste Antwortoption „nicht ausgeprägt“ ist                                                                                     | Reifegradbestimmung durch eindeutige Fragen eher einfach anwendbar; Visualisierung der Ergebnisse mittels Netzdiagramm                                                                 | Mit 62 Indikatoren die diesbezüglich höchste Detaillierungstiefe                                                                                    | Dimensionen: „Strategy“, „Leadership“, „Culture“, „People“                                                                                                                            |
|       | Antwortskala bezieht sich nur auf Industrie 4.0 Indikatoren und überprüft nicht das Vorhandensein notwendiger Industrie 3.0 Technologien                           | Formulierung der Industrie 4.0 Aspekte ausschließlich in Form von Fragen, dadurch wenig übersichtlich                                                                                  | Keinerlei Beschreibung, wie die konkreten Ausprägungen der Indikatoren auf den Reifegradstufen sind, sondern lediglich Beurteilung auf Likert-Skala | Nicht alle Indikatoren veröffentlicht, daher kann genau gesagt werden, welche nicht-technologischen Aspekte die Dimensionen umfassen                                                  |
| [17]  | Assesment mittels Fragebogen, mit erster Antwortoption: „nicht vorhanden/implementiert“                                                                            | RG-Bestimmung durch eindeutige Fragen eher einfach anwendbar; Visualisierung der Ergebnisse                                                                                            |                                                                                                                                                     | Dimensionen: „Strategy“, „People“                                                                                                                                                     |
|       | Antwortskala bezieht sich nur auf Industrie 4.0 Indikatoren, überprüft nicht die Reife notwendiger Industrie 3.0 Technologien                                      | Formulierung der Industrie 4.0 Aspekte ausschließlich in Form von Fragen, dadurch wenig übersichtlich                                                                                  | Sehr geringer Umfang; Keine Beschreibung, wie konkrete Ausprägungen der Indikatoren auf den Reifegradstufen sind (nur Likert-Skala)                 | Sehr geringer Umfang, insgesamt nur 5 Fragen in den beiden Dimensionen (allerdings in Relation zum Gesamtmodell ausreichender Umfang)                                                 |
| [31]  | Auch grundlegende Industrie 3.0 Technologien werden insb. durch die Dimension „Kommunikations-netzwerke“ abgefragt; Erste Antwortoption ist „trifft nicht zu“      | Checkliste einfach und übersichtlich; kann durch Errechnung der Punktzahl und Einstufung in Anfänger/Fortgeschrittener/Profi schnell einen ersten Überblick über den Ist-Zustand geben | Indikatoren sind sehr eng gefasst und ermöglichen daher eine erste Idee möglicher Entwicklungsschritte                                              | 2 Indikatoren „Mitarbeiter sind geschult“ und „Management stellt Ressourcen bereit“                                                                                                   |
|       | Es sind keine Vorstufen der Industrie 4.0 für die einzelnen Indikatoren definiert, sondern nur die Industrie 4.0 Aspekte selbst                                    | Indikatoren teils unkonkret und dadurch unverständlich, z.B.: „Management: Ressourcen sind bereitgestellt“ → Welche Ressourcen und wofür?                                              | Keine Nennung konkreter Abstufungen                                                                                                                 | Sehr geringer Umfang, keine eigene Dimension                                                                                                                                          |
| [32]  | „Characteristic Level 0“ ist für jeden Indikator definiert                                                                                                         | Visualisierung für jeden Indikator mitsamt der Abhängigkeiten verbessert Verständlichkeit zumindest leicht                                                                             | Bis zu 8 konkrete Ausprägungen für jeden Indikator, zusätzlich Beziehungen und Abhängigkeiten definiert                                             | Dimension „Personnel“                                                                                                                                                                 |
|       | Ausprägungen können in der Publikation nur erwähnt werden (im veröffentlichten Beispiel ist „Characteristic Level 1“ gegeben und stellt sehr geringe Anforderungen | Insgesamt sehr unübersichtlich, keine Gesamtdarstellung, sondern nur für jeden Indikator isoliert                                                                                      | Transformationsschritte nicht übersichtlich in einer Matrix oder Ähnlichem dargestellt                                                              | Nur eine nicht-technologische Dimension; hierbei sind nicht alle Indikatoren veröffentlicht, sodass nicht eindeutig festgestellt werden kann, ob sie alle gewünschten Aspekte abdeckt |

|      |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                              |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [38] | Vorhandensein einer Strategie und der notwendigen Unternehmenskultur wird nicht vorausgesetzt                                                                            | Erfassung mittels verständlicher Fragen; Ist-Situation wird in Punktzahl ausgedrückt → ermöglicht einfaches Benchmarking bzw. Vergleich mit anderen Unternehmen        | Indikatoren sind recht eng gefasst und es werden konkrete Fragen formuliert; ermöglichen daher eine erste Idee möglicher Entwicklungsschritte                                                     | 2 von 3 Dimensionen („People and Culture“, „Strategy“) sind nicht-technologisch                                                                              |
|      | Modell hat technologischen Fokus und ist für Großunternehmen konzipiert; setzt daher zumindest in der Dimension „Factory of Future“ gewisse Industrie 3.0 Aspekte voraus | Keine genauen Erläuterungen und keine Visualisierungen; Antwortskala der Fragen entspricht nicht der Reifegradskala, was Verwirrung stiften kann                       | Keine Nennung konkreter Abstufungen                                                                                                                                                               | Diese umfassen insgesamt nur 5 Indikatoren                                                                                                                   |
| [44] | „Level 0: Incomplete“ vorhanden                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                              |
|      | Unvollständig bedeutet zumindest in Teilen vorhanden und setzt folglich bereits einen gewissen Umsetzungsgrad voraus                                                     | Reifegradmodell nicht als solches erkennbar; abgebildetes Diagramm ist unverständlich; Transformationspfad (S. 139, Abb. 4) nicht erläutert und absolut unverständlich | Sehr unübliche Dimensionen, die sehr unnötig kompliziert benannt sind; es wird zwar ein Transformationsprozess dargestellt (s. links), die Schritte sind aber wirr und es ist kein Pfad erkennbar | Keine Berücksichtigung kultureller Aspekte                                                                                                                   |
| [55] | Die ersten beiden Reifegradstufen umfassen die vollständige Umsetzung der Industrie 3.0 in den Schritten „Computerisierung“ und „Konnektivität“                          | Gute Visualisierung macht Modellaufbau verständlich                                                                                                                    | Umfangreiches, detailliertes, professionelles Modell                                                                                                                                              | Stellen einen elementaren Bestandteil des Modells dar; es werden zahlreiche wichtige Aspekte genannt, die so konkret in keinem anderen Modell erkannt wurden |
|      |                                                                                                                                                                          | Umfangreicher und dadurch eher komplizierter Modellaufbau, der explizit für die Anwendung mit Experten angedacht ist                                                   | Insbesondere die technologischen Indikatoren umfassen oft mehrere Konzepte gleichzeitig; Ausprägungsstufen sind nur durch Antwortoptionen des Fragenkatalogs gegeben                              |                                                                                                                                                              |
| [61] | „Level 0: Außenstehender“ setzt nicht das Vorhandensein etwaiger Kompetenzen und Technologien voraus                                                                     | Übersichtliche Darstellung durch kreisförmige Anordnung; verständliche Indikatoren                                                                                     | Ausprägungen der Reifegradstufen für die Dimensionen im Ganzen und beschrieben                                                                                                                    | Wichtigkeit dieses Faktors wird zu Beginn der Studie betont und findet in 2 Dimensionen („Strategie und Organisation“, „Mitarbeiter“) Berücksichtigung       |
|      | Konkrete Industrie 3.0 Aspekte, wie z.B. das Vorhandensein einfacher IT-Systeme (z.B. ERP) wird nicht erfasst                                                            | Fragenkatalog setzt zumindest geringes Maß an Industrie 4.0 Wissen voraus                                                                                              | Für die Indikatoren fehlen entsprechend wesentliche Informationen                                                                                                                                 | In einigen anderen Modellen noch umfangreicher                                                                                                               |
| [77] | „Level 0“ als komplette Abstinenz von Industrie 4.0 beschrieben                                                                                                          | Fragen sind verständlich formuliert und enthalten konkrete Antwortoptionen                                                                                             | Fragen beinhalten konkrete Abstufungen                                                                                                                                                            | Dimension „Strategy and Organization“ vorhanden (befasst sich aber in erster Linie mit der Geschäftsmodelltransformation)                                    |
|      | Fragen decken nicht alle Grundvoraussetzungen ab, erheben nur auf Industrie 4.0 Umsetzung                                                                                | Keine Darstellung als Modell im eigentlichen Sinne; es ist nicht deutlich, welches Themenfeld gerade evaluiert wird                                                    | Antworten folgen nur selten den definierten Reifegraden; komplizierte Umrechnung mittels Tabellen, dadurch Transformationsschritte nur schwer ersichtlich                                         | Unternehmenskultur, Mitarbeiter etc. werden nicht berücksichtigt                                                                                             |

|       |                                                                                                                                                            | Einfache Darstellung in Matrix Form                                                                                                                                                                                                           | Konkrete Prinzipien in RKM dargestellt                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                               |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [100] | Bereits die unterste Reifegradstufe umfasst nicht nur das Vorhandensein, sondern auch die bereichsübergreifende Integration der Anwendungssysteme          | Setzt Wissen bzgl. der Prinzipien der Industrie 4.0 (z.B. horizontale und vertikale Integration) voraus                                                                                                                                       | Ausprägungen eher allgemein und generisch; schrittweise Transformation und Implementierung neuer Technologien ist nur bedingt erkennbar                                                                                         | Werden nicht berücksichtigt                                                                                                                   |
|       |                                                                                                                                                            | Einfacher Aufbau in matrix-Form, Assessment mittels Fragenkatalog                                                                                                                                                                             | RKM vorhanden                                                                                                                                                                                                                   | Wichtigkeit dieses Faktors wird zu Beginn der Studie betont                                                                                   |
| [118] | Bereits die unterste Reifegradstufe umfasst umfangreiche IT-Infrastrukturen                                                                                | Dimensionen sind nicht in Indikatoren untergliedert und daher unübersichtlich                                                                                                                                                                 | Da keine Indikatoren definiert sind, sind keine einzelnen und konkreten Handlungsschritte erkennbar/ableitbar                                                                                                                   | Wird dann aber nur zusammengefasst in einer der sieben Modelldimensionen („Organisation, employees and digital culture“) aufgegriffen         |
|       | Unterste Prozessstufe stellt stets den „Stand Null“ dar und setzt keine umfangreiche Digitalisierung voraus                                                | Einfache, übersichtliche Darstellung, die durch Visualisierungen (Piktogramme) unterstützt wird<br>Verständliche stichpunktartige Beschreibung der Konzepte und Technologien                                                                  | RKM, die die sukzessive Umsetzung der Industrie 4.0 verdeutlicht und Handlungsfelder aufzeigt                                                                                                                                   |                                                                                                                                               |
| [124] | Allerdings keine Skala explizit definiert                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                 | Lediglich die Dimensionen „Produkte“ und „Produktion“ betrachtet                                                                              |
|       | „Maturity Level 1: Initial“ bedeutet hier, dass die Prozesse nicht angemessen organisiert sind und die notwendigen Technologien nicht zur Verfügung stehen | Modularer Aufbau durch Trennung in Unternehmensbereiche grundsätzlich verständlich                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                               |
| [126] | Da keine konkreten Indikatoren oder Ausprägungen der Dimensionen gegeben sind, kann nicht eindeutig bestimmt werden, die weitreichend ML1 wirklich ist     | Kombination der Unternehmensbereiche mit den Dimensionen und die resultierende Darstellung der Prozessstruktur (S. 18) ist jedoch nicht verständlich                                                                                          | Werden nur im Rahmen des Fragenkatalogs genannt; sehr vage                                                                                                                                                                      | Werden eventuell in geringem Maße in der Dimension „Organization“ beachtet (diese ist jedoch nicht näher beschrieben)                         |
|       | Weitreichende Reifegradskala von 0-10                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                 | Dimension „Digitale Transformation“ umfasst u.a. die Einstellung der Mitarbeiter und Unternehmensführung                                      |
| [138] | Nichtsdestotrotz kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, dass Stufe 0 nicht bereits Anforderungen stellt, da keine RKM gegeben                            | Dimensionen „Daten und Intelligenz“ setzen zum Verständnis bereits Industrie 4.0 Wissen voraus; Anwendung erfolgt in vielen Schritten, die nur mit externen Beratern ausgeführt werden können (insb. die Definition der „Applikationsfelder“) | Es existieren Tabellen für die Ausprägungen der Indikatoren entlang der Skala; diese sind jedoch nicht publiziert und können zudem nicht direkt angewandt werden, da der Umweg über die Applikationsfelder gegangen werden muss | Eher geringe Bedeutung im Modell                                                                                                              |
|       |                                                                                                                                                            | Einfache, praxisorientierte Modelldimensionen und Indikatoren; Visualisierung vorhanden                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                 | Indikatoren „strategy“, „internal communication“, „staff and knowledge“                                                                       |
| [151] | RG 1 „standards“ beschreibt bereits eine Voraussetzung, die in KMU nicht immer gegeben ist                                                                 | Keine Modellübersicht, sondern nur Assessment mittels Fragenkatalog und am Ende ein Netzdiagramm ohne weitere Erklärung                                                                                                                       | Konkrete Handlungsfelder sollen explizit nicht direkt aufgezeigt werden, sondern nur individuell im Unternehmen (S. 133)                                                                                                        | Orientierung der Dimensionen an Unternehmenseinheiten und daher keine explizite nicht-technologischen bzw. nicht-prozessbezogenen Dimensionen |

## J Synthese der Modellindikatoren

Die Modellindikatoren wurden zur Synthese farblich gekennzeichnet. Die Kennzeichnung gilt dabei nur innerhalb eines Themenfeldes.

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Produkte              | Individualization of products, Digitalization of products, Product integration into other systems, Do your product have integrated sensors?, Are your products able of collecting data about their usage?, Sind internetfähig, Sensorik zur Datenaufnahme, Kommunikationsschnittstellen, Einheitlicher Kommunikationsstandard, Datenanalyse Nutzungsphase, IKT-Zusatzfunktionalitäten, Smart Products and Services, Sensoren/Aktoren, Kommunikation/Connectivity, Datenspeicherung, Informationsaustausch, Monitoring, Produktbezogene IT-Services, Geschäftsmodelle um das Produkt, Construction, Production scheduling                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Produktbezogene Services<br>Sensorik<br>Daten erfassen/speichern/auswerten<br>Kommunikationsfähigkeit<br>Neue Geschäftsmodelle (Kundenindividualisierung)<br>Monitoring<br>Entwicklung                                                                                                                                                                                                     |
| Produktion & Prozesse | Agile Manufacturing Systems, Self-Adapting Manufacturing Systems, Continuous and Uninterrupted Material Flow Models, Plug and Produce, Integrated and Digital Real-Time Monitoring Systems, Decision Support System, Remote Monitoring of Products, Big Data Analysis, ERP/MES, Decentralization of processes, Modelling and simulation, Interdisciplinary, interdepartmental collaboration, Do your machines exchange data automatically?, Are you able to produce in small batches?, 3D Printing, Cloud, MES, IoT, CPS, Big Data, Sensors, E-Value-Chain, Autonomous Robots, Digitales Abbild, Maschinenpark, Datennutzung, IT-Systeme, Cloud, IT-Sicherheit, Autonome Prozesse, Informationsaustausch, Smart production and operations (Production, logistics and procurement; R&D—Product development), Smart marketing and Sales operations (After sales service Pricing/Promotion, Sales and Distribution channels), Supportive operations (Human resources, Information technologies), Smart finance, , Datenverarbeitung in der Produktion, Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M), Unternehmensweite Vernetzung mit der Produktion, IKT-Infrastruktur in der Produktion, Mensch-Maschine-Schnittstelle, Effizienz bei kleinen Losgrößen, Process of manufacture, Networking, Production planning | Produktionssysteme (Maschinen, CPS, autonome Roboter)<br>IT-Systeme (ERP, MES, Entscheidungsunterstützung)<br>Datenaustausch, verarbeitung, -analyse, -nutzung<br>Simulation<br>Marketing & (After) Sales<br>Isolierte Technologien (3D-Druck, Cloud, IoT, Sensoren)<br>Unternehmensweite Vernetzung und Kollaboration<br>Fertigung in kleinen Losen<br>Monitoring<br>MMS<br>IT-Sicherheit |
| Technologie           | Cloud Computing, Communication & Connectivity, Digital and Connected Workstations, E-Kanban, IoT and Cyber-Physical Systems, Cyber Security, Artificial Intelligence, Identification and Tracking Technology, Additive Manufacturing (3D Printing), Predictive Maintenance, Telemaintenance, Object Self Service, Automated Storage Systems, Automated Transport Systems, Automated Manufacturing/Assembly, Collaborative Robotics, Smart Assistance Systems, Product Data- and Lifecycle Management (PDM & PLM), Cyber-Physical System Standards, Virtual and Augmented Reality, Simulation, Existence of modern ICT, Utilization of mobile devices, Utilization of machine-to-machine communication, Sind internetfähig, Sensorik zur Datenaufnahme, Kommunikationsschnittstellen, Einheitlicher Kommunikationsstandard, Machine Data Acquisition, Maintenance, Evaluation of Data and Mass Data                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Konnektivität/Kommunikation zwischen Maschinen/Produkten<br>Isolierte Technologien (Cloud, AI, 3D-Druck, Roboter, automatische Fertigung, Assistenzsysteme, VR/AR)<br>CPS<br>Logistiksysteme<br>IKT-Infrastruktur<br>Datenerfassung<br>Maintenance<br>IT-Sicherheit                                                                                                                        |
| IT & Daten            | Cloud Plattform eingerichtet, Maschinen/Anlagen mit Cloud verbunden, Daten verdichtet, analysiert, bewertet, Datenschutz, Strukturierte Kommunikation (Effizient kommunizieren, Schnittstellen aufgabengerecht gestalten), Digitale Befähigung (Digitale Kompetenzen vorhalten, Rückmeldedaten automatisiert erzeugen, Daten dezentral (vor-)verarbeiten), Anteil Datennutzung, Umsatzanteil, Datenbasierte Dienstleistungen, Big Data, Open, Security, Verantwortliche Person bekannt, Netzwerkzugänge vor Fremden gesichert, MA sensibilisiert, Integration (Horizontale und vertikale Integration, Data Governance, Standardisierte Datenschnittstelle, IT-Sicherheit), , Informationsverarbeitung (Automatische Datenanalyse, Kontextbasierte Informationsverarbeitung, Anwendungsgerechte Benutzerschnittstelle, Resiliente IT-Infrastruktur)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Cloud<br>Datenschutz/-Sicherheit<br>IT-Sicherheit, Resilienz<br>Datenaustausch, verarbeitung, -analyse, -nutzung<br>Schnittstellen, Kommunikation<br>Datenbasierte Services zum Produkt<br>Horizontale/Vertikale Integration                                                                                                                                                               |

|                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Management, Führung, Organisation   | Digital Product-Service Systems, Servitization and Sharing Economy, Digital Add-on or Upgrade, Digital Lock-In, Freemium, Digital Point of Sales, Open Innovation, Industry 4.0 Roadmap, Sustainable Supply Chain Design, Collaboration Network Models, Implementation I40 roadmap, Available resources for realization, Adaptation of business models, Willingness of leaders, Management competences and methods, Existence of central coordination for I40, Do you have a strategy for implementing, Industry 4.0?, Do you have a digital technical officer?, Bereitstellung notwendiger Ressourcen, IT-Security / Industrial Security, Deployment of Personnel, Personnel Capacity Data, Technological Investment, Agility Vision, Manufacturing Strategy, Interne Organisation (Flexible Communities, Management von Entscheidungsrechten, Motivierende Zielsysteme, Agiles Management), Kollaboration in Wertschöpfungsnetzwerken (Ausrichtung am Kundennutzen, Kooperation im Netzwerk), Strategie, Investition, Innovationsmanagement, Business models, Strategic partnerships, Technology investments, Organizational structure and leadership, Strategy, Business models, Internal communication, Staff & knowledge | Services/neues Geschäftsmodell um Produkt (Kundenorientierung)<br>Netzwerk-Kollaboration, Supply Chain<br>Strategie, Roadmap, Vision<br>Ressourcenverfügbarkeit<br>Interne Organisation, Kollaboration, Kommunikation<br>Managementkompetenzen/-stil<br>Zentrale Koordination (zuständige Person) |
| Mitarbeiter & Kultur                | Training 4.0, Role of the Operator, Cultural Transformation, Knowledge sharing, Open-innovation and cross company collaboration, Value of ICT in company, ICT competences of employees, openness of employees to new technology, autonomy of employees, Do you regularly train your employees?, Do your employees welcome new technologies?, Do you have a recruiter dedicated to Industry 4.0 needs?, 3D-Brillen, Smartphones, Tablets, Schulung der MA, Bedarfsgerechte, arbeitsplatznahe Informationen, Expertise, Methodical Expertise, Personnel Development and Qualification, Innovation Openness, Continuous Improvement capabilities, Bereitschaft für Veränderung (Fehler als Schätze, Offenheit für Innovation, Datenbasiertes Lernen und Entscheiden, Fortlaufende Qualifikation, Gestalten von Veränderung), Soziale Kollaboration (Demokratischer Führungsstil, Offene Kommunikation, Vertrauen in Prozesse und Informationssysteme), Aufbau der Kompetenzen, Kompetenzen der Mitarbeiter                                                                                                                                                                                                                       | Kompetenzen der MA (Schulung und Vorhandene), Autonomie<br>Interne Kollaboration, Kommunikation, Wissensaustausch<br>Kultur, Akzeptanz, Vertrauen<br>Führungsstil<br>Informationsverfügbarkeit                                                                                                    |
| Geschäftsmodell, Services, Netzwerk | Utilization of customer data, Digitalization of sales/services, Customer's Digital media competence, Anteil Datennutzung, Umsatzanteil, Datenbasierte Dienstleistungen, Smart Products and Services, Marketing & After Sales, Quality Management, Maintenance & repair, Energy, IT services                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Nutzung Kundendaten<br>Marketing, After (Sales)<br>IT-Services/DL um Produkt<br>QM, Maintenance                                                                                                                                                                                                   |
| Rechtliches, Standards              | Labour regulations for I40, Suitability of technological standards, Protection of intellectual property                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Standards<br>IP-Rechte<br>Arbeitsrecht                                                                                                                                                                                                                                                            |

## K Evaluationsergebnisse

### Angaben zum Unternehmen

| Frage             | Antworten                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Unternehmensgröße | 0-9: 1<br>10-49: 2<br>50-249: 6<br>≥ 250: 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Jahresumsatz 209  | ≤ 2 Mio. €: 2<br>≤ 10 Mio. €: 4<br>≤ 50 Mio. €: 2<br>> 50 Mio. €: 6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Branche           | Kunststoffverarbeitende Industrie<br>Kunststoffverarbeitende Industrie<br>Herstellung elektrotechnischer Komponenten<br>Kunststoffverarbeitende Industrie<br>Elektronik Fertigung Industrie<br>Automobilindustriezulieferer<br>IT<br>Druckbranche<br>Metallverarbeitende Industrie<br>Energie- und Messtechnik<br>Industrieautomation<br>Werkzeughersteller/ metallverarbeitendes Gewerbe<br>Metallverarbeitung<br>Handel |
| Position          | Prokurist<br>IT Management<br>Prozessingenieur<br>Process Engineer mit Schwerpunkt Verbesserungen<br>Geschäftsführer<br>Production System Manager<br>Sales<br>Produktionsleiter<br>Digitalisierungsmanager<br>Gesellschafter Geschäftsführer<br>Leiter FuE / Vertrieb<br>KVP Manager<br>Projektingenieur, Teamleiter Prozessentwicklung<br>Projektmanager Prozesse und Logistik                                           |

Ermittlung der Größenklassen der befragten Unternehmen (gemäß EU-Definition):

| Teilnehmer-ID | Unternehmen (Lfd. Nr.) | Mitarbeiter | Jahresumsatz | Größenklasse | Σ                                                                                |
|---------------|------------------------|-------------|--------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 17            | 1                      | 10-49       | ≤ 10 Mio. €  | Klein        | 2 Kleinst-<br>unternehmen,<br>4 kleine,<br>3 mittlere,<br>3 große<br>Unternehmen |
| 19            | 2                      | 50-250      | ≤ 50 Mio. €  | Mittel       |                                                                                  |
| 20            | 3                      | 50-250      | ≤ 50 Mio. €  | Mittel       |                                                                                  |
| 22            | 4                      | ≥ 250       | > 50 Mio. €  | Groß         |                                                                                  |
| 25            | 5                      | 50-250      | > 50 Mio. €  | Mittel       |                                                                                  |
| 26            | 6                      | 50-250      | ≤ 10 Mio. €  | Klein        |                                                                                  |
| 27            | 7                      | 50-250      | ≤ 10 Mio. €  | Klein        |                                                                                  |
| 28            | 8                      | ≥ 250       | > 50 Mio. €  | Groß         |                                                                                  |
| 29            | 9                      | 50-250      | ≤ 10 Mio. €  | Klein        |                                                                                  |
| 30            | 10                     | 10-49       | ≤ 2 Mio. €   | Kleinst      |                                                                                  |
| 33            | 8                      | ≥ 250       | > 50 Mio. €  | Groß         |                                                                                  |
| 34            | 8                      | ≥ 250       | > 50 Mio. €  | Groß         |                                                                                  |
| 35            | 11                     | 0-9         | ≤ 2 Mio. €   | Kleinst      |                                                                                  |
| 37            | 12                     | ≥ 250       | > 50 Mio. €  | Groß         |                                                                                  |

## Bewertung der Dimensionen und Indikatoren

| Legende |                                       |
|---------|---------------------------------------|
| ●       | stimme zu ( $\hat{=}$ 100%)           |
| ◐       | stimme eher zu ( $\hat{=}$ 75%)       |
| ◑       | Neutral ( $\hat{=}$ 50%)              |
| ◒       | stimme eher nicht zu ( $\hat{=}$ 25%) |
| ○       | stimme nicht zu ( $\hat{=}$ 0%)       |
| ✓       | Ja                                    |
| ✗       | Nein                                  |
| 0       | Unsicher                              |

| Produkte                               |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |   |     |
|----------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-----|
| Indikator                              | Frage       | ●                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | ◐ | ◑ | ◒                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | ○ | Ø   |
| Sensoren/Aktoren                       | sinnvoll    | 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 4 | 0 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0 | 93% |
|                                        | wichtig     | 8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 5 | 1 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0 | 88% |
|                                        | schlüssig   | 8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 6 | 0 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0 | 89% |
| Kommunikation/<br>Connectivity         | sinnvoll    | 7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 5 | 1 | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0 | 82% |
|                                        | wichtig     | 6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 4 | 2 | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0 | 75% |
|                                        | schlüssig   | 7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 5 | 0 | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0 | 80% |
| Funktionalität zur<br>Datenspeicherung | sinnvoll    | 7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 7 | 0 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0 | 88% |
|                                        | wichtig     | 7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 5 | 2 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0 | 84% |
|                                        | schlüssig   | 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2 | 2 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0 | 89% |
| Gesamt                                 | Frage       | ✓                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | ✖ | 0 | Kommentar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |   |     |
|                                        | vollständig | 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1 | 3 | „Wichtig ist aus meiner Sicht die Klärung wie wichtig die <b>Mensch-Maschine Schnittstelle</b> ist. Hier entstehen die Ängste und Ablehnungen. Natürlich darf auch die Frage nach der <b>Ressourceneffizienz</b> gestellt werden, um technologische Rebound-Effekte zu vermeiden.“<br>„Funktioniert ggf. nicht für <b>Handel</b> sondern nur Produkte; außerdem im Falle von Produkten und Dienstleistungen im Portfolio ggf. nicht klar was, wie oder mit welchen Anteilen bewertet werden soll“ |   |     |
|                                        | Anm.        | „Item 1.2: <b>Kommunikation/Connectivity</b> ist teilweise <b>zu Schnittstellspezifisch</b> “<br>„Es muss auch berücksichtigt werden, dass <b>für einige Produkte ein autonomer Datenaustausch oder Zugang zum IOT nicht sinnvoll</b> ist. Z.B. für Verpackungsmaterialien wie Pappkartons oder Baumaterialien wie Ziegel sind solche Techniken übertrieben. Wenn aus dieser Sicht betrachtet, würde das KMU ganz schwer der Industrie 4.0 Status erreichen.“<br>„ <b>Mensch-Maschine; Ressourceneffizienz</b> “ (s.o.)<br>„Ist das Produkt fähig, <b>neue Geschäftsbereiche</b> zu generieren? Wie wird das Produkt im Zuge der Digitalisierung <b>ggf. angegriffen</b> ? Wird es noch Bestand haben?“ |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |   |     |

| Produktion                            |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |   |     |
|---------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-----|
| Indikator                             | Frage       | ●                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | ◐ | ◑ | ◒                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | ○ | Ø   |
| IKT-Infrastruktur                     | sinnvoll    | 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 3 | 1 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 91% |
|                                       | wichtig     | 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 4 | 0 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 93% |
|                                       | schlüssig   | 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 4 | 0 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 93% |
| Mensch-Maschine-Schnittstelle         | sinnvoll    | 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 3 | 1 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 91% |
|                                       | wichtig     | 11                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 1 | 2 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 91% |
|                                       | schlüssig   | 11                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 2 | 1 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 93% |
| M2M-Kommunikation                     | sinnvoll    | 8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 5 | 0 | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 86% |
|                                       | wichtig     | 7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 6 | 0 | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 84% |
|                                       | schlüssig   | 8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 3 | 2 | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 82% |
| Flexible & Wandlungsfähige Produktion | sinnvoll    | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 6 | 0 | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 77% |
|                                       | wichtig     | 6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 2 | 3 | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 73% |
|                                       | schlüssig   | 7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 3 | 1 | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1 | 77% |
| Monitoring, QM, Maintenance           | sinnvoll    | 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 4 | 0 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 93% |
|                                       | wichtig     | 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 4 | 0 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 93% |
|                                       | schlüssig   | 9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 5 | 0 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 91% |
| Digitale Fabrik(-planung)             | sinnvoll    | 7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 5 | 1 | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 82% |
|                                       | wichtig     | 7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 4 | 2 | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 80% |
|                                       | schlüssig   | 9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 3 | 2 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 88% |
| Gesamt                                | Frage       | ✓                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | ✖ | 0 | Kommentar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |   |     |
|                                       | vollständig | 11                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 1 | 1 | „Sind aktuell kein Produktionsbetrieb und haben nur einen automatisierten Kalibrierprüfstand. Hier bräuchten wir Unterstützung der Uni.“<br>„Funktioniert ggf. nicht für <b>Handel</b> sondern nur Produkte/Produktion; außerdem im Falle von Produkten und Dienstleistungen im Portfolio ggf. nicht klar <b>was, wie oder mit welchen Anteilen bewertet werden soll</b> ; Bsp.: Logistikstandort vs. Handelsgeschäft“ |   |     |
|                                       | Anm.        | „Item 2.4: Erste Ausprägung: Der Begriff Gleichteile passt nicht für jede Produktion. Große Losgrößen und lange Rüstzeiten beschreiben den gleichen Zustand ohne Automobilbezug.“<br>„Hier auch, <b>abhängig vom Unternehmen</b> und was da hergestellt wird, sind die Items mehr oder weniger sinnvoll/ wichtig. Eine einheitliche Zu- oder Absage konnte ich für die Items nicht treffen“<br>„Ressourceneffizienz fehlt aus meiner Sicht immer noch;<br><b>E-Learning um die Mitarbeiter zu Schulen</b> / Digitalisierung braucht ein ständiges Lernen“ |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |   |     |
|                                       |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |   |     |

| Organisation                         |             |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |   |     |
|--------------------------------------|-------------|----|---|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-----|
| Indikator                            | Frage       | ●  | ◐ | ◑ | ◒                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | ○ | Ø   |
| Beschaffungsprozess                  | sinnvoll    | 9  | 3 | 2 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0 | 88% |
|                                      | wichtig     | 9  | 4 | 1 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0 | 89% |
|                                      | schlüssig   | 11 | 2 | 0 | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0 | 91% |
| Abwicklung Kundenauftrag             | sinnvoll    | 9  | 4 | 1 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0 | 89% |
|                                      | wichtig     | 9  | 4 | 0 | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0 | 88% |
|                                      | schlüssig   | 10 | 3 | 1 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0 | 91% |
| Interne Abwicklung Fertigungsauftrag | sinnvoll    | 12 | 2 | 0 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0 | 96% |
|                                      | wichtig     | 12 | 2 | 0 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0 | 96% |
|                                      | schlüssig   | 11 | 3 | 0 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0 | 95% |
| Gesamt                               | Frage       | ✓  | ✖ | 0 | Kommentar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |     |
|                                      | vollständig | 12 | 0 | 2 | „Es gibt in der Regel nicht einen Beschaffungsprozess und der Digitalisierungsgrad kann in Teilen deutlich abweichend sein, da externe Software/Subunternehmen/ Dienstleister hier das Know-How einbringen und so z.B. in der kleinsten "unwichtigsten" Abteilungen der höchste Innovationsgrad herrscht (Bsp: einsatz von SAP in der Finanzabteilung vs. Alte Produktionsanlagen im Kerngeschäft)“ |   |     |
|                                      | Anm.        | -  |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |   |     |

| IT & Daten                             |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |   |     |
|----------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-----|
| Indikator                              | Frage       | ●                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | ◐ | ◑ | ◒                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | ○ | Ø   |
| IT-Systeme                             | sinnvoll    | 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 2 | 2 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 89% |
|                                        | wichtig     | 9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 4 | 1 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 89% |
|                                        | schlüssig   | 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 3 | 0 | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 89% |
| Vernetzung der Produktion              | sinnvoll    | 8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 3 | 2 | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 82% |
|                                        | wichtig     | 9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 3 | 1 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 90% |
|                                        | schlüssig   | 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 1 | 1 | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1 | 82% |
| Datenerhebung, -nutzung, -verarbeitung | sinnvoll    | 8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 4 | 2 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 86% |
|                                        | wichtig     | 7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 4 | 3 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 82% |
|                                        | schlüssig   | 11                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 1 | 2 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 91% |
| Datenspeicherung                       | sinnvoll    | 6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 3 | 3 | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1 | 71% |
|                                        | wichtig     | 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 6 | 4 | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 70% |
|                                        | schlüssig   | 7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 4 | 1 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2 | 75% |
| Stammdatenmanagement                   | sinnvoll    | 8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 6 | 0 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 89% |
|                                        | wichtig     | 8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 6 | 0 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 89% |
|                                        | schlüssig   | 9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 4 | 1 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 89% |
| IT-Sicherheit                          | sinnvoll    | 8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 5 | 1 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 88% |
|                                        | wichtig     | 8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 6 | 0 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 89% |
|                                        | schlüssig   | 9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 2 | 2 | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 84% |
| Datensicherheit                        | sinnvoll    | 8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 6 | 0 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 89% |
|                                        | wichtig     | 9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 5 | 0 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 91% |
|                                        | schlüssig   | 9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 2 | 3 | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0 | 86% |
| Gesamt                                 | Frage       | ✓                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | ✖ | 0 | Kommentar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |   |     |
|                                        | vollständig | 11                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 1 | 2 | “ Siehe unten ITEM4.7 nicht vollständig betrachtet“<br>„auch hier kann es <b>im unternehmen unterschiedliche Reifegrade</b> geben für Produkte/Dienstleistungen an Kunden und interne Prozesse, die ggf. ebenfalls unterschiedliche Standards haben (je nach eingesetzter Lösung (Bsp. Office 365). Die <b>hierarchie Cloud (privat) --&gt;Cloud (public)</b> teile ich so nicht, da es ggf. nur ein Sicherheitsthema abbildet, keine Evolutionsstufe“ |   |     |
|                                        | Anm.        | „Item 4.4: Datenspeicherung <b>Cloud on prem</b> hab ich noch nicht gehört > Lokales Rechenzentrum;<br>Es gibt aber auch noch Hybrid > Lokales Rechenzentrum mit Private und / oder Public Cloud<br>Item 4.7: <b>Datensicherheit</b> ; Der <b>Ort der Sicherung</b> wird hier <b>nicht betrachtet</b> ist aber relevant“<br>„Item 4.2: <b>Vernetzung der Produktion</b> mit anderen Bereichen: Eine <b>Konkretisierung der Auswahlmöglichkeiten</b> , z.B. "Die Produktion erhält alle Anweisungen digital über das ERPSystem" etc. machen mMn. mehr Sinn als eine grobe Beschreibung der Möglichkeiten.“ |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |   |     |

| Management, Führung & Kultur |             |    |   |   |           |   |     |
|------------------------------|-------------|----|---|---|-----------|---|-----|
| Indikator                    | Frage       | ●  | ◐ | ◑ | ◒         | ○ | Ø   |
| Industrie 4.0 Vision         | sinnvoll    | 9  | 4 | 1 | 0         | 0 | 89% |
|                              | wichtig     | 10 | 2 | 1 | 1         | 0 | 88% |
|                              | schlüssig   | 10 | 4 | 0 | 0         | 0 | 93% |
| Führungsstil                 | sinnvoll    | 7  | 4 | 2 | 1         | 0 | 80% |
|                              | wichtig     | 7  | 6 | 0 | 1         | 0 | 84% |
|                              | schlüssig   | 9  | 5 | 0 | 0         | 0 | 91% |
| Interne Kommunikation        | sinnvoll    | 6  | 5 | 2 | 1         | 0 | 79% |
|                              | wichtig     | 6  | 3 | 2 | 3         | 0 | 71% |
|                              | schlüssig   | 9  | 3 | 2 | 0         | 0 | 88% |
| Fehlerkultur                 | sinnvoll    | 9  | 5 | 0 | 0         | 0 | 91% |
|                              | wichtig     | 10 | 3 | 0 | 1         | 0 | 89% |
|                              | schlüssig   | 11 | 2 | 1 | 0         | 0 | 93% |
| Gesamt                       | Frage       | ✓  | ✖ | 0 | Kommentar |   |     |
|                              | vollständig | 13 | 0 | 1 | -         |   |     |
|                              | Anm.        | -  |   |   |           |   |     |

| Mitarbeiter                  |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |   |   |           |   |     |
|------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|-----------|---|-----|
| Indikator                    | Frage       | ●                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | ◐ | ◑ | ◒         | ○ | Ø   |
| Interne Kollaboration        | sinnvoll    | 6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 4 | 4 | 0         | 0 | 79% |
|                              | wichtig     | 6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 6 | 2 | 0         | 0 | 82% |
|                              | schlüssig   | 8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 5 | 1 | 0         | 0 | 88% |
| Bereitschaft zur Veränderung | sinnvoll    | 7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 7 | 0 | 0         | 0 | 88% |
|                              | wichtig     | 9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 4 | 0 | 1         | 0 | 88% |
|                              | schlüssig   | 9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 4 | 1 | 0         | 0 | 89% |
| Kompetenzaufbau              | sinnvoll    | 8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 5 | 1 | 0         | 0 | 88% |
|                              | wichtig     | 9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 3 | 2 | 0         | 0 | 88% |
|                              | schlüssig   | 11                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 1 | 1 | 1         | 0 | 89% |
| Mitarbeiter                  | Frage       | ✓                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | * | 0 | Kommentar |   |     |
|                              | vollständig | 13                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0 | 1 | -         |   |     |
|                              | Anm.        | „Ob ein Unternehmen moderne <b>Werkzeuge zur internen Kollaboration</b> zw. Teams benutzt, ist mehr <b>von Unternehmensgröße und -komplexität abhängig</b> . Solche Werkzeuge sehe ich als wenig sinnvoll bei einem Unternehmen mit z.B 250 Mitarbeiter, wo auch viele von denen sich mit moderne IT-Tools nicht trauen. In diesen Fällen funktioniert die <b>tradionelle Team-Tafel</b> sehr gut.“ |   |   |           |   |     |

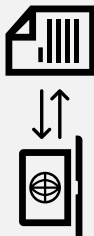
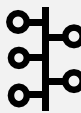
| Netzwerk, Geschäftsmodell   |             |                                                                                                                                                                                                        |   |   |           |   |     |
|-----------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|-----------|---|-----|
| Indikator                   | Frage       | ●                                                                                                                                                                                                      | ◐ | ◑ | ◒         | ○ | Ø   |
| Produktbezogene IT-Services | sinnvoll    | 5                                                                                                                                                                                                      | 6 | 2 | 1         | 0 | 77% |
|                             | wichtig     | 6                                                                                                                                                                                                      | 5 | 2 | 1         | 0 | 79% |
|                             | schlüssig   | 8                                                                                                                                                                                                      | 4 | 1 | 1         | 0 | 84% |
| Neue Geschäftsmodelle       | sinnvoll    | 7                                                                                                                                                                                                      | 5 | 2 | 0         | 0 | 84% |
|                             | wichtig     | 8                                                                                                                                                                                                      | 4 | 2 | 0         | 0 | 86% |
|                             | schlüssig   | 9                                                                                                                                                                                                      | 4 | 1 | 0         | 0 | 89% |
| Kolaboration im Netzwerk    | sinnvoll    | 7                                                                                                                                                                                                      | 4 | 2 | 1         | 0 | 80% |
|                             | wichtig     | 7                                                                                                                                                                                                      | 4 | 2 | 1         | 0 | 80% |
|                             | schlüssig   | 8                                                                                                                                                                                                      | 4 | 1 | 1         | 0 | 84% |
| Geschäftsmodell & Netzwerk  | Frage       | ✓                                                                                                                                                                                                      | ✖ | 0 | Kommentar |   |     |
|                             | vollständig | 12                                                                                                                                                                                                     | 0 | 1 | -         |   |     |
|                             | Anm.        | „Hier auch, <b>abhängig vom Unternehmen</b> und was da hergestellt wird, sind die Items mehr oder weniger sinnvoll/ wichtig. Eine einheitliche Zu- oder Absage konnte ich für die Items nicht treffen“ |   |   |           |   |     |

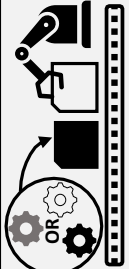
## Abschließende Bemerkungen

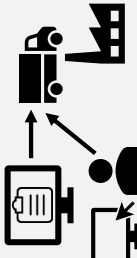
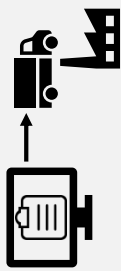
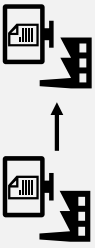
|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Abschließende Bemerkungen | <p>„Generell finde ich die <b>Sprünge zwischen den Ausprägungen</b> manchmal sehr klein und manchmal wirklich groß. Einige Ausprägungen können in der digitalen Transformation übersprungen werden und andere sind wiederum ohne einen vorherigen Schritt nur schwer erreichbar. Bsp. <b>Nutzung von Big Data</b> kann nur erfolgen, wenn ich auch <b>zuvor über Jahre Daten gesammelt</b> habe. Dies ging für mich nicht so weit hervor. Es kann aber sein, dass meine Eindrücke so entstanden sind, weil Erklärungen und Hintergrundinformationen zum Reifegradmodell nicht besprochen wurden.“</p> <p>„Grundsätzlich sollte überlegt werden <b>Anteile statt items</b> zu nehmen, da es <b>in einem Unternehmen verschiedene Reifegrade für intern vs. extern Produkte/Dienstleistungen</b> und auch innerhalb des Unternehmens geben kann“</p> |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

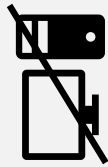
## L Das KMU-spezifische Industrie 4.0-Reifegradmodell 2.0

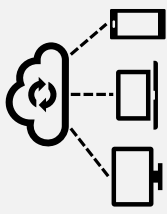
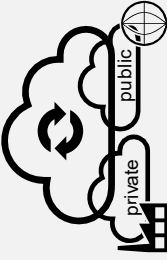
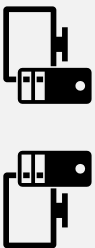
| Produkte                                               |                                                                                       |                                                 |                                                                                       |                                                        |                                                                                      |                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Industrie 4.0                                          |                                                                                       |                                                 |                                                                                       |                                                        |                                                                                      |                                                                                                                    |
| Integration von Sensoren/Aktoren                       |    | Keine Nutzung von Sensoren/Aktoren              |    | Sensoren/Aktoren sind eingebunden                      |    | Sensordaten werden vom Produkt verarbeitet                                                                         |
|                                                        |    | Produkt besitzt keine Schnittstellen zur Umwelt |    | Produkt sendet/empfängt 1/0-Signale                    |    | Produkt verfügt über protokollierte Schnittstellen, ist aber noch nicht internetfähig (z.B. Feldbus-Schnittstelle) |
|                                                        |  | Keine Funktionalitäten                          |  | Möglichkeit zur Eindeutigen Identifikation (RFID, ..)  |  | Möglichkeit zum autonomen Datenaustausch                                                                           |
| Kommunikation / Connectivity                           |                                                                                       |                                                 |      | Produkt hat (drahtlosen) Zugang zum Internet of Things |     | Produkt reagiert anhand der Daten eigenständig                                                                     |
| Funktionalität zur Datenspeicherung (Tracing/Tracking) |                                                                                       |                                                 |    | Datenaustausch ist integraler Produktbestandteil       |   | Datenaustausch ist integraler Produktbestandteil                                                                   |

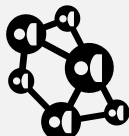
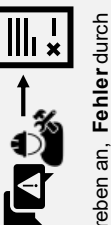
| Produktion                                   |                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IKT-Infrastruktur in der Produktion          | <br>Manueller Informations-<br>austausch per E-Mail, Tele-<br>kommunikation, Papier | <br><b>Zentrale Datenserver</b> in der<br>Produktion              | <br><b>Internetbasierte Portale</b> mit<br>gemeinsamer Datennutzung | <br><b>Automatisierter</b><br>Informationsaustausch (z.B.<br>Auftragsnachverfolgung) | <br>Vollständige <b>Integration</b> von<br><b>Kunden/Zulieferern</b> in das<br>Kommunikationsnetzwerk |
|                                              | Mensch-Maschine-<br>Schnittstelle                                                                                                                                      | <br>Kein Informationsaustausch<br>zwischen Mensch und<br>Maschine | <br><b>Einsatz lokaler Anzeigergeräte</b>                          | <br><b>Zentrale / Dezentrale</b><br>Produktionsüberwachung / -<br>steuerung         | <br><b>Anzeigergeräte</b> (Smartphone,<br>Tablet)                                                     |
| Maschine-zu-Maschine-<br>Kommunikation (M2M) |                                                                                                                                                                        | <br><b>Keine Kommunikation</b>                                  | <br><b>Mittels Feldbus-Schnittstellen</b>                        | <br><b>Ethernet-</b><br>Schnittstellen                                            | <br>Maschine hat Zugang zum<br><b>Internet</b>                                                      |

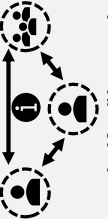
| Produktion                                           |                                                                                      |                                                                                                                            |                                                                                      |                                                                                                                            |                                                                                                                                                            |                                                                                                                      |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Flexible & Wandlungsfähige Produktion                |   | <b>Starre</b> Produktionsmittel, <b>große</b> Losgrößen und <b>lange</b> Rüstzeiten                                        |   | <b>Flexible</b> Produktionsmittel (Variantenvielfalt), zunehmend <b>kleinere</b> Losgrößen und <b>verkürzte</b> Rüstzeiten |                                                                          | <b>Flexible</b> Produktionsmittel und <b>modularer</b> Produktaufbau<br>→ Zunehmende Effizienz bei kleinen Losgrößen |
|                                                      |   | <b>Kein Monitoring</b> und traditionelle, <b>reaktive</b> Wartung/Instandhaltung                                           |   | <b>manuelle</b> Qualitätsüberwachung durch MA und <b>präventive</b> Wartung/Instandhaltung                                 |                                                                          | Betriebsdatenerfassung und <b>rechnergestützte QS</b> (z.B. CAQ, QFD, FMEA, SPC) und <b>Condition Monitoring</b>     |
| Monitoring, QM & Maintenance                         |  | <b>2D-CAD:</b> Digitale Zeichnungen mittels 2D-CAD, CIM, CAM                                                               |  |                                                                                                                            | <b>3D-CAD:</b> Digitales Abbild einzelner Bauteile/Produkte mittels 3D-CAD, PPS, CAE, Objekt-Modellierung, CAP                                             |                                                                                                                      |
|                                                      |                                                                                      |                                                                                                                            |   |                                                                                                                            | <b>Digital Mock-Up:</b> Digitales Abbild von Produkten und Anlagen mittels <b>Simulation</b> , PDM, Prozess-Modellierung                                   |                                                                                                                      |
| Werkzeuge & Methoden der Digitalen Fabrik (-planung) |    | <b>Digitale Fabrik:</b> Existenz eines <b>Digitalen Schattens</b> , Nutzung von Simulation und Visualisierung mittels ARVR |    |                                                                                                                            | <b>Virtuelle Fabrik:</b> Prozess-, Logistik-, Simulationsmodelle mittels <b>Digitalem Zwilling</b> , Verknüpfung von Produkt -entstehung und Kundenauftrag |                                                                                                                      |
|                                                      |                                                                                      |                                                                                                                            |     |                                                                                                                            | <b>Automatische</b> Identifikation von Qualitätsmängeln und <b>Predictive Maintenance</b> (Nutzung von Big Data)                                           |                                                                                                                      |
|                                                      |     | <b>Predictive Maintenance</b> und selbstständige <b>Umsetzung</b> der Maßnahmen (auch zur Qualitätssteuerung)              |     |                                                                                                                            | <b>Bauteilgetriebene, wandlungsfähige Produktion</b> im Unternehmen (kleine Lose), plug-and-produce -Fähigkeit                                             |                                                                                                                      |
|                                                      |                                                                                      |                                                                                                                            |     |                                                                                                                            | <b>Bauteilgetriebene, wandlungsfähige Produktion</b> der <b>Losgröße 1</b> in <b>Wertschöpfungsnetzen</b>                                                  |                                                                                                                      |

| (Ablauf-)Organisation                |                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Beschaffungsprozess                  |  <p><b>MA ermittelt und bestellt</b><br/>Bedarf <b>manuell</b></p>                                                                                      |  <p>Bedarfsermittlung durch <b>ERP-System</b> und Bestellung</p>                                                                         |  <p><b>ausgewählte Bedarfe</b> werden <b>automatisch</b> über das <b>ERP-System</b> ohne Eingriff bestellt</p>                                      |  <p><b>Großteil der Bedarfe</b> wird über das <b>ERP-System automatisch</b> beschafft</p>                                                                                 |  <p>Zusätzlich sind ausgewählte Lieferanten über <b>Konsignation</b>, <b>Kanban</b> oder <b>Entnahmeautomaten</b> angebunden</p>                                           |
| Abwicklung Kundenauftrag             |  <p><b>Aufträge</b> gehen im Wesentlichen per <b>Papier</b> oder <b>E-Mail</b> ein</p>                                                                  |  <p>mit vernetzten <b>Kunden</b> besteht eine ERP-seitige <b>Datenvernetzung</b> zum Austausch von Aufträgen und Auftragsbestätigung</p> |  <p><b>Kunden</b> erfassen ihren Auftrag per <b>e-Commerce</b> selbstständig</p>                                                                    |  <p><b>Kunden konfigurieren</b> ihr Produkt selbstständig</p>                                                                                                             |  <p><b>Kunden</b> können sich <b>online</b> den <b>Status/Fortschritt</b> ihrer Bestellung ansehen</p>                                                                     |
| Interne Abwicklung Fertigungsauftrag |  <p><b>Kundenaufträge</b> müssen <b>manuell erfasst</b> und in das ERP-System eingegeben werden; Fertigungsaufträge <b>ohne IT-System</b> erstellt</p> |  <p><b>Fertigungsaufträge</b> werden im <b>ERP-System erstellt</b> und in Papierform in die Fertigung gegeben</p>                       |  <p><b>Fertigungsaufträge</b> werden vom <b>ERP-System</b> an <b>MES-System</b> übergeben; in Papierform gelangen sie von dort an die Maschine</p> |  <p><b>Fertigungsaufträge</b> werden vom <b>ERP-System</b> an <b>MES-System</b> übergeben; Fertigungsaufträge (Datensätze) gelangen an ein Terminal in der Fertigung</p> |  <p><b>Kundenaufträge</b> werden <b>ohne Medienbruch</b> und manuelle Nacharbeit als Fertigungsaufträge <b>bis in die Fertigung</b> elektronisch <b>durchgereicht</b></p> |

| IT & Daten                                                     |                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IT-Systeme                                                     | <br><b>Kein ERP-System</b>                                                                            | <br><b>ERP-System</b> und Organisation<br>in <b>klassischer</b><br><b>Automatisierungspyramide</b> | <br><b>Erweiterung des ERP</b> um<br>Produktionsmanagement -<br>systeme/Methoden (CIM, BDE,<br>MES) und <b>Automatisierungs-</b><br><b>pyramide mit Schnittstellen</b> | <br><b>Vollumfängliche IT-</b><br><b>Systemlandschaft</b> (ERP, CIM,<br>BDE, MES) und horizontale<br><b>Vernetzung</b> der Ebenen                               | <br><b>Vollumfängliche IT-System-</b><br><b>landschaft</b> eingegliedert in eine<br>„ <b>Single Source of Truth</b> “ und<br>horizontale und vertikale<br><b>Vernetzung</b> der Ebenen |
| Vernetzung der<br>Produktion mit anderen<br>Bereichen          | <br><b>Keine Vernetzung</b> der<br>Produktion mit anderen<br>Unternehmensbereichen                    | <br>Informationsaustausch über<br><b>Mail / Telekommunikation</b>                                  | <br><b>Datenaustausch</b> wird<br><b>systemisch</b> unterstützt und<br>folgt <b>einheitliche</b><br><b>Datenformaten</b> und <b>Regeln</b>                             | <br>Datenaustausch abteilungs -<br>übergreifend <b>systemisch</b> unter-<br>stützt ( <b>einheitliche Datei-</b><br><b>formate</b> und <b>vernetzte Server</b> ) | <br>Abteilungsübergreifende,<br><b>vollständig vernetzte IT-</b><br>Lösungen                                                                                                           |
| Datenerhebung,<br>-nutzung, -verarbeitung<br>in der Produktion | <br>Produktionsdaten werden <b>nicht</b><br>weiter <b>verarbeitet/genutzt</b><br>(aber ggf. erhoben) | <br>Daten werden erhoben und<br><b>standardisiert gespeichert</b><br>(zu Dokumentationszwecken)   | <br><b>Manuelle, Sporadische</b><br>Datenanalyse zur<br>Prozessüberwachung<br>(in Projektteams /Taskforce)                                                            | <br><b>Manuelle, aber durchgängige,</b><br><b>systematische</b> Datenanalyse<br>als integraler Bestandteil der<br>Prozessplanung/ -steuerung                   | <br><b>Automatische</b><br>Prozessplanung/-steuerung<br>mittels <b>Big Data Analysen</b><br>(erforderliche historische<br>Datensätze sind vorhanden)                                  |

| IT & Daten                        |                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Datenspeicherung</b>           | <br><b>Keine</b> zentralen Datenserver oder Cloud-Lösung                                                     | <br>Nutzung eigener Server mit <b>on-premise-Software</b>                                                                          | <br><b>Private Cloud</b>                                                                                                                                   | <br><b>Hybrid Cloud</b>                                                                                                        | <br><b>Public Cloud</b>                                                                                                                                            |
| <b>Stammdaten-<br/>management</b> | <br>Stammdaten werden <b>manuell</b> <b>einzel</b> in jedes System eingepflegt und <b>nicht aktualisiert</b> | <br>Systeme können <b>teilweise</b> auf Stammdaten anderer System zugreifen und <b>Aktualisierung</b> nur <b>nach Aufforderung</b> | <br>Systeme können <b>überwiegend</b> auf Stammdaten anderer System zugreifen; <b>sporadische Aktualisierung</b> (bei Ereignis)                            | <br>Systeme haben <b>vollständigen</b> gegenseitigen Zugriff; in einigen Bereichen <b>algorithmusbasierte Aktualisierung</b>   | <br><b>führendes Stammdatensystem</b> ; im gesamten Unternehmen <b>algorithmusbasierte Aktualisierung</b>                                                          |
| <b>IT-Sicherheit</b>              | <br>Keine explizite Auseinandersetzung mit der Thematik (kein Bewusstsein)                                   | <br><b>Verantwortlicher Mitarbeiter</b> und einzelne, <b>grundlegende Maßnahmen</b> (z.B. Firewall, Antiviren-Software, IPS, VPN)  | <br>Sicherheitsbeauftragter + <b>Sicherheitsrichtlinie</b> ; Zugriffs-kontrollsystem und <b>komplexere Einzelmaßnahmen</b> (Cloud-Sicherheitsservice, SPN) | <br><b>Notfallplan</b> im Angriffsfall, sensibilisierte MA und <b>Integration</b> der einzelnen Maßnahmen zu einem <b>ISMS</b> | <br><b>Zertifiziertes ISMS</b> (z.B. ISIS12); „ <b>Sicherheitsausweis</b> “ für jedes Produkt/Maschine/Prozess; <b>unternehmensübergreifender</b> Wissensaustausch |
| <b>Datensicherheit</b>            | <br><b>Keine</b> Lösung                                                                                    | <br><b>Redundante</b> Datenhaltung in Form eines <b>Spiegelsystems</b> (ausfallanfälliger Speicherort)                           | <br><b>Redundante</b> Datenhaltung in Form von <b>Backups/Recovery</b> (weniger ausfallanfälliger Speicherort, z.B. private Cloud)                       | <br>Erweiterung der Backups/Recovery mit <b>Snapshots</b> (ausfallsichere Speicherung auf dezentralen Cloud-Servern)         | <br>Cloud-basierte <b>Transaktionsreplikation</b>                                                                                                                |

| Management, Führung & Kultur         |                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Industrie 4.0 Vision                 | <br>Digitale (Geschäftsmodell -) Transformation ist <b>kein strategischer Fokus</b>                                                               | <br>Management erkennt <b>Bedeutung und Potenziale</b> der Digitalen Transformation                                                                   | <br>Management hat <b>klare Zielvorstellungen</b> (langfristig) und stellt <b>Ressourcen</b> bereit                                                                   | <br>konkrete <b>Roadmap</b> und erste Transformationsprojekte in der <b>Umsetzung</b>                                                                  | <br>Transformationsprojekte haben hohe <b>Priorität</b> und die Strategie wird konstant hinsichtlich Markttinnovationen <b>überprüft</b>                           |
| Führungsstil & Managementkompetenzen | <br>Management ist <b>nicht vertraut</b> mit modernen Technologien und Konzepten und strenges <b>Hierarchiedenken</b>                             | <br>Management ist <b>teilweise vertraut</b> mit modernen Konzepten und <b>zunehmend</b> bereit, Entscheidungs-kompetenzen <b>abzugeben</b>           | <br>Management ist <b>vollständig vertraut</b> mit modernen Konzepten und MA haben <b>erste</b> Gestaltungs- und Entscheidungskompetenzen                             | <br>Management kann besagte Konzepte (ggf. mit Hilfe externer Experten) <b>anwenden</b> und MA haben <b>weitreichende</b> Kompetenzen                  | <br>Management kann besagte Konzepte anwenden; ist ständig informiert über Innovationen u. <b>Entscheidungen</b> werden stets am <b>sinnvollsten Ort</b> getroffen |
| Interne Unternehmenskommunikation    | <br><b>Keine definierten Kommunikationskanäle</b> oder überwiegend <b>papierbasierter</b> Wissensaustausch (Schwarzes Brett, Zeitschrift, Briefe) | <br>Zusätzlich <b>internetbasierte Kommunikation</b> (Intranet, Internes Wiki, Newsletter), aber beschränkte Nutzung/ Akzeptanz durch MA              | <br><b>Def. Kommunikationskanäle: internetbasierte Plattformen</b> (Intranet, Internes Wiki, digitaler Newsletter) und <b>Dialogformate</b> (Roadshows, Erklärvideos) | <br>Etablierung des <b>Social Intranets</b> und Beschäftigte haben <b>verzögerungsfreien</b> Zugang zu erforderlichem explizitem und implizitem Wissen |                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Unternehmens- und Fehlerkultur       | <br>Fehler führen zu Schuldzuweisungen und kein interner Austausch                                                                              | <br>Fehler als <b>Basis zur Verbesserung</b> ; werden aber nicht systematisch erfasst/ nachverfolgt u. eher in <b>Einzelgesprächen</b> angesprochen | <br>MA streben an, <b>Fehler</b> durch Einhaltung der QM-Vorgaben zu <b>vermeiden</b> ; einheitliche <b>Dokumentation</b> und bereichsinterner <b>Austausch</b>     | <br>offene Fehler -Kommunikation; konstruktive Aufarbeitung (keinerlei Schuldzuweisungen) und <b>Dokumentation von Maßnahmen</b>                     | <br>MA sehen <b>Fehler als Schätze</b> an; Fehler werden <b>ausnahmslos analysiert</b> und mitsamt Maßnahmen <b>öffentlich ausgestellt</b>                       |

| Mitarbeiter/-innen (MA)                        |                                                                                      |                                                                                                                                                              |                                                                                      |                                                                                                                                                                           |                                                                                      |                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Interne Kollaboration                          |   | Gruppenarbeit findet selten/gar nicht statt und wenn doch arbeiten die Teams in „Silos“                                                                      |   | <b>Formale Kanäle zum Informationsaustausch</b> zw. Teams (z.B. mittels Team-Tafel); <b>Zuordnungen</b> („Assignments“) der MA <b>wechseln nicht</b>                      |    | <b>Informationsaustausch</b> zw. Teams; zunehmend <b>bedarfsgerechte Zusammenarbeit</b> und <b>Vernetzung</b> von Experten (digital oder mittels Team -Tafel) |
|                                                |     | Agiles Unternehmen: „ <b>Flexible Communities</b> “ und IT- basierte <b>Kollaborationsplattformen</b> ; Risiko, Verantwortung und Honorierung werden geteilt |     | Communities werden <b>vorausschauend gebildet</b> und durch neue Technologien (z.B. AR-Lösungen zur Einweisung von MA) <b>unterstützt</b>                                 |   | <b>MA verstehen Entscheidung</b> des Systems und Nutzen der Handlungsempfehlung; <b>hinterfragen</b> das System aber <b>stets kritisch zur Optimierung</b>    |
| Bereitschaft zur Veränderung                   |   | <b>Keine Akzeptanz</b> gegenüber neuen Technologien und keine Bereitschaft für Veränderungen im Arbeitsablauf                                                |   | <b>Vollständige Offenheit</b> gegenüber Innovationen und <b>Anerkennung des Nutzens</b> neuer Technologien/Ansätze                                                        |                                                                                      |                                                                                                                                                               |
|                                                |    | <b>MA von Beginn an in Veränderungsprozesse involviert</b> ; gestalten Digitale Transformation aktiv positiv mit                                             |     | Qualifikation/Schulung ist <b>fester Bestandteil</b> der Strategie und der MA-Laufbahn (lebenslanges Lernen); <b>interdisziplinäre MA</b> ; Helfer erhalten Verantwortung |  | <b>MA erkennen Weiterbildungsbedarfe</b> und <b>leiten</b> gemeinsam mit Management/HR neue <b>Angebote ab; multiversatile MA</b> (auch auf Helfer-Ebene)     |
| Kompetenzaufbau & Qualifikations- verschiebung |  | <b>Kein Schulungsangebot</b> und <b>traditionelle Spezialisierung</b> (in Helfer, Fachkräfte, Spezialisten, Experten)                                        |  | <b>Strukturiertes Qualifikations- und Schulungsangebot</b> : kontinuierliches Erlernen/Verbessern von Fähigkeiten/Fertigkeiten & Spezialisten werden Experten             |                                                                                      |                                                                                                                                                               |
|                                                |   | sehr begrenztes, <b>formales Konzept zur MA-Qualifikation</b> (beschränkt auf Aneignen von Fähigkeiten) und Fachkräfte werden Spezialisten                   |    | <b>Strukturiertes Qualifikations- und Schulungsangebot</b> : kontinuierliches Erlernen/Verbessern von Fähigkeiten/Fertigkeiten & Spezialisten werden Experten             |                                                                                      |                                                                                                                                                               |

| Geschäftsmodell & Netzwerk                |  |                                                                                                                                         |  |                                                                                                                                   |  |                                                                                                                        |
|-------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Produktbezogene IT-Services (After Sales) |  | Keine Services (nur physisches Produkt)                                                                                                 |  | Services über Online Portal                                                                                                       |  | Service-Ausführung <b>direkt über das Produkt</b>                                                                      |
|                                           |  | Selbstständiges Ausführen von Services                                                                                                  |  | Gewinn allein durch Verkauf der <b>Standard-Produkte</b>                                                                          |  | Zusätzlicher Verkauf <b>produktbezogener Dienstleistungen</b>                                                          |
| Neue Geschäftsmodelle um das Produkt      |  | Gewinn allein durch Verkauf der <b>Standard-Produkte</b>                                                                                |  | Verkauf und <b>Beratung</b> zum Produkt                                                                                           |  | Verkauf, Beratung und <b>Anpassung</b> des Produktes an Kundenwünsche                                                  |
|                                           |  | Verkauf von <b>Produktfunktionen</b>                                                                                                    |  | Verfolgen <b>gemeinsamer Ziele</b> ; Probleme werden <b>reaktiv</b> und <b>isoliert</b> gelöst; kein Austausch von Best Practices |  | Verfolgen <b>gemeinsamer Ziele</b> und <b>gemeinsame</b> , gegenseitige proaktive, kontinuierliche <b>Verbesserung</b> |
| Kollaboration im Wertschöpfungsnetzwerk   |  | Partner verfolgen <b>eigene Ziele</b> ; Probleme werden <b>reaktiv</b> und <b>isoliert</b> gelöst und kein Austausch von Best Practices |  | Verfolgen <b>gemeinsamer Ziele</b> ; Probleme werden <b>reaktiv</b> und <b>isoliert</b> gelöst; kein Austausch von Best Practices |  | Verfolgen <b>gemeinsamer Ziele</b> und <b>vollständige System-kompatibilität</b> ; Austausch von <b>Best Practices</b> |