

Technische Universität Dortmund

Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen

Fachgebiet IT in Produktion und Logistik (itpl)

Masterarbeit

Aufbau eines Referenzmodells zur reifegradbasierten Ermittlung des Digitalisierungsgrades der Produktion eines Unternehmens im Maschinen- und Anlagenbau



Betreuer: Prof. Dr. -Ing. Markus Rabe
Henrik Körsgen, M. Sc.

Verfasser: Henning Loh
Matr. Nr: 182026

Ausgegeben am: 23.01.2018
Eingereicht am: 23.05.2018

Inhaltsverzeichnis

Aufbau eines Referenzmodells zur reifegradbasierten Ermittlung des Digitalisierungsgrades der Produktion eines Unternehmens im Maschinen- und Anlagenbau

1	Einleitung.....	1
2	Annäherung an das Themenfeld Industrie 4.0	3
2.1	Grundlagen von Industrie 4.0	3
2.2	Grundlegende Industrie-4.0-Konzepte	15
2.3	Industrie 4.0 im Maschinen- und Anlagenbau.....	23
3	Etablierte Industrie-4.0-Entwicklungsmodelle.....	26
3.1	Reifegradmodelle	26
3.2	Industrie 4.0 Maturity Index	27
3.3	Werkzeugkasten Industrie 4.0.....	32
3.4	Industrie-4.0-Readiness-Studie	35
3.5	Vergleich der vorgestellten Reifegradmodelle	38
3.6	Ordnungsrahmen Produktion und Management	41
4	Entwicklung eines kombinierten Reifegradmodells.....	44
4.1	Einordnung in den Ordnungsrahmen Produktion und Management	44
4.2	Vorgehensweise zur Auslegung des Reifegradmodells.....	46
4.3	Ziele des Reifegradmodells Industrie 4.0.....	47
4.4	Reifegradstufen	48
4.5	Reifegradindikatoren.....	50
4.6	Gewichtung der Reifegraddimensionen.....	53
4.7	Reifegrad-Kennwert-Matrix	55
4.8	Maßnahmen zur Verbesserung der Reife.....	60

5	Evaluation an einem Praxisbeispiel	67
5.1	Vorstellung des Beispielunternehmens	67
5.2	Untersuchungsobjekt: Etikettiermaschinen.....	68
5.3	Industrie 4.0 im Beispielunternehmen	71
5.4	Anwendung des entwickelten Reifegradmodells.....	72
5.5	Bewertung der Ergebnisse.....	76
5.6	Industrie-4.0-Maßnahmen	78
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	82
7	Literaturverzeichnis	III
	Abbildungsverzeichnis	XI
	Tabellenverzeichnis	XII
	Abkürzungsverzeichnis	XIII
	Anhang	XIV
	Eidesstattliche Versicherung.....	XXIII

1 Einleitung

Der Maschinen- und Anlagenbau nimmt in der deutschen Industrie eine Schlüsselrolle ein. Als Zulieferer, Ausrüster und Dienstleister für alle anderen industriellen Bereiche bildet er das Fundament des Erfolgs der deutschen Wirtschaft [PFEIFFER, S., et al. 2016]. Die Spezialisierung auf die Erforschung und Entwicklung innovativer Produktionstechnologien ist ein entscheidender Faktor für die Konkurrenzfähigkeit des Industriestandortes Deutschland [KAGERMANN, H., et al. 2013]. Diese Wettbewerbsfähigkeit muss jedoch immer wieder neu unter Beweis gestellt werden. Mit zunehmender Globalisierung steigt die Anzahl der Wettbewerber und damit auch der Druck auf deutsche Unternehmen. Es wird immer entscheidender, Kundenwünsche und kurzfristige Anpassungen flexibel umsetzen zu können, was zu einer höheren Variantenvielfalt und immer kleiner werdenden Produktionslosen führt. Ein häufig diskutierter Extremfall dieser Entwicklung ist die individualisierte Produktion mit *Losgröße 1* [KAGERMANN, H., et al. 2013; SCHLICK, J. et al. 2014]. Um den Anforderungen individueller Produktion gerecht zu werden, müssen die Menge der gesammelten Daten und die Vernetzung selbiger verbessert werden. Um dies zu erreichen, ist ein engeres Zusammenwirken von Produktionssystemen und IT-Anwendungen erforderlich [VOGEL-HEUSER, B., et al. 2012]. Die Vernetzung bestehender Produktionsanlagen und der Einsatz eingebetteter Systeme sind dabei maßgebliche Innovationstreiber für die deutsche Industrie [acatech 2011].

Die Auswertung von Produktionsdaten, Vernetzung der Produktion, Fertigung mit Kleinstlosgrößen und andere innovative Ansätze werden unter dem Schlagwort Industrie 4.0 zusammengefasst. Um den Anforderungen eines globalisierten Wettbewerbs gerecht zu werden, müssen die Digitalisierungspotenziale von Industrie 4.0 genutzt werden. Dazu bedarf es einer praktischen Implementierung von Technologien, wie Cyber-physischer Systeme, dem Internet der Dinge und Dienste, Cloud-Computing, Virtual und Augmented Reality sowie der Sammlung und Auswertung großer Datenmengen durch Big Data [KAGERMANN, H. 2017; SCHUH, G., et al. 2017; acatech 2016]. Die aktuelle Situation in der deutschen Industrie entspricht diesem Ideal noch nicht – eine flexible, variable und anpassbare Produktion ist in den wenigsten Fällen realisiert [SCHUH, G., et al. 2017].

In der Forschung zu Industrie 4.0 gibt es nur wenige Lösungsansätze, die speziell auf den Maschinen- und Anlagenbau ausgerichtet sind. Bestehende Modelle sind meist allgemein

gehalten, um ein möglichst weites Spektrum an Industriezweigen abdecken zu können. Das Ziel dieser Arbeit ist deshalb die Entwicklung eines Referenzmodells zur Bestimmung des Industrie 4.0 Reifegrades in der Produktion von Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus. Das Modell soll Unternehmen einen fundierten Überblick darüber verschaffen, inwieweit Industrie 4.0 bereits in ihrer Produktion umgesetzt ist und welche Entwicklungsmöglichkeiten sich bieten. In der Produktion eines deutschen Sondermaschinenherstellers soll die Anwendbarkeit in der Praxis geprüft werden. Diese Ziele wurden in den folgenden beiden Fragen konkretisiert:

F1) Wie muss ein Reifegradmodell zur Bewertung des Umsetzungsstandes von Industrie 4.0 in der Produktion von Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus aufgebaut sein?

F2) Welche Maßnahmen führen zu einer Verbesserung der Industrie 4.0 Umsetzung in der Produktion von Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus?

Zur Beantwortung dieser Fragen ist es notwendig, das Themenfeld Industrie 4.0 vollständig zu betrachten. Dazu werden in Kapitel 2 relevante Begrifflichkeiten, Definitionen und grundlegende Konzepte vorgestellt. Um sich darauf aufbauend den Zielfragen weiter zu nähern, werden in Kapitel 3 eine Reihe etablierter Industrie-4.0-Reifegradmodelle vorgestellt und miteinander verglichen. Das Ergebnis dieser Auseinandersetzung ist die Konzeption des zentralen Reifegradmodells dieser Arbeit in Kapitel 4. Die theoretische Konzeption wird in Kapitel 5 durch die Anwendung in der Praxis ergänzt. Abschließend werden die gewonnenen Ergebnisse in Kapitel 6 zusammengefasst und bewertet, um abschließende Aussagen über das entwickelte Modell treffen zu können.

2 Annäherung an das Themenfeld Industrie 4.0

Industrie 4.0 ist mehr als ein von der Bundesregierung aufgestellter Plan zur Veränderung der Industrielandschaft. Das Themenfeld ist äußerst facettenreich und kann aus verschiedenen Richtungen betrachtet werden. Deshalb unterteilt dieses Kapitel Industrie 4.0 in die für die Produktion wichtigsten Begrifflichkeiten und Konzepte. Die gewählten Begriffe wurden ausgewählt, um Industrie 4.0, mit Fokus auf die Produktion, vollständig abzubilden und die in Kapitel 1 definierten Ziele zu erreichen.

2.1 Grundlagen von Industrie 4.0

Der Begriff *Industrie 4.0* geht auf die „Forschungsunion **Wirtschaft und Wissenschaft**“ und die neue Hightech Strategie der deutschen Bundesregierung zurück [Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2014, 16 ff.]. Der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) initiierte Arbeitskreis Industrie 4.0 präsentierte seine Umsetzungsempfehlungen auf der Hannover Messe im April 2013 der Bundesregierung. Der Zusatz *4.0* soll auf die vierte industrielle Revolution verweisen und damit die Bedeutung der bevorstehenden technischen Veränderungen aufzeigen. Im Abschlussbericht des Arbeitskreises werden die fortschreitende Digitalisierung sowie die flächendeckende Vernetzung von Objekten und Menschen mit dem Internet, mit einer neuen technologischen Revolution gleichgesetzt [KAGERMANN, H., et al. 2013, S. 17]. BRÖDNER [2015, S. 238] kritisiert, dass die Benennung „vierte industrielle Revolution“ einen Entwicklungssprung suggeriert, welcher bei genauerer Analyse nicht vorläge – die erklärten Ziele von Industrie 4.0 seien hingegen die gleichen, die schon in den 1980er Jahren durch computerintegrierte wissensbasierte Produktion (CIM) erreicht werden sollten. BILDSTEIN et al. [2014, S. 581] führen allerdings an, dass sich hinter dem Begriff Industrie 4.0 sowohl neue, aber auch bereits bekannte und etablierte Technologien verbergen.

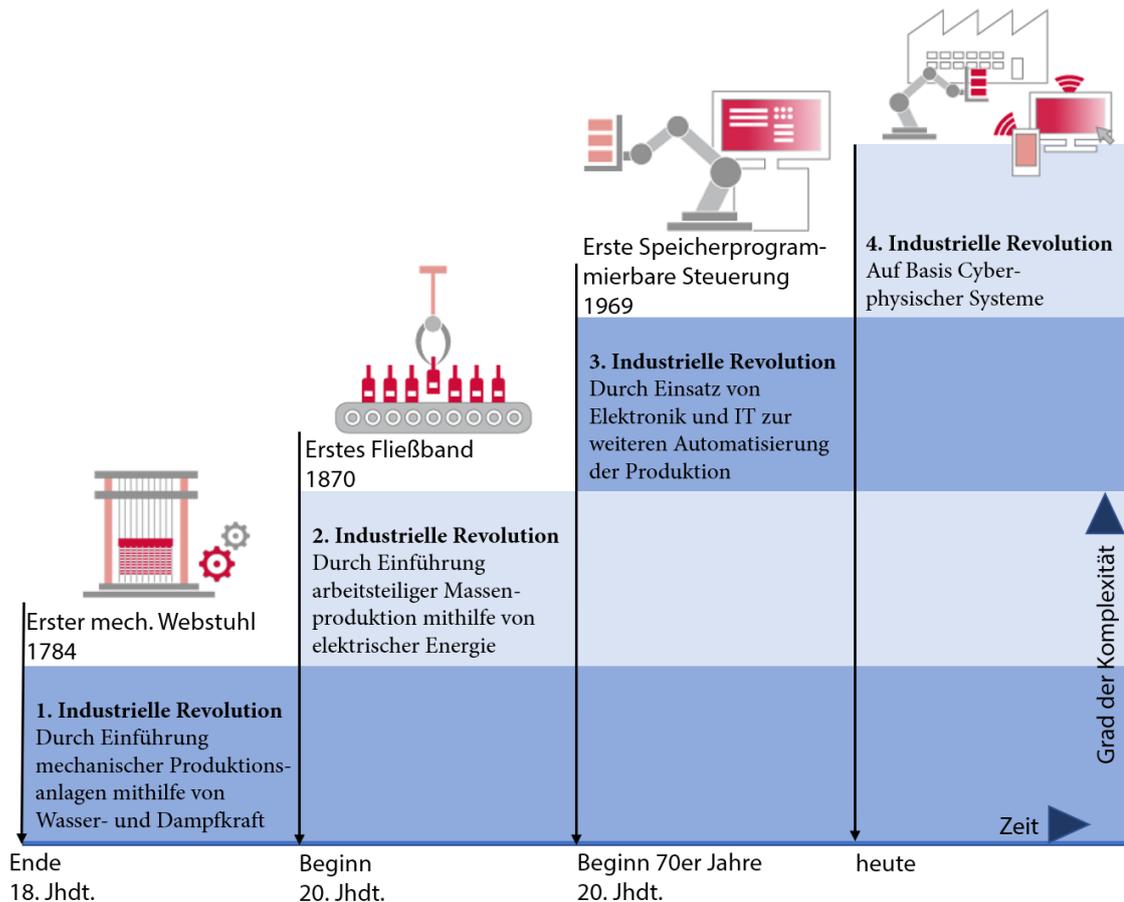


Abbildung 2-1: Die 4 Stufen industrieller Revolution [i. A. a. Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) 2012, S. 13]

Die Geschichte der industriellen Revolutionen begann Ende des 18. Jahrhunderts mit der Einführung von Produktionsanlagen wie dem mechanischen Webstuhl, welche sich Wasser- und Dampfkraft zu Nutze machten. Dieser 1. industriellen Revolution folgte, mit Beginn des 20. Jahrhunderts und der Einführung der Massenproduktion unter Zuhilfenahme elektrische Energie, die 2. industrielle Revolution. Mit der Entwicklung der ersten speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) Anfang der 70er Jahre des 20. Jahrhunderts wurde der Weg zur Nutzung von IT zur Automatisierung der Produktion geebnet. Die 3. Industrielle Revolution hält bis heute an und soll, wenn es nach den Plänen der deutschen Bundesregierung geht, durch die 4. Industrielle Revolution abgelöst werden [KAGERMANN, H., et al. 2013, 17 ff.].

Industrie 4.0

Einigkeit darüber, was *Industrie 4.0* genau bedeutet und wie der Begriff definiert ist, herrscht in der Literatur kaum. Die nachfolgenden Definitionen weisen allerdings einige Gemeinsamkeiten auf.

Die Industrieverbände *Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.* (VDMA), *Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.* (BITKOM) und der *Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.* (ZVEI) definieren Industrie 4.0 als eine „[...] **neue Stufe der Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten.**“ [VDMA, et al. 2015, S. 8]. Die Basis bilden sowohl die Verfügbarkeit von Informationen in Echtzeit, als auch die Möglichkeit der Datenauswertung zu jedem Zeitpunkt in der Wertschöpfungskette. Die genannten Verbände haben sich in der Initiative *Plattform Industrie 4.0* zusammengeschlossen, um ihre Vision von Industrie 4.0 in Richtung der Wirtschaft voranzutreiben. [VDMA, et al. 2015, 8 ff.].

Die *Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.* (acatech) beschreibt Industrie 4.0 als einen „[...] **ökonomischen Paradigmenwechsel, der [...] Chancen zur Effizienzsteigerung in den Prozessen [...] mit sich bringt.**“ [acatech 2016, S. 9]. Dabei steht die Vernetzung von Produkten und Prozessen in Echtzeit sowie eine Verknüpfung aller, am Wertschöpfungsprozess beteiligten, Teile über das Internet im Fokus. [acatech 2016, 9 ff.].

Das BMBF gibt als Definition an, dass Industrie 4.0 darauf abzielt, die deutsche Industrie in die Lage zu versetzen, für die Zukunft gerüstet zu sein. Kennzeichnend sei eine immer stärker werdende Individualisierung von Produkten bei gleichzeitig hoch flexibler Produktion. Die nahezu echtzeitgenaue Steuerung und Optimierung von Wertschöpfungsnetzwerken steht im Mittelpunkt. Die Produktion wird mit anderen Dienstleistungen vernetzt. [Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2017a].

Es wird deutlich, dass die ganzheitliche Vernetzung von Anlagen und Prozessen in den Definitionen von Industrie 4.0 eine entscheidende Rolle spielt. Netzwerke bieten die Möglichkeit zur echtzeitgenauen Überwachung und Analyse des Produktionsprozesses. Die gesamte Wertschöpfungskette kann von den Potenzialen aus Industrie 4.0

profitieren. Diesem Leitgedanken folgend steht Industrie 4.0 für die „[...] **intelligente Vernetzung von Produktentwicklung, Produktion, Logistik und Kunden.**“ [Fraunhofer-Gesellschaft 2017].

Der Begriff Industrie 4.0 findet außerhalb des deutschsprachigen Raums nur bedingt Anwendung [HERMANN, M. et al. 2016]. Allerdings gibt es ähnliche Initiativen und technologische Vorstöße unter anderem Namen. HERMANN et al. [2016] verweisen auf den Begriff des *Industrial Internet* [EVANS, P. C., et al. 2012]. Industrie 4.0 kann als Teilmenge des Industrial Internet verstanden werden [HERMANN, M. et al. 2016]. Weitere Begriffe, die verwendet werden, sind: **“Advanced Manufacturing”** [President's Office of Advisors on Science and Technology 2014], **“Integrated Industry”** [BÜRGER, T. et al. 2014] und **„Smart Manufacturing“** [DAIS, S. 2017]. Es kann davon ausgegangen werden, dass ähnliche Begriffe auch in anderen Sprachräumen existieren. Diese wurden in der Recherche dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Cyber-physische Systeme

Cyber-physische Systeme (CPS) ermöglichen eine ganzheitliche Vernetzung von Systemen und Anlagen über den gesamten Produktionsprozess hinweg. CPS sind softwareintensive eingebettete Systeme, welche auf Dienste in Netzwerken, wie dem Internet, zugreifen [BROY, M., et al. 2010, S. 5 ff.]. Sie ermöglichen eine Vernetzung sich situativ selbststeuernder, räumlich verteilter Produktionsressourcen. Aspekte Cyber-physischer Systeme umfassen eigenständigen Informationsaustausch und selbstständige Entscheidungen. Voraussetzung ist die vollständige Integration jeglicher Ressourcen, Anlagen und Systeme in ein Netzwerk. Im Kontext der Integration von CPS in Produktionssysteme wird häufig auch von *Cyber-physischen Produktionssystemen* (CPPS) gesprochen. CPPS sollen eine durchgängige Verfahrenskette über den gesamten Produktlebenszyklus schaffen, damit eine kundenindividuelle Fertigung trotz sich ändernder Rahmenbedingungen möglich ist. [vgl. DEUSE, J. et al. 2015, S. 99 ff.; KAGERMANN, H., et al. 2013].

Nach BROY et al. [2010, S. 5] umfassen CPS eingebettete Systeme, die:

- mittels Sensoren und Aktuatoren physikalische Daten erfassen und Prozesse beeinflussen
- mit Netzwerken verbunden sind

- sich Daten und Services zu Nutzen machen
- über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen

BAUERNHANSL [2017, S. 14] führt im Zusammenhang mit CPS an, dass diese mehr und mehr zu Kommunikationsnetzwerken werden und deshalb das Konzept von Metcalfe (häufig auch Metcalfesches Gesetz genannt) Anwendung finden kann welches besagt, dass der Nutzen eines Kommunikationssystems mit dem Quadrat der Anzahl seiner Teilnehmer wächst. Dies führt dazu, dass der Wert eines Wertschöpfungsnetzwerkes mit zunehmender Vernetzung steigt. Angewendet auf die Industrie bedeutet dies, dass der erwartete Nutzen mit der Anzahl verbundener Anlagen und Prozesse in einem CPS wächst.

Einige Autoren vertreten die Meinung, dass diese zunehmende Vernetzung dazu führt, dass klassische Automatisierungsstrukturen aufgelöst werden:

BAUERNHANSL [2017, S. 22] spricht von einer „De-Hierarchisierung“ und einem Abflachen der klassischen Automatisierungspyramide hin zu einem Netz in der Cloud. Der *Verein Deutscher Ingenieure* (VDI) und der *Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik* (VDE) vertreten die Hypothese, dass die heute existierende Automatisierungspyramide (vgl. Abbildung 2-2) durch den Einsatz vernetzter, dezentral organisierter Systeme abgelöst wird [VDI/VDE 2013, S. 4]. CPPS bieten die Möglichkeit zur Nutzung und Bereitstellung dezentraler Dienste. Das führt dazu, dass die Automatisierungspyramide schrittweise auf ihre funktionale Struktur abstrahiert wird [VDI/VDE 2013, S. 4]. Dabei verbleiben echtzeitkritische Steuerungen zunächst in der Feldebene.

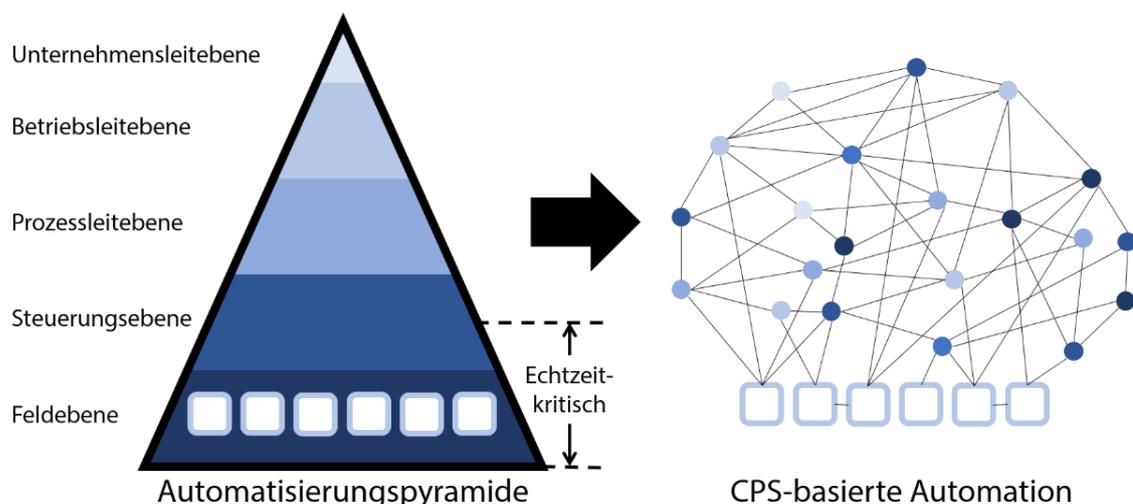


Abbildung 2-2: Ablösung der Automatisierungspyramide [i. A. a. VDI/VDE 2013, S. 4]

Es wurde gezeigt, dass CPS und CPPS eine standortunabhängige Vernetzung von Anlagen, Systemen, Objekten und Menschen ermöglichen. Sie sind in der Lage, ihre Umwelt über die eingesetzten Sensoren zu erfassen, verfügbare Daten auszuwerten und mit Hilfe von Aktoren auf die physikalische Welt einzuwirken [BAUERNHANSL, T. 2017, S. 12].

Internet der Dinge und Dienste

Cyber-physische Systeme bilden die Grundlage für ein Netzwerk verknüpfter Objekte – das *Internet der Dinge*. Neben diesem Internet der Dinge existieren einige Weitere, wie das Internet der Dienste, Services, Daten und einige mehr. Zusammenfassend wird häufig der Begriff *Internet der Dinge und Dienste* verwendet (häufig als Internet of Things – IoT abgekürzt). Die Anbindung aller physikalischen Objekte an ein gemeinsames Netzwerk wurde erst durch das neue Internet Protokoll IPv6 (Internet Protocol version 6) möglich. Das IoT ermöglicht eine neue Stufe technischer Kollaboration. Neben Kommunikationsmöglichkeiten wie der Maschine-Maschine-Kommunikation (kurz M2M) eröffnen sich vor allem semantische Technologien, die es Computern möglich machen die inhaltliche Bedeutung von Informationen zu erkennen und einzuordnen. [ANDERL, R. 2014; DAIS, S. 2017, 259 ff.].

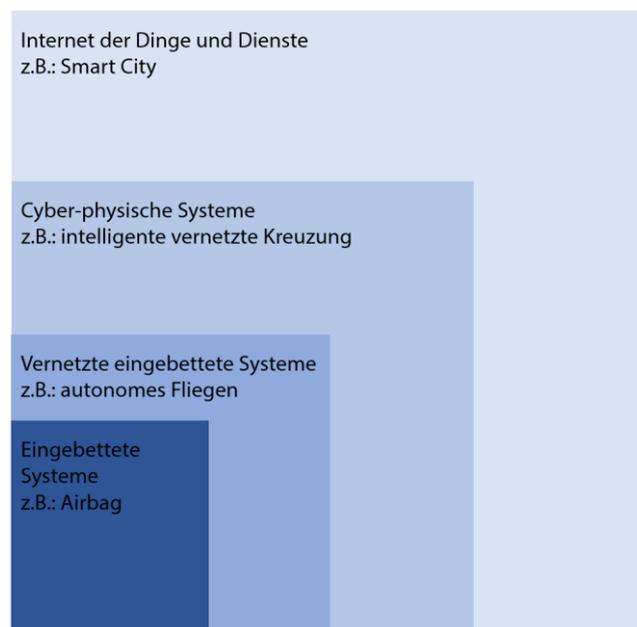


Abbildung 2-3: Die Entwicklung eingebetteter Systeme zum Internet der Dinge und Dienste [i. A. a. acatech 2011, S. 10]

Abbildung 2-3 zeigt, dass das Internet der Dinge und Dienste die logische Weiterentwicklung aus dem CPS ist. IoT ist der Deckbegriff für alle vernetzten Systeme, Objekte und Services. Bei der Umsetzung von Industrie 4.0 kommen neben CPS und dem IoT noch weitere Dimensionen zum Tragen. Besondere Wichtigkeit kommt sowohl der horizontalen, als auch der vertikalen Integration zu. Horizontale Integration wird in der Produktions- und Automatisierungstechnik als die Integration verschiedener IT-Systeme in Produktion und Unternehmensplanung, sowohl innerhalb eines Unternehmens als auch über die Unternehmensgrenzen hinweg, verstanden [KAGERMANN, H., et al. 2013, S. 24]. Allgemeiner beschreiben KÖHLER et al. [2015, S. 19] die horizontale Integration als Verkettung mehrerer Akteure und Systeme entlang der Wertschöpfungskette innerhalb von Wertschöpfungsnetzwerken – Unternehmensgrenzen überschreitend. Angewandt bedeutet dies, dass ein regelmäßiger Informationsaustausch zwischen zusammenarbeitenden Unternehmen (Zulieferer, Produzent, Logistikdienstleister, etc.) stattfindet. Damit kann die Basis für bessere Abstimmung, Steuerung und Kooperation gelegt werden [KÖHLER, P. et al. 2015, S. 19]. Vertikale Integration definierten KAGERMANN et al. [2013, S. 24] in der Produktions- und Automatisierungstechnik als Integration von IT-Systemen unterschiedlicher Hierarchieebenen zu einer ganzheitlichen Lösung und KÖHLER et al. [2015, S. 20] definieren es als die Vernetzung der verschiedenen Hierarchieebenen innerhalb der Automatisierungstechnik (Aktorik, Sensorik, Steuerungs- und Planungsebene) mit dem Ziel der Selbstoptimierung wesentlicher Produktionsressourcen.

Intelligente Fabrik

Ein mit dem Begriff Industrie 4.0 eng verknüpftes Schlagwort ist die intelligente Fabrik (auch Smart Factory genannt). Die intelligente Fabrik verbindet CPPS mit dem IoT. Die Verfügbarkeit von Daten spielt in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle. BAUERNHANSL [2017, S. 12] sieht in der Verfügbarkeit von Daten in Echtzeit ein zentrales Merkmal der intelligenten Fabrik, durch welches die reale Welt mit der virtuellen Welt verschmilzt.

KAGERMANN et al. [2013, S. 23] umschreiben den Begriff der intelligenten Fabrik wie folgt: „In der Smart Factory kommunizieren Menschen, Maschinen und Ressourcen so **selbstverständlich wie in einem sozialen Netzwerk**.“ Sie definieren, dass in der

intelligenten Fabrik Informations- und Kommunikations-Technologien (IKT) genutzt werden, um flexibler auf Anfragen reagieren zu können. Die intelligente Fabrik beherrsche Komplexität, steigere die Effizienz der Produktion und sei unempfindlicher gegenüber Störungen [KAGERMANN, H., et al. 2013, S. 87].

Intelligente Produkte

Eng mit dem Konzept der Smart Factory verknüpft ist die Idee *intelligenter Produkte* (Smart Products). Sie kennen ihre Eigenschaften, wissen wie sie gefertigt werden müssen oder in welcher Beziehung sie zu anderen Produkten stehen [VOGEL-HEUSER, B., et al. 2017c, S. 38]. Sie sind eindeutig identifizierbar, in jedem Produktionsschritt lokalisierbar und kennen ihre Historie, ihren aktuellen Zustand und den Zielzustand [KAGERMANN, H., et al. 2013, S. 5].

Nach McFARLANE et al. [2003] benötigt ein Produkt 5 Eigenschaften, um als intelligent zu gelten. Ein Produkt muss:

1. eindeutig identifizierbar sein,
2. die Möglichkeit besitzen mit seiner Umwelt zu kommunizieren,
3. Informationen über sich selbst speichern können,
4. seine Eigenschaften, Produktionsvoraussetzungen etc. anzeigen können,
5. in der Lage sein, Entscheidungen über die eigene Zukunft treffen zu können.

Darauf aufbauend unterteilen WONG et al. [2011] die Intelligenz von Produkten in zwei Klassen. Zum einen die „**Level 1 Produkt Intelligenz**“, für welche ein Produkt die Eigenschaften 1.-3. erfüllen muss und zum anderen die „**Level 2 Produkt Intelligenz**“, für welche alle Eigenschaften erfüllt sein müssen. Diese Definition ist sehr verallgemeinernd was die Klassifikation von Produktintelligenz angeht. Sie basiert auf der Trennung des physischen Produkts von seinem informationsbasierten Gegenstück [MEYER, G. G. et al. 2009, S. 139].

Digitaler Zwilling

Diese digitale Repräsentation eines physikalischen Objekts wird im Zusammenspiel mit Industrie 4.0 oft als Digitaler Schatten oder Digitaler Zwilling (**auch** „digital twin“) bezeichnet. Neben Objekten können auch nicht physische Dinge wie Dienste mit

digitalen Zwillingen abgebildet werden. Der digitale Zwilling enthält alle relevanten Informationen und Dienste und stellt sie über eine einheitliche Schnittstelle zur Verfügung. Dabei ist es irrelevant, ob das Gegenstück in der realen Welt bereits existiert oder nicht [KUHN, T. 2017, 1 ff.]. Das Fraunhofer Institut für Produktionsanalgen und Konstruktionstechnik (IPK) [2017] definiert den digitalen Zwilling als digitales Abbild eines Produktes, dessen Eigenschaften, Verhalten und Zustand durch Modelle, Informationen und Daten erfasst werden. Nach ROSEN et al. [2015] haben digitale Zwillinge eine Struktur in der alle Elemente miteinander verbunden und mit Metainformationen untermauert sind. Dadurch, dass ein digitaler Zwilling alle Eigenschaften eines Produktes oder einer Fertigungsanlage enthält, können diese Informationen bei der Produktionsplanung eingesetzt werden. Noch bevor eine Anlage entsteht, kann so auf mögliche Probleme aufmerksam gemacht werden. Die Siemens AG konnte beispielsweise durch den Einsatz von Digitalen Zwillingen die Einfahrzeit von Werkzeugmaschinen um bis zu 70% reduzieren und die Produktivität im Betrieb um mehr als 10% steigern [Siemens AG 2015, S. 9].

Auch wenn die Nutzung Digitaler Zwillinge gewisse Vorteile birgt, ist deren Erzeugung mit einer Vielzahl an Problemen verbunden. Häufig existieren relevante Daten dezentral an verschiedenen Orten. Ein zentrales Datensilo, welches nach dem SSOT-Prinzip (engl. single source of truth), einer zentralen und einzigartigen Datenquelle, arbeitet, existiert nur in den wenigsten Unternehmen. Zentralisierte Datensilos vermeiden das häufige Problem, dass Daten und Datensätze in einer Vielzahl von Versionen an vielen Orten gespeichert werden. Dadurch werden Speicherkapazitäten und Ressourcen blockiert. Bereiche wie die Produktion, Logistik und Service erfassen heute vielfach nur wenige oder überhaupt keine Daten. Demnach fehlt häufig die Grundlage auf welcher Digitale Zwillinge aufbauen können. Zusätzlich werden erfasste Daten nicht immer zur Verfügung gestellt. Sie stehen dann nur einem kleinen Personenkreis, welcher unmittelbar mit dem Prozess verbunden ist, zur Verfügung. Eine weitere Verwendung scheitert dadurch häufig an den Systemgrenzen, obwohl eine flächendeckende Erfassung von Daten im Unternehmen eine der Grundvoraussetzungen für Industrie 4.0 ist. [SCHUH, G., et al. 2017, S. 17 ff.]

Losgröße 1

Mit der Einführung von Digitalen Zwillingen, der intelligenten Fabrik, intelligenter Produkte und der Realisierung von Cyber-physischen Produktionssystemen ist der Weg für einen Kernanwendungsfall von Industrie 4.0 geebnet – der Produktion mit *Losgröße 1* [WENDE, J. et al. 2014, S. 203]. „Losgröße 1“ ist ein häufig genanntes Schlagwort im Themenfeld Industrie 4.0 und bezeichnet einen Extremfall, bei dem Produkte für jeden Kunden individuell gefertigt werden. LASI et al. [2014, S. 261] führen an, dass der Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt in den letzten Jahrzehnten zu einer Individualisierung der Nachfrage und damit auch von Produkten geführt hat. Eine Produktion mit sehr kleinen und dadurch auch vielen Produktionslosen ist in einer klassischen Fertigung mit vielen Problemen verbunden: sich häufig ändernde Produktionslose führen zu deutlich steigenden Rüst- und Lagerkosten, bei gleichzeitig nur geringfügig wachsenden Umsätzen [WEILER, A. 2015]. Die Komplexität der Prozesse steigt, Durchlaufzeiten sind stark abhängig vom häufigen Umrüsten der Anlagen und es kann zu Problemen mit Lieferanten wegen geringer Abnahmemengen kommen [WEILER, A. 2015].

Im Produktionsprozess von morgen ermöglichen vernetzte und intelligente Anlagen die kundenspezifische Fertigung von Kleinstlosen. Die Produktion der Zukunft soll flexibel und anpassbar sein. Die oben genannten Cyber-physischen Produktionssysteme ermöglichen, in Kombination mit intelligenten Produkten, eine sich größtenteils selbststeuernde Produktion, welche flexibel auf Änderungen reagieren und somit den genannten Nachteilen einer klassischen Produktion entgegenwirken kann. Losgröße 1 ist allerdings ein Extremfall, welcher wohl erst mit der Einführung einer vollständig autonomen Produktion möglich wird. Nichts desto trotz ist Losgröße 1 zu einem Schlagwort geworden, um zu zeigen, was mithilfe von Industrie-4.0-Maßnahmen möglich sein kann. [VOGEL-HEUSER, B., et al. 2012, S. 13; VDMA, et al. 2015, S. 71; SCHLICK, J. et al. 2014, S. 77]

Big Data

Die Datengrundlage für die Implementierung Digitaler Zwillinge sollte wie oben aufgezeigt in zentralen Datensilos vorliegen. Bei den Daten, welche in diese Silos fließen, handelt es sich häufig um unstrukturierte Sensor- oder Produktionsdaten. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von *Big Data*. Der Begriff Big Data beschreibt dabei

zunächst eine große Ansammlung von Datensets mit vielfältigen Informationen. Entscheidend ist, dass es sich um einfach formatierte, unstrukturierte, heterogene Daten handelt, deren Verarbeitung über die Fähigkeiten konventioneller Datenverarbeitungssoftware hinaus geht [YIN, S. et al. 2015, S. 143]. YIN et al. [2015, S. 143] definieren Big Data als Datensets, deren Größe über die Möglichkeiten typischer Datenbanksoftware zur Sammlung, Speicherung, Verarbeitung und Analyse hinaus gehen. Ähnliche Definitionen sind auch bei anderen Autoren zu finden (vgl. BRÖDNER, P. 2015; KAGERMANN, H. 2017). Um Big Data zu beschreiben werden häufig die Begriffe *Volume*, *Velocity* und *Variety* (kurz „die drei V’s“), welche von der META Group (heute Gartner Inc.) schon 2001 vorgestellt wurden, genutzt [LANEY, D. 2001].

Die *drei V’s* gelten als die Dimensionen von Big Data. *Volume* steht hier für das Datenvolumen. Die Menge anfallender Daten wird mittlerweile in Tera- und Petabytes gemessen und wird auch in Zukunft weiter ansteigen. *Velocity* bedeutet Geschwindigkeit, wobei die Geschwindigkeit der Datenverarbeitung und die Geschwindigkeit, mit der sich Daten und die Beziehungen zwischen Daten und deren Bedeutung ändern, gemeint sind. Die steigende Leistungsfähigkeit von Computern ermöglicht es, immer mehr Daten in kurzer Zeit zu verarbeiten. Eine Datenverarbeitung in Echtzeit ist daher heute fast alternativlos, um mit den erzeugten Datenmengen umzugehen. Mit *Variety* wird die Vielfalt der Datenstrukturen und -klassen beschrieben. Klassisch besitzen multidimensionale Datenbanksysteme fest definierte Ordnungskriterien, die Daten miteinander in Beziehung setzen. Jedoch besitzen nicht alle Datenquellen solche festen Ordnungskriterien, wodurch der Umgang mit diesen Daten erschwert wird. Auch für die Integration von Daten in IT-Systeme sind Datenstrukturen notwendig. [vgl. BACHMANN, R. et al. 2014, S. 23 ff.; GANDOMI, A. et al. 2015, S. 138 ff.]

Diese drei Dimensionen von Big Data werden häufig um zwei weitere ergänzt. In der Gesamtheit wird von den 5 V’s von Big Data gesprochen. BACHMANN et al. [2014, S. 27 ff.] ergänzen um die Dimensionen Value, als unternehmerischen Mehrwert, und Validity, als Maß der Widerspruchsfreiheit von Daten. GANDOMI et al. [2015] hingegen schlagen Veracity, Variability oder Value als weitere Dimensionen vor. Veracity ist bei Ihnen die Richtigkeit der Daten. Als Beispiel werden Daten aus Kundenbefragungen herangezogen, welche menschlichem Ermessen unterliegen und dadurch verfälscht sein können. Variability beschreibt die Variation in Datenraten und Value ist in diesem Fall (im Gegensatz zur Definition nach BACHMANN et al. [2014]) die generell geringe Wertigkeit einzelner Daten, jedoch der hohe Wert großer Datenmengen [GANDOMI, A. et al. 2015,

139 ff.].

YIN et al. [2015] ergänzen, ähnlich wie GANDOMI et al. [2015], die Dimensionen *Veracity* und *Value*. Sie definieren *Veracity* aber eher als die Vertrauenswürdigkeit der Daten und verweisen auf eine zeitnahe Verwendung, bevor Daten durch eine zu starke Bereinigung verfälscht werden. *Value* ist bei ihnen ebenfalls der Wert, der aus den Daten generiert werden kann. Darüber, welche die beiden ergänzenden Dimensionen von Big Data sind, herrscht Uneinigkeit, jedoch sind die oben genannten Begriffe häufige Kandidaten.

Mit Blick auf die in Kapitel 1 vorgestellten Ziele dieser Arbeit, werden die bereits vorgestellten Begrifflichkeiten unter folgenden Oberbegriffen im Themenfeld Industrie 4.0 zusammengefasst:

- Cyber-physische Systeme
- Kommunikation
- Daten
- Kundenorientierte Prozesse
- Produktionsprozesse

Diese Oberbegriffe, im Folgenden auch als Dimensionen bezeichnet, teilen den Themenkomplex in inhaltlich kohärente Einzelgebiete auf. Im weiteren Verlauf der Arbeit, insbesondere in Kapitel 4, wird diese Aufteilung genutzt, um ein kombiniertes Reifegradmodell zu konzipieren. Die Fachliteratur nennt die obenstehenden Dimensionen so oder in ähnlichen Zusammensetzungen häufig, wenn es um Industrie 4.0 geht. Die nachfolgende Tabelle soll dem Leser hierbei als Anhaltspunkt dienen. Sie schafft eine Verbindung zwischen den gewählten Dimensionen und einer Auswahl bislang genannter Autoren.

Tabelle 2-1: Oberbegriffe im Themenfeld Industrie 4.0

Autoren Dimensionen	[Anderl, R., et al. 2015]	[Lichtblau, K., et al. 2015]	[Schuh, G., et al. 2017]	[Kagermann, H., et al. 2013]	[VDMA, et al. 2015]	[Bauernhansl, T., et al. 2014]	[Deuse, J. et al. 2015]	[Broy, M., et al. 2010]
Cyber-physische Systeme	x	x	x	x	x	x	x	x
Kommunikation	x	x	x	x	x	x	x	x
Daten	x	x	x	x	x	x	x	x
Kundenorient. Prozesse	x	x		x	x			
Produktionsprozesse	x	x	x	x	x		x	

2.2 Grundlegende Industrie-4.0-Konzepte

Hinter dem Schlagwort Industrie 4.0 verbergen sich nicht nur die in Abschnitt 2.1 vorgestellten Begrifflichkeiten, sondern auch eine Reihe von tieferliegenden Ideen und Konzepten, die entscheidend für das Verständnis und vor allem die Anwendung von Industrie 4.0 sind. Viele dieser Konzepte finden sich in der Fachliteratur, meist mit den oben aufgeführten Begrifflichkeiten verwoben, aufgeführt. Im Folgenden werden diese Konzepte vorgestellt und im Einzelnen eingeführt. Dabei bilden die Grundlagen aus Abschnitt 2.1 die Basis und helfen bei dem Verständnis und der Einordnung in den Gesamtzusammenhang.

Identifikation

Das Konzept der Identifikation von Komponenten und Objekten spielt insbesondere in der Produktion und der Logistik eine entscheidende Rolle. Identifizierbarkeit heißt, dass Objekte eindeutig bestimmbar sind und physikalische Objekte mithilfe sogenannter Identifiers (engl. für identifizierende Merkmale) eindeutig ihren virtuellen Spiegelbildern (siehe Absatz Digitaler Zwilling in Abschnitt 2.1) zugeordnet werden können [VDMA, et al. 2015, S. 61]. Identifikation wird im Zusammenhang mit Industrie 4.0 häufig zusammen mit CPS und CPPS genannt [vgl. LOSKYLL, M. et al. 2013, S. 692; ANDERL, R. 2014]. Der Grund dafür liegt in der Natur der Cyber-physischen Systeme – vernetzte

Systeme können nur funktionieren, wenn alle Anlagen und Komponenten eindeutig zuzuordnen sind. Jede Komponente im System muss identifizierbar und ansprechbar (siehe Absatz Kommunikation

in Abschnitt 2.2) sein. Außerdem ist es wichtig, dass Werkstücke und Transportbehälter identifiziert werden können, um die richtigen Produktionsschritte und eine reibungslose Produktion zu gewährleisten. Neben der Assoziation mit CPS wird das Thema Identifikation auch häufig mit dem Internet der Dinge und Dienste in Verbindung gebracht [SIEPMANN, D. 2016, S. 20 ff.]. Das IoT, welches im Kern ein Netzwerk von miteinander verbundenen Objekten ist, muss in der Lage sein, seine Komponenten gezielt anzusprechen. Daher ist es von entscheidender Wichtigkeit, dass die Objekte im Netzwerk identifiziert werden können.

Die Anfänge automatisierter Identifikationstechnologien wurden in den 1970er Jahren mit Barcodes gemacht [vgl. IT & Production 2016]. Dem Barcode folgten weitere zwei-dimensionale Codes wie der QR-Code [vgl. BELUSSI, L. F. F. et al. 2011] oder der DataMatrix-Code [vgl. SEGURA VELANDIA, D. M. et al. 2016]. Diese zwei-dimensionalen Codes machten es erstmals möglich, vielfältige Objekte teilautomatisiert zu identifizieren. Barcodes können dagegen nur eine begrenzte Anzahl an Informationen enthalten. Je komplexer ein 2-dimensionaler Code, desto mehr Informationen können in Form von alphanumerischen Zeichen gespeichert werden. Ein typischer QR-Code ist beispielsweise in der Lage bis zu 100 Zeichen zu speichern [BELUSSI, L. F. F. et al. 2011, S. 283]. Dies ermöglicht es, einfache Informationen wie Materialdaten, Identifikationsnummern oder Produktnamen zu speichern. Einer der häufigsten Anwendungsfälle ist allerdings die Speicherung von Hyperlinks, welche auf Internetseiten oder Netzwerkstandorte verweisen. Dieses Speichern von Verknüpfungen ermöglicht, wie oben beschrieben, die Verbindung von physikalischen Objekten mit ihren virtuellen Gegenständen. Eine neben Barcodes weit verbreitete Identifikationstechnologie ist RFID (radio-frequency identification). RFID ist ein kontaktloses Verfahren zur Übertragung von Daten, welche mit Hilfe eines Transponders am Objekt von einem Lesegerät ausgelesen werden können [FINKENZELLER, K. et al. 2010, S. 6 ff.]. Für den Einsatz von RFID werden immer zwei Komponenten benötigt. Zum einen der bereits benannte Transponder, welcher am zu identifizierenden Objekt befestigt sein muss und zum anderen ein Lesegerät, welches in einigen Anwendungsfällen auch ein Lese-/Schreibgerät sein kann. Transponder, welche häufig in Form von so genannten „Tags“ (engl. für Anhängenzettel) angebracht werden,

umfassen in ihrer einfachsten Ausführung einen einmal beschreibbaren Speicher, welcher ihre unverwechselbare Identität enthält. In komplexeren Bauweisen werden wiederbeschreibbare Microchips eingesetzt. Die Übertragung von Informationen geschieht kontaktlos mit Hochfrequenzenergie und elektromagnetischen Feldern. RFID ist nahezu unbeeinflusst von Verschmutzungen, optischen Einschränkungen oder Orientierung [FINKENZELLER, K. et al. 2010, S. 7]. Es bietet die Möglichkeit, große Mengen an Informationen zu speichern und in kürzesten Lesezeiten abzurufen. Die Lesereichweite beträgt bis zu mehreren Metern. Allerdings handelt es sich, wie bei QR-Codes, um ein Identifikationsverfahren, welches bei Ausfall der Lesegeräte kein menschliches Lesen erlaubt [FINKENZELLER, K. et al. 2010, S. 7].

Neben der Identifikation über Barcodes oder RFID-Tags stehen noch weitere Verfahren zur Verfügung. Verfahren die auf die Anbringung von Markern (engl. für Markierungen) verzichten, werden unter dem Begriff der markerlosen Verfahren zusammengefasst. Ein **Beispiel hierzu ist das „Track & Trace Fingerprint“ Projekt zur Bauteil-Rückverfolgung**, des Fraunhofer Instituts für physikalische Messtechnik (IPM) [Fraunhofer IPM 2017]. Dabei werden hochauflösende Bilder von Bauteilen genutzt, um die individuell ausgeprägten Mikrostrukturen auf den Oberflächen zur Identifikation zu nutzen. Diese Verfahren befinden sich noch in der Entwicklungsphase und finden im industriellen Alltag wenig Anwendung. Deshalb wird auf eine nähere Ausführung an dieser Stelle verzichtet. Eine weitere Identifikationsmöglichkeit, auf die nur kurz eingegangen werden soll, **ist die Zuhilfenahme von „Computer Vision“**: Der Identifikation von optischen Datensätzen wie Bildern durch Computeralgorithmen. Dieses Verfahren wird häufig zur Qualitätskontrolle eingesetzt und ermöglicht eine automatisierte und zügige Kontrolle großer Objektmengen [CREMERS, D. 2017, S. 205; BAGADE, A. A. et al. 2017, S. 412]. Der **VDMA nennt den Einsatz von Computer Vision in der Industrie „Embedded Vision“** (engl. für eingebettete Sicht) und verwies während der *embeddedworld*-Konferenz auf die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten [VDMA 2017]. In das Themenfeld der Computer Vision fallen ebenfalls Begriffe wie pattern recognition [vgl. KRIZHEVSKY, A. et al. 2017], image processing, deep learning [vgl. WICK, C. 2017] und einige mehr, die in dieser Arbeit nicht vertieft werden.

Die bisherigen Ausführungen zeigen die vielfältigen Möglichkeiten zur Identifikation von Industrie-4.0-Komponenten auf. Identifikationsverfahren ermöglichen die fehlerfreie Adressierung einzelner Komponenten in komplexen Netzwerken und sind somit unverzichtbarer Teil aller Cyber-physischen Systeme [VDMA, et al. 2015, S. 62]. Es wird

deutlich, dass Identifikationsverfahren die Grundlage schaffen, ohne welche weder die Lokalisation von Bauteilen und Anlagen, noch die Kommunikation zwischen Maschinen und/oder Menschen stattfinden kann. Im weiteren Verlauf wird zunächst kurz auf das Konzept der Lokalisation und im Anschluss auf das Konzept der Kommunikation im Kontext von Industrie 4.0 eingegangen.

Lokalisation

Ähnlich wie die Identifikation spielt auch die Lokalisation von Komponenten und Objekten eine entscheidende Rolle für den Erfolg und die Umsetzung von Industrie 4.0. Besonders im Zusammenhang mit Smart Products und Smart Factory (vgl. Abschnitt 2.1) ist es wichtig, dass Produkte eindeutig identifiziert und jederzeit lokalisiert werden können [KAGERMANN, H., et al. 2013, S. 25]. Die Bedeutung der Vernetzung von Lokalisation mit Identifikation wird mit der Aussage verdeutlicht, dass Informationen über den Standort nutzlos sind ohne auch Informationen über die Identität zu haben [MEYER, G. G. et al. 2009, S. 141]. Lokalisation im industriellen Kontext meint die Lokalisation von Werkstücken oder Werkstückträgern im Produktionsprozess. Entscheidend ist, an welcher Stelle im Prozess sich das Objekt befindet, um daraus beispielsweise weitere Bearbeitungsschritte und -reihenfolgen zu bestimmen. Standortinformationen können genutzt werden, um intelligente Dienstleistungen anbieten zu können [CHEN, Z. et al. 2013, S. 661]. Viele dieser intelligenten Dienstleistungen, welche auf Standortinformationen beruhen, finden allerdings nicht in der Industrie, sondern im Bereich der Konsum- und Unterhaltungsindustrie Anwendung. So sind beispielsweise Werbeagenturen an den Standorten potenzieller Kunden interessiert, um gezielt Werbung schalten zu können [CHEN, Z. et al. 2013, S. 661]. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Paketzustellung, bei der einige Unternehmen bereits die genauen Standortinformationen der Zustellfahrzeuge an den Kunden weitergeben.

Im industriellen Umfeld ist die Fähigkeit der Lokalisation vor allem im Bereich des Warenmanagements und der Lagerhaltung von Bedeutung. Die Ortung von Waren ist eine Grundvoraussetzung für Industrie 4.0 [Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2017b, S. 118]. Jedoch sind die verwendeten Methoden in weiten Bereichen nur unzureichend, um eine durchgängige Lokalisation zu ermöglichen. Verbreitet ist die Verwendung von Barcodelabels und Etiketten [Bundesministerium für

Bildung und Forschung (BMBF) 2017b, S. 118]. Durch Scannen können so die Identität und der Standort bei Wareneingang und -ausgang festgestellt werden. Die Fehleranfälligkeit eines solchen Systems ist hoch, da bei jeder Warenbewegung der neue Standort durch das Scannen der relevanten Etiketten erfasst werden muss. Andere Systeme nutzen anstelle von Barcodes RFID-Tags. Werden jedoch mobile Handlesegeräte eingesetzt, ist der Aufwand ähnlich hoch wie bei Barcodes. Statische RFID-Lesepunkte ermöglichen bei geringerem Aufwand jedoch nur eine dem Netz der Lesepunkte entsprechende ungenaue Standortbestimmung [Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2017b, S. 118]. Eine flächendeckende RFID-Versorgung ermöglicht hohe Genauigkeit, ist jedoch aufgrund der benötigten leistungsstarken Transponder und Lesegeräte eine kostenintensive Alternative.

Ein Ziel vieler Industrie-4.0-Ansätze ist es, Lokalisationsmöglichkeiten in der gesamten Wertschöpfungskette einzuführen. Die Standortinformationen eines Objekts gehören zu den wesentlichen Daten, welche in Cyber-physischen Systemen verwendet werden (siehe Abschnitt 2.1). Diese Daten können für eine Vielzahl möglicher Anwendungen verwendet werden. So können *Heat Maps* beispielsweise Aufschluss über den Einsatzort von Werkzeugen oder den Aufenthaltsort von Mitarbeitern geben, um die Sicherheit des Personals zu erhöhen [GOLOVINA, O. et al. 2016]. Nachverfolgbarkeit ermöglicht den Einsatz intelligenter Produktionsplanung und bietet die Möglichkeit intelligente Dienstleistungen zur Objektverfolgung anzubieten. Die Rückverfolgbarkeit von Teilen ist ein entscheidender Aspekt des Servicegeschäfts und ermöglicht kürzere Kommunikationswege und vereinfachte Zuordnung von Fehlteilen. Probleme, die in der Produktion auftreten und erst spät bemerkt werden, können so leichter zu ihrem Ursprung zurückverfolgt werden. Identifikation und Lokalisation sind die Pfeiler auf denen viele Industrie-4.0-Anwendungen fußen.

Kommunikation

Das Konzept der Kommunikation ist ebenso wie Identifikation und Lokalisation von enormer Bedeutung für Industrie 4.0. Kommunikation wird in die beiden Bereiche Mensch-Maschine-Kommunikation und Maschine-Maschine-Kommunikation (kurz M2M) unterteilt. Hier soll zunächst die Mensch-Maschine-Interaktion betrachtet werden.

Roboteranlagen bieten vielfältige Möglichkeiten und erleichtern ihren menschlichen Gegenständen die Arbeit. Zur Programmierung der Roboteranlagen kommen im klassischen Sinne zwei verschiedene Verfahren zum Einsatz. Zum einen das *Lead-Through-Verfahren* (auch Online-Programmierung genannt), bei dem der physische Roboter bewegt wird und jeder Programmpunkt einzeln per Knopfdruck ins Programm aufgenommen wird. Dieses Verfahren ermöglicht es, auf die zeitaufwendige Eingabe von Programmcodes zu verzichten und bietet dem Menschen die Möglichkeit, direkt mit der Maschine zu interagieren [NAUMANN, M. et al. 2017, 203]. Eine Alternative bietet die Offline-Programmierung. Offline heißt in diesem Zusammenhang, dass die Programmierung an einem Computerarbeitsplatz und nicht am Roboter selbst vorgenommen werden kann. Für diese Art der Programmierung wird allerdings ein digitales Abbild der Anlage benötigt (siehe Absatz Digitaler Zwilling in Abschnitt 2.1) [NAUMANN, M. et al. 2017, 202]. Diese Art der Programmierung bietet den Vorteil, dass auch während des Betriebs der Anlage neue Programme erstellt werden können, wodurch die Rüstzeiten drastisch reduziert werden. Vernetzte Anlagen bieten ebenfalls die Möglichkeit, dass die Roboterprogrammierung in Zukunft als Service über das Netzwerk erfolgen kann [NAUMANN, M. et al. 2017, 203].

Neben der Programmierung von Anlagen spielt die Interaktion zwischen Mensch und Maschine auch in anderen Bereichen eine große Rolle. Zu nennen ist beispielsweise der Einsatz von *Wearable Technology* (engl. für tragbare Technologie) im Service Geschäft oder in der Intralogistik. Als *Wearable Computing* wird die Integration von mobilen und tragbaren Computersystemen in ein Kleidungsstück bezeichnet [TEUCKE, M. et al. 2017, 582]. Besonders Brillen oder Uhren, aber auch Westen und Helme werden häufig mit tragbarer Technologie versehen, um dem Nutzer durch weitgehend unbemerkte Portabilität zusätzliche Informationen bereitzustellen [TEUCKE, M. et al. 2017, 582]. Diese tragbaren Technologien nutzen häufig drahtlose Verbindungen wie Bluetooth oder WLAN um eine Mensch-Maschine-Interaktion zu ermöglichen. Besonders die Logistikbranche kann durch die Nutzung tragbarer Technologien profitieren. Datenbrillen bieten optische Unterstützung bei der Navigation oder dem Ausführen von Arbeitsschritten. Obwohl sie häufig zur Gruppe der Head Mounted Displays, HMD (engl. für am Kopf getragene Bildschirme), gezählt werden, bilden Datenbrillen ihre eigene Gruppe [vgl. RUNDE, C. 2014]. Ihr Hauptmerkmal ist es nicht, wie bei HMDs, den Benutzer in eine interaktive 3D-Umgebung zu versetzen, sondern sie stellen eine tragbare Zusatzanzeige dar [RUNDE, C. 2014, S. 4]. Sie ermöglichen es nützliche Informationen

direkt im Sichtfeld des Trägers anzuzeigen. Dadurch wird die Mobilität erhöht und die Arbeit kann ungehindert ablaufen. Das Potenzial von Datenbrillen und HMDs ist enorm und wird sich in den kommenden Jahren weiter steigern [RUNDE, C. 2014, S. 41]. Datenhandschuhe wie der *ProGlove* des gleichnamigen Start-Ups bieten optisches und haptisches Feedback bei der Arbeit. Sie können mit RFID-Lesegeräten ausgerüstet werden oder zweidimensionale Barcodes lesen [vgl. ProGlove 2016].

Der Nutzen, den Wearables ihren Trägern bieten, ist beachtlich. Sie verbinden den Menschen mit der technologischen Seite von Industrie 4.0 und bilden damit eine Schnittstelle in der Mensch-Maschine-Interaktion.

Ebenso wichtig wie die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine ist die Kommunikation zwischen Maschinen – kurz M2M Kommunikation (vom engl. machine to machine communication). Dabei erfolgt ein Datenaustausch zwischen einzelnen Maschinen. Ziel ist es, eine Interaktion unter Anlagen zu fördern, wodurch die Komplexität verringert wird [HUBER, W. 2016, S. 11]. Mit Hilfe untereinander kommunizierender Anlagen lassen sich Energie-, Zeit- und Ressourcenbedarf der Produktion reduzieren [HUBER, W. 2016, S. 41]. Die Entwicklung von M2M-Ansätzen ist jedoch mit großen Problemen verbunden, weil es im industriellen Umfeld eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme in jedem Bereich der Fertigung gibt. Dadurch ist die Anzahl der Schnittstellen, die beachtet und überwunden werden müssen, sehr groß. Trotz der Schwierigkeiten bietet die M2M Kommunikation weitreichende Vorteile für die Produktion in einem CPS. Maschinen sind in der Lage, Produktionsaufträge untereinander zu koordinieren. Mit geeigneten Zwischenlagern kann eine Anlage so, bei Ausfall, durch die anderen ersetzt und vertreten werden, bis der Defekt beseitigt ist. Kommunizierende Maschinen können Produktionsaufträge optimal verteilen und so Rüstzeit und Rüstkosten einsparen. Probleme im Produktionsablauf können echtzeitgenau aufgefangen werden und ohne das Zutun eines Mitarbeiters frühzeitig gemeldet werden.

Während M2M Anwendungen in der Vergangenheit häufig auf interne Prozesse bezogen waren, arbeiten sie heute immer unternehmensübergreifender [BRENNEIS, E. 2016, S. 2]. Die Entwicklung im Bereich von M2M geht hin zu Anwendungen mit klarem Nutzen: Immer mehr M2M Anwendungen profitieren von der Integration von Daten und sind immer häufiger Bestandteil der Infrastruktur in Unternehmen [BRENNEIS, E. 2016, S. 3]. Die Verbindung zwischen M2M Kommunikation und dem Internet der Dinge und

Dienste ist besonders deutlich. Beide Thematiken sind stark auf die Vernetzung und Kommunikation zwischen Maschinen und Systemen fokussiert. In einer Studie zur Durchsetzung von IoT im industriellen Alltag, setzt das Telekommunikationsunternehmen Vodafone M2M Kommunikation mit IoT gleich und sieht einen deutlichen Anstieg der Unternehmen, die IoT nutzen [Vodafone Group 2017, S. 4 ff.]. Nach ihren Angaben sind etwa 80% der Nutzer überzeugt, dass IoT in den nächsten fünf Jahren enorme Auswirkungen auf die gesamte Wirtschaft haben wird [Vodafone Group 2017, S. 5]. Es wird erwartet, dass bis zu 50% aller Geschäftsprozesse IoT-fähige Steuerungssysteme haben werden [Vodafone Group 2017, S. 5]. Doch neben den positiven Auswirkungen von M2M Kommunikation sehen Unternehmen den Entwicklungen mit Besorgnis entgegen. Am kritischsten werden Sicherheitsverletzungen und Datenschutz gesehen, gefolgt von finanziellen Einschränkungen [Vodafone Group 2017, S. 18].

Alles in allem ist die Entwicklung, hin zu immer stärker vernetzen Maschinen, nicht mehr wegzudenken. Sowohl die Mensch-Maschine-Interaktion, als auch die M2M-Kommunikation spielen in der vernetzten Welt von CPS und dem IoT eine entscheidende Rolle.

Dezentralisierung

Identifikation, Lokalisation und Kommunikation spielen besonders auf der Feldebene eine Rolle (vgl. Abbildung 2-2). Um ein umfassenderes Bild von Industrie 4.0 zu erhalten, ist es allerdings nötig, auch einen Blick in die Betriebsleitebene zu werfen. Diese auch als MES- (Manufacturing Execution System) oder Produktionsleit-Ebene bezeichnete Schicht der Automatisierungspyramide ist für die Führung, Lenkung, Steuerung und Kontrolle der Produktion zuständig.

In diesem Bereich ist das Konzept der *Dezentralisierung von Entscheidungen* anzusiedeln. Dezentralisierung in der Organisation heißt, dass Entscheidungen, die in klassischen Produktionssystemen noch zentral getroffen wurden, in die jeweiligen Verantwortungsbereiche verschoben werden. Ziel ist es, die immer größer werdende Komplexität einer zentralen Steuerung aufzubrechen und beherrschbar zu machen. Um dieses Ziel erreichen zu können, müssen relevante Informationen dezentral zur Verfügung stehen. Letztlich bietet Dezentralisierung die Möglichkeit, Prozesse flexibler

und anpassbarer zu gestalten. [KLETTI, J. 2015, S. 6 ff.].

Eines der bekanntesten Beispiele einer dezentralisierten Anwendung ist Kanban. Das ursprünglich von Toyota entwickelte Lagersystem funktioniert nach dem Pull-Prinzip. Das heißt, dass Bestände nur aufgefüllt werden, wenn sie einen Mindestbestand unterschreiten. Entscheidend ist, dass die Auslösung einer Nachbestellung nicht aus der zentralen Planung heraus, sondern direkt aus dem Feld heraus getroffen wird [KLETTI, J. 2015, S. 7].

Dezentralisierung ist eng mit CPS und damit auch der intelligenten Fabrik (vgl. Abschnitt 2.1) verknüpft. BAUERNHANSL et al. [2014, S. 17] benennen CPS als die nächste Stufe der Dezentralität in der nicht mehr nur Organisationen sondern auch Dienste, Software und Objekte dezentralisiert werden können. Die Vorteile dezentraler Entscheidungen liegen in der Fähigkeit, echtzeitgenau reagieren zu können und die Komplexität von Systemen zu reduzieren. Dezentralisierung bildet damit einen unausweichlichen Architekturwechsel in der Produktion [BAUERNHANSL, T., et al. 2014, S. 30].

2.3 Industrie 4.0 im Maschinen- und Anlagenbau

Aus den Definitionen von Industrie 4.0 (vgl. Abschnitt 2.1) wird deutlich, dass Produktionsanlagen und -prozesse immer flexibler, vernetzter und anpassbarer werden müssen. Der Konkurrenzdruck aus dem Ausland wird für deutsche Unternehmen immer spürbarer. In Zukunft werden deutsche Hersteller nicht mehr in der Lage sein, ohne Zusatzleistungen ihre Kunden zu binden – sie müssen ihnen zusätzliche Leistungen (in Form von Softwareangeboten oder Dienstleistungen), über die reinen Maschinen hinaus, liefern [SAUER, O. 2013, S. 6]. Diese Zusatzleistungen sind besonders für den Maschinen- und Anlagenbau interessant. Unternehmen, die bisher hochpreisige Spezialanfertigungen produzieren, können sich nicht mehr nur auf den Verkauf ihrer Maschinen verlassen. Das Geschäft entwickelt sich in Richtung serviceorientierter Modelle, bei denen der Anlagenverkauf in den Hintergrund rückt.

Diese neue Art des Wertschöpfungssystems wird auch als *Industrielles Produkt-Service System* (IPSS) bezeichnet [BOBLAU, M. et al. 2017, S. 299]. In einem solchen System werden integrierte Lösungen anstelle einzelner, unabhängiger Anlagen verkauft. Es entsteht eine grundlegend andere Kunden-Anbieter-Beziehung, in der eine gemeinsame Wertschöpfung stattfindet [BOBLAU, M. et al. 2017, S. 299]. In der Literatur wird diese

Wertschöpfung zwischen Kunde und Anbieter auch als *co-creation of value* (engl. für gemeinsame Erstellung von Wert) bezeichnet [COVA, B. et al. 2008]. Diese enge Zusammenarbeit zwischen Kunden und Anbietern wird die Zukunft für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau bilden. Einmalige Transaktionen, wie sie in klassischen Geschäftsmodellen üblich sind, werden durch alternative Ertragsströme über den gesamten Lebenszyklus ersetzt [BOßLAU, M. et al. 2017, S. 309]. Die Möglichkeiten zur Ertragsgenerierung reichen von der zeitbasierten Abrechnung, über die Bezahlung nach spezifischen Kennzahlen, bis hin zu ergebnisbasierten Modellen. Als typisches Beispiel eines solchen IPSS wird häufig der britische Flugzeugturbinenhersteller Rolls-Royce genannt. Rolls-Royce erzielt etwas mehr als die Hälfte seiner Erträge im Dienstleistungsgeschäft und schließt Verträge mit Fluggesellschaften ab, bei denen pro geleisteter Flugstunde abgerechnet wird [MÜLLER-STEWENS, G. et al. 2011, S. 400]. Dieses Vorgehen wird auch als *Power-by-the-hour-Modell* bezeichnet. Der Kunde hat den Vorteil, dass er die gesamte Wartung und den Austausch von Komponenten an den Anbieter auslagert und sich auf sein Kerngeschäft konzentrieren kann. Es wird nur gezahlt wenn die Anlagen, am Beispiel von Rolls-Royce Triebwerke, einen Mehrwert liefern. MÜLLER-STEWENS et al. [2011, S. 399 f.] nennen das Produkt, **die „Eintrittskarte für weiteres Geschäft“ und sprechen vom „Verkauf des Nutzens“**. Die Grenzen zwischen IPSS und CPS sind verschwommen – Sie gehen ineinander über. Sie ermöglichen es, durch innovative Geschäftsideen und Technologien zusätzlichen Mehrwert zu generieren.

Der deutsche Maschinen- und Anlagenbau profitiert besonders von dieser neuen Art der Ertragsgenerierung. Klassische Geschäftsmodelle, wie sie dort häufig vorzufinden sind, sind immer häufiger gezwungen, sich innovativen Ideen anzupassen. In anderen Branchen haben Unternehmen des Internets dies eindrucksvoll bewiesen. Unternehmen wie Amazon oder Ebay haben den Markt mit preisgünstigeren Handelsgeschäften und Zusatzapplikationen umgewälzt [MÜLLER-STEWENS, G. et al. 2011, S. 401]. Im Maschinen- und Anlagenbau spielt das Aftersales- und Servicegeschäft im Vergleich mit anderen Industrien nur eine kleine Rolle [VDMA, et al. 2014, S. 31]. Eine Studie im Auftrag des VDMA zeigt, dass viele Unternehmen in Aftersales lediglich ein Verkaufsargument sehen [VDMA, et al. 2014, S. 32]. Nötige Investitionen in die Entwicklung neuer Technologien, welche zu neuen Geschäftsmodellen im Bereich zusätzlicher Dienstleistungen führen, fehlen. Industrie 4.0 bietet hier die Möglichkeit, mit intelligenten, technologisch

orientierten, Lösungen neue Geschäftsfelder zu erschließen.

Besonders interessant für den Maschinen- und Anlagenbau ist das in Abschnitt 2.1 vorgestellte Themenfeld Losgröße 1. Kerngeschäft vieler Anlagenbauer ist die Planung und Fertigung kundenspezifischer Großanlagen. Dabei werden viele Anlagen und Komponenten speziell nach Kundenvoraussetzungen entworfen und gefertigt. Das führt durch die hohe Variantenvielfalt unausweichlich zum Extremfall – Losgröße 1. Durch diese Voraussetzung ist der Maschinen- und Anlagenbau ideal geeignet, um Industrie 4.0 einzusetzen und von den Vorteilen zu profitieren. Eng damit verbunden ist auch die Fähigkeit, Produktion und Prozesse flexibel auf äußere Einflüsse anpassen zu können. Eine CPS-basierte Vernetzung macht die dynamische Anpassung von Prozessen in unterschiedlichen Dimensionen (Qualität, Zeit, Risiko, Robustheit, Preis etc.) möglich [KAGERMANN, H., et al. 2013, S. 20]. KAGERMANN et al. [2013, S. 37] sagen ein *durchgängiges System-Engineering über die gesamte Wertschöpfungskette* voraus und nennen als Grundvoraussetzung die modellbasierte Entwicklung auf Basis von CPS.

Die Individualisierung der Kundenwünsche und eine zunehmende Flexibilisierung sind heute schon Aspekte, mit denen sich Sonderanlagenhersteller auseinandersetzen müssen. Industrie 4.0 bietet die Möglichkeit, diese Probleme zu lösen und auch in Zukunft wirtschaftlich zu bleiben.

3 Etablierte Industrie-4.0-Entwicklungsmodelle

In diesem Kapitel werden drei etablierte Reifegradmodelle des Themenfeldes Industrie 4.0 vorgestellt. In Abschnitt 3.1 werden die Grundlagen reifegradbasierter Referenzmodelle erläutert. Darauf aufbauend werden in den Abschnitten 3.2 bis 3.4 zunächst etablierte Reifegradmodelle vorgestellt und anschließend in Abschnitt 3.5 verglichen. Den Abschluss bildet Abschnitt 3.6, in dem ein Rahmenmodell für die Konzeption in Kapitel 4 vorgeschlagen wird. Mit Kapitel 4 schließt sich die Konzeption des zentralen Modells dieser Arbeit an. Es entsteht ein kumuliertes Reifegradmodell für den Einsatz in der Produktion im Maschinen- und Anlagenbau.

3.1 Reifegradmodelle

Um den Begriff des Reifegradmodells zu klären, ist es zunächst nötig, den Modellbegriff **genauer zu definieren. Die Verwendung des Begriffs „Modell“ ist jedoch weder im alltäglichen noch im wissenschaftlichen Kontext eindeutig definiert** [THOMAS, O. 2005, S. 6]. Die Vielfältigkeit der verschiedenen Definitionen, welche in fast allen wissenschaftlichen Fachbereichen existieren, aufzuführen, würde das Maß dieser Arbeit überschreiten. Eine ausführliche Auseinandersetzung mit den Definitionen des Modellbegriffs findet sich bei THOMAS [2005] ab Seite 25.

Die dieser Arbeit zugrundeliegende Definition für den Modellbegriff lautet: „Ein Modell ist eine durch einen Konstruktionsprozess gestaltete, zweckrelevante Repräsentation eines Objekts“ [THOMAS, O. 2005, S. 25], Prozesses oder Systems. Reifegradmodelle bilden eine Untergruppe der Modelle. Sie stellen Vorgehensmodelle dar, die dabei helfen, Objekte und Prozesse besser zu verstehen [JODLBAUER, H. et al. 2016, S. 1474]. Der Aufbau eines Reifegradmodells ist meist stufenbasiert und ermöglicht es, auf Basis qualitativ ausgelegter Indikatoren, den Reifegrad (Reifegradstufe) des betrachteten Systems oder Unternehmens zu bestimmen [AKKASOGLU, G. 2013, S.7 ff.]. Ein „[...] Reifegrad ist der indikatorabhängige Entwicklungsstand eines Betrachtungsobjekts zu einem bestimmten Zeitpunkt.“ [AKKASOGLU, G. 2013, S. 9]. Reifegradmodelle sind demnach Stufenmodelle, die es ermöglichen, ein Objekt, einen Prozess oder ein System indikatorabhängig einem bestimmten Entwicklungsstand (Reifegrad) zuzuordnen.

AKKASOGLU [2013, S. 51] gibt die folgenden Komponenten von Reifegradmodellen an:

Reifegradstufen

Gängige, merkmalsbasierte Reifegradmodelle umfassen drei bis sechs Reifegradstufen – je größer die Anzahl der Stufen, desto präziser sind einerseits die Bewertungsmöglichkeiten und umso komplexer ist andererseits auch die Reifegrad-Kennwert-Matrix [AKKASOGLU, G. 2013, S. 57].

Reifegraddimensionen und -indikatoren

Reifegraddimensionen und -indikatoren unterliegen Anforderungen der Zielkonformität, Unabhängigkeit, Vollständigkeit, Interpretierbarkeit und Beeinflussbarkeit [AKKASOGLU, G. 2013, S. 56].

Eine Gewichtung von Indikatoren oder Dimensionen

Eine Gewichtung kann dabei helfen, die Indikatoren oder Dimensionen zusätzlich nach ihrer Bedeutung für das definierte Ziel zu differenzieren [AKKASOGLU, G. 2013, S. 56]. Grundlage für die Gewichtung können dabei Befragungswerte sein. Aber auch Forschungsarbeiten wie die von HERMANN et al. [2016] können die Basis für eine Gewichtung sein, indem sie Publikationen auf die Bedeutung von bestimmten Themenfeldern hin untersuchen.

Reifegrad-Kennwert-Matrix

Die Reifegrad-Kennwert-Matrix schafft die Bewertungsbasis für die Ermittlung des Entwicklungsstandes, indem zu jedem Reifegradindikator ordinalskalierte Anforderungen erfasst und diese den Reifegradstufen zugeordnet werden [AKKASOGLU, G. 2013, S. 57].

3.2 Industrie 4.0 Maturity Index

Der *Industrie 4.0 Maturity Index* (im weiteren Verlauf verkürzend Maturity Index genannt) ist ein multidimensionales Reifegradmodell und soll eine valide Beurteilungsmethodik für Firmen bereitstellen [SCHUH, G., et al. 2017]. Der Maturity Index entstand 2017 im Rahmen einer acatech Studie – *acatech* (ein Kunstwort aus Akademie und Technik) ist der Name für die *Deutsche Akademie der Technikwissenschaften*, welche ein privater und gemeinnütziger Verein, mit dem Ziel die Politik in technikwissenschaftlichen und -politischen Fragen zu beraten, ist.

Zentrales Ziel des Maturity Index ist es den Industrie-4.0-Reifegrad von Unternehmen zu bestimmen und sinnvolle Maßnahmen zu seiner Verbesserung zu ermitteln [SCHUH, G., et al. 2017, S. 13]. Das methodische Vorgehen der Studie beruht auf dem Case-Study-Ansatz nach YIN [2009], welcher es ermöglichen soll, ein aktuelles Phänomen in seinem realen Kontext zu untersuchen [SCHUH, G., et al. 2017, S. 13; YIN, R. K. 2009]. Dieser wurde um einen Workshop erweitert, weil die Grenzen von Industrie 4.0 unklar sind und es sich aus wissenschaftlicher Sicht dabei um ein aktuelles Phänomen handelt [SCHUH, G., et al. 2017, S. 13]. SCHUH et al. [2017] gliedern das Vorgehen der Maturity Index Studie in vier konstruktive Phasen ein, wobei drei aufeinander aufbauend sind. Die kontinuierliche Erprobung von Erkenntnissen bildet die übergreifende vierte Phase (vgl. Abbildung 3-1):



Abbildung 3-1: Vorgehensweise der Maturity Index Studie [SCHUH, G., et al. 2017, S. 13]

Die Maturity Index Studie sieht in der Beschleunigung unternehmerischer Entscheidungs- und Anpassungsprozesse den wesentlichen wirtschaftlichen Vorteil von Industrie 4.0. Die Autoren definieren Industrie 4.0 als die „[...] echtzeitfähige, datenvolumenstarke und multimodale Kommunikation und Vernetzung zwischen cyber-**physischen Systemen und Menschen.**“ [SCHUH, G., et al. 2017, S. 10]. Diese Definition ähnelt den in Abschnitt 2.1 genannten Definitionen darin, dass sie die Echtzeitfähigkeit und Vernetzung aufgreift. Die Autoren der Studie stellen zusätzlich die Agilität von Unternehmen als zentrale Errungenschaft von Industrie 4.0 heraus – Agilität als die Fähigkeit auf erhöhte Marktdynamik schnell reagieren zu können [SCHUH, G., et al. 2017, S. 10].

Es handelt sich bei dem Maturity Index Modell um ein Stufenmodell. Dahinter steckt die **Idee der Autoren, „Quick-Wins“** (engl. für schnelle Gewinne), kontinuierliche positive Effekte, zu realisieren und gleichzeitig das übergeordnete Transformationsziel zu erreichen [SCHUH, G., et al. 2017, S. 15]. Die einzelnen Stufen des Modells sind schrittweise aufeinander aufgebaut. So lässt sich beispielsweise die erste Stufe mit

geringeren digitalen Fähigkeiten erreichen als die zweite Stufe. Der Prozess stellt somit einen kontinuierlichen Entwicklungsprozess dar. Unterteilt wird das Modell in die zwei Hauptteile *Digitalisierung* und *Industrie 4.0*, welche sich wiederum in insgesamt 6 Stufen unterteilen. In den ersten Abschnitt, Digitalisierung, gehören in aufsteigender Reihenfolge die Stufen

1. Computerisierung
2. Konnektivität.

Der sich anschließende zweite Abschnitt (Industrie 4.0) unterteilt sich in die übrigen Stufen:

3. Sichtbarkeit
4. Transparenz
5. Prognosefähigkeit
6. Adaptierbarkeit.

Die einleitende Digitalisierung bildet die Voraussetzungen und ist kein Bestandteil von Industrie 4.0 – Computerisierung und Konnektivität bilden zunächst die Grundlage [SCHUH, G., et al. 2017, S. 15].

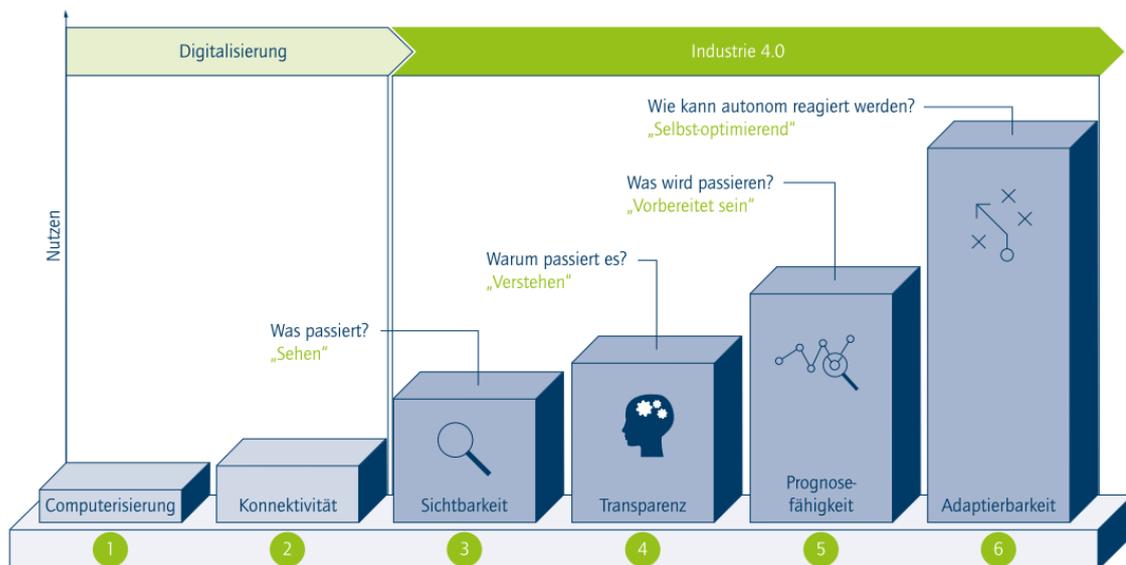


Abbildung 3-2: Industrie 4.0 Maturity Index [SCHUH, G., et al. 2017, S. 16]

Nachfolgend wird eine kurze Übersicht über die einzelnen Stufen des Maturity Index Modells gegeben (für weitergehende Informationen siehe SCHUH et al. 2017, S. 15 ff.):

Stufe eins: Computerisierung

Die Computerisierung eines Unternehmens bildet die Grundlage für die Digitalisierung

und damit auch Industrie 4.0. Es handelt sich bei Computerisierung um den isolierten Einsatz von Informationstechnologien, ohne diese über ein Netzwerk verbunden zu haben. Der Einsatz von computerisierten Anlagen ermöglicht eine kostengünstige und weitgehend fehlerfreie Produktion mit höherer Präzision als bei handbetriebenen Anlagen. Ein typisches Beispiel solcher Anlagen ist eine CNC-Fräsmaschine. Diese kann durch rechnergestützte numerische Steuerung sehr genaue Bearbeitungen durchführen. Die CAD-Daten müssen allerdings häufig noch händisch auf die Anlage übertragen werden. Anlagen, welche nach der ersten Stufe des Modells computerisiert wurden, fehlt es jedoch an der Verknüpfung zu einem Enterprise-Resource-Planning (ERP)-Systems, wodurch es nicht möglich ist, die Produktion direkt mit dem Fertigungsauftrag zu verknüpfen. Dazu befähigt erst die zweite Stufe. [SCHUH, G., et al. 2017, S. 15-16].

Stufe zwei: Konnektivität

Die zweite Stufe des Maturity Index Modells wird erreicht, wenn der Einsatz isolierter IT-Komponenten durch vernetzte Systeme abgelöst wird. Es findet eine teilweise Verknüpfung zwischen den verwendeten operativen Technologien (OT) und der Business-IT statt. Eine vollständige Integration zwischen IT- und OT-Ebene ist allerdings noch nicht erreicht. Dank der Möglichkeit zu deutlich längeren Adressen im aktuellen Internet Protokoll, IPv6, ist eine Anbindung aller Anlagen und Objekte möglich (siehe Internet der Dinge und Dienste) und damit die Grundvoraussetzung für das IoT erfüllt. Verbundene Anlagen ermöglichen beispielsweise, dass Fertigungsaufträge automatisiert an die Produktion übertragen werden können und nach erfolgreicher Fertigung das System in Echtzeit aktualisiert wird. [SCHUH, G., et al. 2017, S. 16].

Stufe drei: Sichtbarkeit

Im Mittelpunkt der dritten Stufe stehen Sensoren, welche die laufenden Prozesse von Anfang bis Ende mit einer Vielzahl von Datenpunkten versehen können. Geringe Preise für Sensoren und eine gute Verfügbarkeit ermöglichen es Unternehmen heute überall Daten zu erfassen. Das so entstehende digitale Abbild des Unternehmens oder einzelner Prozesse und Anlagen bildet den digitalen Schatten (siehe Abschnitt 2.1- Digitaler Zwilling). Der digitale Schatten bildet das Basiselement, auf dem die weiteren Stufen aufbauen. Bei der flächendeckenden Sammlung von Daten im Unternehmen steht hierbei noch nicht eine bestimmte Analyse im Vordergrund. Die Daten stellen vielmehr ein redundanzfreies Abbild des Unternehmens in Echtzeit dar. Eine wichtige Einschränkung

ist die Beschränkung auf das Sammeln von Daten. Es findet noch keine Analyse statt. [SCHUH, G., et al. 2017, S. 17].

Stufe vier: Transparenz

In der vierten Stufe liegt der Fokus nicht mehr nur auf dem Sammeln von Prozessdaten, sondern in erster Linie auf der Auswertung und Analyse. Unternehmen müssen Ursachenanalysen durchführen, um Wirkzusammenhänge abzuleiten. Dazu ist es notwendig Zusammenhänge im digitalen Schatten mit Hilfe von Fachwissen in Kontext zu bringen und so aus einer großen Datenmenge gezielt Informationen zu filtern. Das Stichwort in diesem Zusammenhang heißt Big Data (siehe Abschnitt 2.1 - Big Data). Ein mögliches Einsatzszenario dieser Daten ist die Zustandsüberwachung an Maschinen. Gemessene Parameter werden auf Abhängigkeiten untersucht, um bei Abweichungen auf mögliche Probleme aufmerksam zu machen. [SCHUH, G., et al. 2017, S. 17–18].

Stufe fünf: Prognosefähigkeit

Um die fünfte Stufe zu erreichen, müssen Unternehmen in der Lage sein, eine Simulation des digitalen Schattens in der Zukunft zu erstellen, um Zukunftsszenarien zu simulieren und zu identifizieren, welches Szenario mit der höchsten Wahrscheinlichkeit eintritt. Unternehmen werden in die Lage versetzt, mit einer gewissen Vorwarnzeit auf bevorstehende Probleme zu reagieren. Je ausgereifter der digitale Schatten und die Analyse von Wirkzusammenhängen sind, desto besser ist auch die Prognosefähigkeit eines Unternehmens. Trotz der automatisierten Sammlung und eventuell automatisierten Analyse von Daten ist die Reaktion auf der fünften Stufe noch ein von Hand auszuführender Prozess. [SCHUH, G., et al. 2017, S. 18].

Stufe sechs: Adaptierbarkeit

Mit der vorherigen Stufe wurden alle Voraussetzungen für ein automatisches Handeln und eine Optimierung geschaffen. Eine kontinuierliche Adaptierung versetzt das Unternehmen auf dieser Stufe in die Lage, Entscheidungen von autonomen Systemen treffen zu lassen. Ziel dieser Stufe ist es, die Daten des digitalen Schattens so einzusetzen, dass Entscheidungen ohne menschliches Einwirken in Echtzeit getroffen werden können. Dabei ist jedoch das Risiko für die Produktion und die Kunden kritisch zu begutachten. [SCHUH, G., et al. 2017, S. 18].

Die Anwendung des Maturity Index ist in drei Phasen aufgeteilt. Die erste Phase ist die Reifegradbestimmung in der die Ist-Situation im Unternehmen ermittelt wird. In der zweiten Phase wird anschließend eine Soll-Bestimmung mit Hilfe einer GAP-Analyse (Lücken-Analyse) durchgeführt. Die letzte Phase bildet die Identifikation von konkreten Maßnahmen, um die ermittelte Lücke (GAP) zwischen Soll- und Ist-Zustand zu schließen. Die Darstellung der so identifizierten Maßnahmen erfolgt mit Hilfe einer Roadmap. Der Industrie 4.0 Maturity Index berücksichtigt dabei die gesamten Wertschöpfungsprozesse eines Unternehmens. [SCHUH, G., et al. 2017, S. 46ff.].

3.3 Werkzeugkasten Industrie 4.0

Der *Werkzeugkasten Industrie 4.0* ist Teil des Vorgehensmodells „Leitfaden Industrie 4.0“ des VDMA. Der Leitfaden soll mittelständische Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau dabei unterstützen, ihre Potenziale für Produkte und Produktion in Bezug auf Industrie 4.0 zu identifizieren und gezielt neue Ideen zu generieren [ANDERL, R. et al. 2015, S. 8]. Der VDMA sieht den Leitfaden bewusst nicht als vorgefertigte Strategie zur Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0, **sondern als „Werkzeug zur Weiterentwicklung der eigenen Stärken und Kompetenzen“** [ANDERL, R. et al. 2015, S. 8]. Eine Analyse der Ist-Situation der Kompetenzen des Unternehmens bildet die Basis, auf welcher mittels Kreativitätstechniken und mit Hilfe des Werkzeugkastens Industrie 4.0 Ideen generiert werden, um neue Geschäftsmodelle zu konzipieren [JODLBAUER, H. et al. 2016, S. 1481].

Der Werkzeugkasten Industrie 4.0 zeigt Anwendungsebenen von Industrie 4.0 hinsichtlich Produktion und Produkten. Diese Anwendungsebenen sind jeweils in fünf aufeinander aufbauende Entwicklungsstufen unterteilt. Dadurch ist der Werkzeugkasten Industrie 4.0 genau wie der Industrie 4.0 Maturity Index ein Stufenmodell (vgl. Abschnitt 3.2). Die Anwendungsebenen sind in den Zeilen und die Entwicklungsstufen in den Spalten des Werkzeugkastens dargestellt (vgl. Abbildung 3-3). Der Grad der Industrie 4.0 Umsetzung nimmt von links nach rechts, entlang der Entwicklungsstufen, zu. [ANDERL, R. et al. 2015, S. 8 ff.]

Die beiden Teile des Werkzeugkastens sind in Abbildung 3-3 dargestellt und werden im Folgenden kurz vorgestellt:

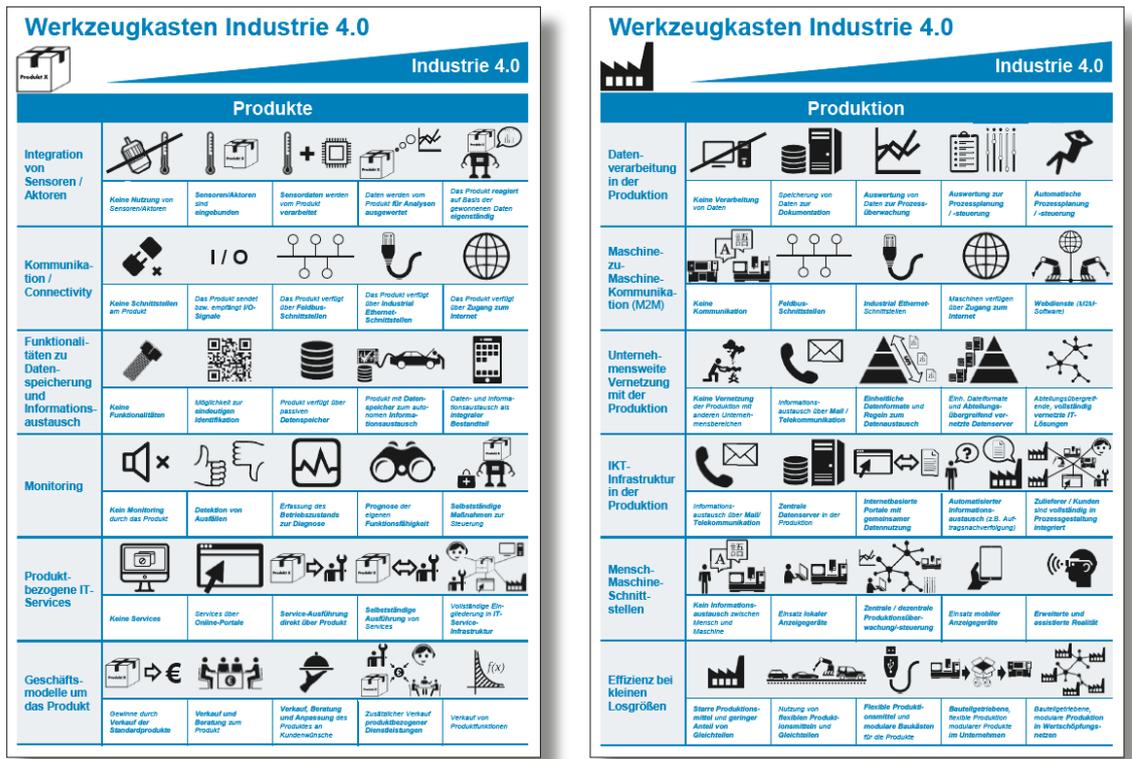


Abbildung 3-3: Werkzeugkasten Industrie 4.0 [ANDERL, R. et al. 2015, S. 9]

Der Teil des Werkzeugkastens für *Produkte* unterstützt bei der Ideenfindung in der Entwicklung innovativer Industrie 4.0 Produkte und kann auf Produkte genauso wie Teilkomponenten von Produkten angewandt werden. Die Kernfrage in diesem Teil lautet: „Inwiefern können mithilfe von Industrie 4.0 neue Produkte entwickelt beziehungsweise bestehende weiterentwickelt werden, sodass für potentielle Kunden ein Mehrwert entsteht?“ [ANDERL, R. et al. 2015, S. 13]. Die Anwendungsebenen im Bereich Produkte lauten:

- Integration von Sensoren und Aktoren
- Kommunikation und Connectivity
- Datenspeicherung und Informationsaustausch
- Monitoring
- Produktbezogene IT-Services
- Geschäftsmodelle um das Produkt

Auf eine genauere Aufschlüsselung der Anwendungsebenen wird an dieser Stelle verzichtet, kann aber ANDERL et al. [2015] ab Seite 13 entnommen werden.

Im zweiten Teil des Werkzeugkastens geht es um Ansatzpunkte im Kontext der *Produktion*. Startpunkt der Überlegungen im Rahmen der Produktion sollte die Frage

sein, „[...] wie mithilfe von Industrie 4.0 Produktionsabläufe optimiert und Produktionskosten gesenkt werden können.“ [ANDERL, R. et al. 2015, S. 15]. Die Anwendungsebenen im Bereich Produktion lauten:

- Datenverarbeitung in der Produktion
- Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M)
- Unternehmensweite Vernetzung mit der Produktion
- Infrastruktur von Informations- und Telekommunikationstechnologie in der Produktion
- Mensch-Maschine-Schnittstellen
- Effizienz bei kleinen Losgrößen

Der erste Schritt bei der Anwendung des Werkzeugkastens ist es, ein passendes Anwendungsszenario zu finden. Im nächsten Schritt muss entschieden werden, welche Anwendungsebenen (Zeilen im Werkzeugkasten) weiterentwickelt werden sollen. Dazu ist zunächst die Ist-Situation zu bestimmen. Nachdem der Ist-Stand erfolgreich bestimmt wurde, können verschiedene Kreativitätstechniken genutzt werden, um neue Ideen zu generieren oder bestehende Ideen weiterzuentwickeln. ANDERL, R. et al. [2015] schlagen die Anwendung des *St. Galler Business Model Navigator* (vgl. Abbildung 3-4) vor. Ebenso können aber auch andere Kreativitätstechniken genutzt werden, um Ideen zu sammeln und weiterzuentwickeln – eine Übersicht findet sich beispielhaft bei GESCHKA et al. [2005] ab Seite 295.

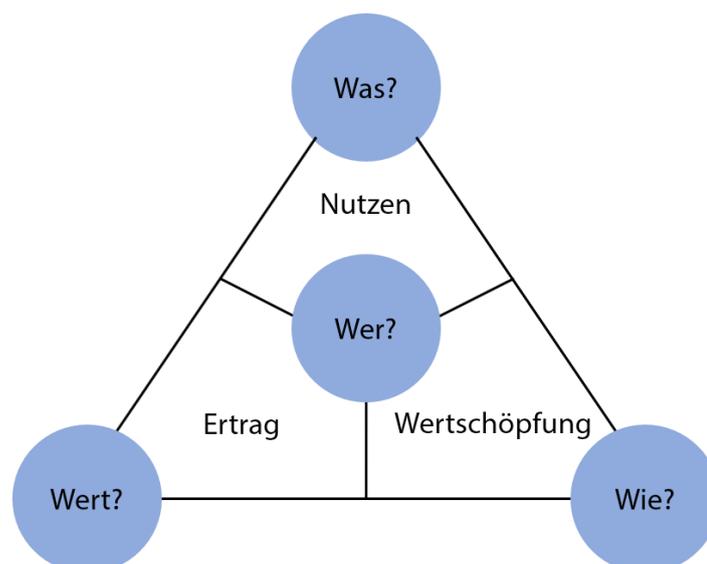


Abbildung 3-4: St. Gallen Business Model Navigator [i. A. a. Gassmann, O. et al. 2013, S. 6]

Der Navigator in Abbildung 3-4 hilft Unternehmen bei einer differenzierten Auseinandersetzung mit den Ideen und unterstützt bei der Ausarbeitung neuer Konzepte [ANDERL, R. et al. 2015, S. 23]. Dazu sind vier Leitfragen zu analysieren und zu beantworten [GASSMANN, O. et al. 2013, S. 6]:

- Was ist der Nutzen?
- Wie wird Leistung erstellt?
- Wie wird Wert generiert?
- Wer ist der Zielkunde?

Die Beantwortung dieser Fragen konkretisiert die Ideen und macht ein potentielles Geschäftsmodell greifbarer [GASSMANN, O. et al. 2013, S. 6].

Nach der Ideenfindung in Workshops müssen erfolgsversprechende Ideen in Projekte überführt und detailliert werden. Für eine erfolgreiche Durchführung sieht der VDMA das Bekenntnis der Führungsebene zu Industrie 4.0 als besonders wichtig an [ANDERL, R. et al. 2015, S. 16–27].

3.4 Industrie-4.0-Readiness-Studie

Die *Industrie-4.0-Readiness-Studie* ist eine von der IMPULS-Stiftung des VDMA durchgeführte Studie mit den Zielen Verständnis für Industrie 4.0 zu schaffen, den Reifegrad für Unternehmen zu erheben und Veränderungsbedarfe aufzuzeigen [JODLBAUER, H. et al. 2016, S. 1482]. An der Konzeption und Durchführung beteiligt waren das *Institut der deutschen Wirtschaft Köln Consult* GmbH und das *Forschungsinstitut für Rationalisierung* (FIR) der RWTH Aachen. Um die deutschen Maschinen- und Anlagenbauunternehmen bei ihren ersten Schritten im Themenfeld Industrie 4.0 zu unterstützen, wurde im Rahmen der Studie der Umsetzungsgrad (Readiness) von Industrie 4.0 in den Unternehmen untersucht [LICHTBLAU, K., et al. 2015, S. 10 ff.]. Das zum Einsatz kommende Modell heißt *Industrie-4.0-Readiness-Modell*. Zur Datenerhebung wurde im Verlauf der Studie ein Online-Selbst-Check für Unternehmen entwickelt und durchgeführt. Der Selbsttest erfasst sechs Dimensionen von Industrie 4.0 im Unternehmen und gleicht diese sowohl mit dem Profil führender Industrie-4.0-Unternehmen, als auch mit deren Zielvision ab [LICHTBLAU, K., et al. 2015, S. 11]. Dieses

Vorgehen ermöglicht es Unternehmen zu sehen, in welchen Bereichen sie gut aufgestellt sind und wo noch Verbesserungsbedarf besteht.

Das Readiness-Modell besteht aus sechs Dimensionen. Grundlage bilden vier Dimensionen, die aus der Industrie 4.0 Definition hervorgehen. Die anderen beiden Dimensionen (*Strategie und Organisation; Mitarbeiter*) sind als Ergebnis von Workshops entstanden. Die sechs Hauptdimensionen lauten [LICHTBLAU, K., et al. 2015, S. 21]:

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

Um ein detaillierteres Bild von der Lage der Unternehmen zu erhalten, sind den Dimensionen jeweils Themenfelder zugeordnet worden. Der innere Kreis in Abbildung 3-5 bildet die sechs Hauptdimensionen ab und der Äußere zeigt die insgesamt 18 Themenfelder:



Abbildung 3-5: Dimensionen im Readiness-Modell [LICHTBLAU, K., et al. 2015, S. 22]

Das obige Modell bildet die Grundlage, um Unternehmen einem Industrie 4.0 Reifegrad zuzuordnen. Die Autoren des Modells nutzen zusätzlich eine Gewichtung der einzelnen Faktoren, um Unterschiede zwischen großen und kleinen Unternehmen auszugleichen [LICHTBLAU, K., et al. 2015, S. 15].

Im Rahmen von Workshops mit Unternehmensvertretern wurden sechs Entwicklungsstufen ausgearbeitet. Jeder Stufe sind Mindestanforderungen zugeordnet, ohne deren Erfüllung eine Stufe nicht erreicht werden kann. Die Stufen lauten [LICHTBLAU, K., et al. 2015, S. 23]:

- Stufe 0: Außenstehender
- Stufe 1: Anfänger
- Stufe 2: Fortgeschrittener

- Stufe 3: Erfahrener
- Stufe 4: Experte
- Stufe 5: Exzellenz

Die Autoren der Studie [LICHTBLAU, K., et al. 2015, S. 23] konnten aus den sechs Readiness-Stufen drei Unternehmenstypen ableiten. Unternehmen der Stufen 0 und 1 zählen zu den Neulingen, weil sie sich noch gar nicht oder nur in geringem Maße mit Industrie 4.0 beschäftigt haben. Zu den Einsteigern zählen Unternehmen der Stufe 2. Sie haben bereits erste Maßnahmen ergriffen. Unternehmen, die mindestens die Stufe 3 erreicht haben zählen zu den Pionieren. Industrie 4.0 ist bei ihnen bereits weit fortgeschritten und sie sind damit dem Großteil der deutschen Maschinen- und Anlagenbauer weit voraus. Pioniere bilden die Benchmark-Gruppe, mit der andere Unternehmen verglichen werden. Innerhalb der Pioniere wird die Stufe der Exzellenz allerdings so gut wie nicht erreicht – sie stellt einen idealen Zielzustand dar [LICHTBLAU, K., et al. 2015, S. 30].

Die Ergebnisse der Readiness-Studie machen deutlich, dass der deutsche Maschinen- und Anlagenbau noch am Anfang der Industrie-4.0-Einführung steht. Die durchschnittliche Readiness beträgt 0,9. Lediglich 5,6% der befragten Unternehmen gehören der Gruppe der Pioniere an (Stufe 3: 4,6% und Stufe 4: 1%). Keins der befragten Unternehmen hat die fünfte Stufe erreichen können. Nach Angaben der Autoren ist dies allerdings nicht verwunderlich, da es sich dabei um die Zielvision von Industrie 4.0 handelt. Die meisten Unternehmen zählen zu den Neulingen (Außenstehende: 38,9%; Anfänger: 37,6%). Trotz dieser Ergebnisse stellen die Autoren der Readiness-Studie fest, dass der Maschinen- und Anlagenbau im Vergleich zum verarbeitenden Gewerbe insgesamt, zu welchem er zählt, deutlich besser abschneidet. Mehr Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes gehören der Stufe 0 an, als im Maschinen- und Anlagenbau und es gehören weniger Unternehmen der Stufen 2 und höher an. [LICHTBLAU, K., et al. 2015, S.26 ff.]

3.5 Vergleich der vorgestellten Reifegradmodelle

Jedes der vorgestellten Entwicklungsmodelle ermöglicht es, die Eindringtiefe von Industrie 4.0 in ein Unternehmen zu messen. Im Folgenden werden die Anwendungsfelder, Stärken und Schwächen der behandelten Modelle kurz vorgestellt. Ziel ist es, mit Bezug auf Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau, besonders

erfolgsversprechende Aspekte der Modelle zu extrahieren, um im Anschluss ein kumuliertes Reifegradmodell zu erstellen.

Industrie 4.0 Maturity Index

Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, ist es das selbstgestellte Ziel des Industrie 4.0 Maturity Index den aktuellen Industrie-4.0-Reifegrad eines Unternehmens zu identifizieren um dadurch Verbesserungen realisieren zu können und einen wirtschaftlichen Nutzen zu generieren [SCHUH, G., et al. 2017, S. 13]. Dazu beschreibt das Modell insgesamt sechs Entwicklungsstufen für jedes der vier Strukturelemente eines Unternehmens (Ressourcen, Informationssysteme, Kultur, Organisationsstruktur). Jede der sechs Stufen ist auf der Vorherigen aufgebaut und ermöglicht einen zusätzlichen Nutzen. Der gewählte **Aufbau des „Industrie-4.0-Entwicklungspfads“ ermöglicht es sehr gut, den Weg zu einem Industrie 4.0 konformen Unternehmen aufzuzeigen**. Die Stufen des Modells dienen der Einordnung, aber auch als Wegweiser, welche Schritte in welcher Reihenfolge notwendig sind. Allerdings wird die Reifegradzuordnung in heterogenen Systemen dadurch erschwert. Unternehmen sind in vielen Fällen nicht eindeutig einer dieser Stufen zuzuordnen, sondern sind in verschiedenen Bereichen unterschiedlich weit entwickelt. Die Anlehnung des Maturity Indexes an den Ordnungsrahmen Produktion und Management ermöglicht eine vollständige Sicht auf produzierende Unternehmen und ordnet das Modell diesen zu. Dies schränkt die Allgemeingültigkeit ein, ermöglicht jedoch eine detailliertere Analyse produzierender Unternehmen. Der Industrie 4.0 Maturity Index gibt Unternehmen ein Werkzeug zur konkreten Ausgestaltung ihrer Transformation an die Hand [SCHUH, G., et al. 2017, S. 53]. Er ist weniger als reines Reifegradmodell und mehr als eine Art Leitfaden zu sehen.

Werkzeugkasten Industrie 4.0

Der Werkzeugkasten Industrie 4.0 (vgl. Abschnitt 3.3) ist als Orientierungshilfe und Hilfsmittel bei der Ideenfindung konzipiert. Der Anspruch eines Reifegradmodells kann dadurch nicht erfüllt werden. Es findet keine Einstufung des Unternehmens statt. Der Vergleich mit anderen Reifegradmodellen ist daher nur bedingt möglich. Es finden sich allerdings Elemente, die an das Konzept eines Reifegrades angelehnt sind. Die Anwendungsebenen, in welche der Werkzeugkasten unterteilt ist (vgl. Abbildung 3-3) sind ordinal skaliert und ermöglichen es, **Ausprägungen zwischen „geringem Anteil Industrie 4.0“ und „voller Industrie 4.0 Umsetzung“ einzustufen**. Die einzelnen

Abstufungen sind nicht mit Zahlenwerten belegt, sondern enthalten Stichworte oder kurze Beschreibungen. Dadurch wird die Bewertung einzelner Anwendungsebenen vereinfacht. Die Bewertung der Aspekte wird durch dieses Vorgehen allerdings subjektiver, als bei einer Zuordnung zu numerischen Ausprägungswerten.

Der Werkzeugkasten Industrie 4.0 ist modular aufgebaut und macht es möglich, relativ einfach weitere Anwendungsebenen hinzuzufügen. Dadurch kann das Modell individuell auf den gewünschten Anwendungsfall angepasst werden. Die einzelnen Anwendungsebenen sind speziell auf die Produktion angepasst und geben einen guten Überblick über die wichtigsten Aspekte von Industrie 4.0 in produzierenden Unternehmen.

Industrie-4.0-Readiness-Modell

Das in Abschnitt 3.4 vorgestellte Industrie-4.0-Readiness-Modell soll Unternehmen im Themenfeld Industrie 4.0 unterstützen – es kombiniert ein Stufenmodell zur Bestimmung der Reifegradstufe und ein Kreismodell auf welchem die 6 Dimensionen mit insgesamt 18 Unterkategorien zur Ausprägungserfassung abgebildet sind. Das Stufenmodell kombiniert numerische Werte und kurze Beschreibungen zum erreichten Reifegrad. Der Vergleich verschiedener Unternehmen wird durch die Einheitlichkeit des Modells und den numerischen Charakter der Reifegradstufe ermöglicht. Das Industrie 4.0 Readiness-Modell ist ein in sich geschlossenes Modell, welches eine Anpassung der Dimensionen auf unternehmensspezifische Anforderungen nur schwer möglich macht.

Die vorgestellten Reifegradmodelle sind alle auf produzierende Unternehmen ausgelegt. Trotzdem fällt die Gestaltung der einzelnen Modelle sehr unterschiedlich aus. Der Industrie 4.0 Maturity Index und das Industrie-4.0-Readiness-Modell beinhalten beide ein Stufenmodell um den ermittelten Reifegrad abzubilden. Der Werkzeugkasten hingegen sieht sich als Orientierungshilfe und verzichtet völlig auf eine Reifegradbestimmung. Sowohl der Werkzeugkasten, als auch das Readiness-Modell sind modular aufgebaut und ermöglichen es, zusätzliche Aspekte hinzuzufügen. Von allen vorgestellten Modellen nutzt lediglich das Readiness-Modell eine Gewichtung von Aspekten. Alle drei Modelle verwenden, auch wenn nicht immer explizit benannt, eine Aufteilung in Ober- und Unterkategorien. Der Maturity Index bettet sich in ein

übergeordnetes Rahmenmodell ein, während die anderen Modelle auf eine solche Einbettung verzichten.

In Tabelle 3-1 sind die Modellaspekte zusammengefasst, welche für das in Kapitel 4 konzipierte Reifegradmodell Industrie 4.0 so oder in abgewandelter Form verwendet werden. Es handelt sich um Punkte, die mit Blick auf die Ziele (vgl. Kapitel 1), als besonders aussichtsreich angesehen werden.

Tabelle 3-1: Modellaspekte der vorgestellten Reifegradmodelle

Modellaspekt	Modell
Einordnung in den Ordnungsrahmen Produktion und Management	Industrie 4.0 Maturity Index
Aufbau der Reifegradstufen	Industrie-4.0-Readiness-Modell
Reifegrad-Kennwert-Matrix	Werkzeugkasten Industrie-4.0
Aufteilung in Ober- und Unterkategorien	Industrie-4.0-Readiness-Modell
Ordinalskalierte Indikatorausprägungen	Werkzeugkasten Industrie-4.0
Gewichtung der Reifegradindikatoren	Industrie-4.0-Readiness-Modell
Stufenmodell zur Einordnung nutzen	Industrie 4.0 Maturity Index Industrie-4.0-Readiness-Modell
Inhaltliche Ausgestaltung der Reifegradindikatoren	Werkzeugkasten Industrie 4.0 (primär) Industrie-4.0-Readiness-Modell Industrie 4.0 Maturity Index

3.6 Ordnungsrahmen Produktion und Management

Das Rahmenmodell, in welches das kombinierte Reifegradmodell dieser Arbeit (vgl. Kapitel 4) eingebettet wird, ist der "Ordnungsrahmen Produktion und Management" [SCHUH, G. 2011], der aus dem neuen St. Galler Management-Modell [RÜEGG-STÜRM, J. 2003] entstanden ist. Es soll dem Leser als Strukturierungshilfe dienen und einen Gesamtzusammenhang schaffen. Das gewählte Rahmenmodell ist speziell auf die Bedürfnisse produzierender Unternehmen angepasst, weshalb angenommen wird, dass die betrachteten Aspekte auch im Maschinen- und Anlagenbau Anwendung finden. Mit

dieser Vorgehensweise wird dem Vorbild des Industrie 4.0 Maturity Indexes (vgl. Abschnitt 3.2) gefolgt.

Der Ordnungsrahmen Produktion und Management ist entwickelt worden, um die relevanten Aspekte produzierender Unternehmen in einem kohärenten Gesamtzusammenhang abzubilden. Dazu wurden die Unternehmensprozesse auf die Prozesse produzierender Unternehmen übertragen und detailliert angepasst [SCHUH, G. 2011]. SCHUH [2011] unterteilt den Ordnungsrahmen in die *innerbetrieblichen Aspekte* auf den Flächenseiten des Würfels, die *Anspruchsgruppen* als Interaktionspartner mit der Außenwelt und die *Umweltsphären* als externe Einflussgrößen, die auf das Unternehmen wirken (vgl. Abbildung 3-6).

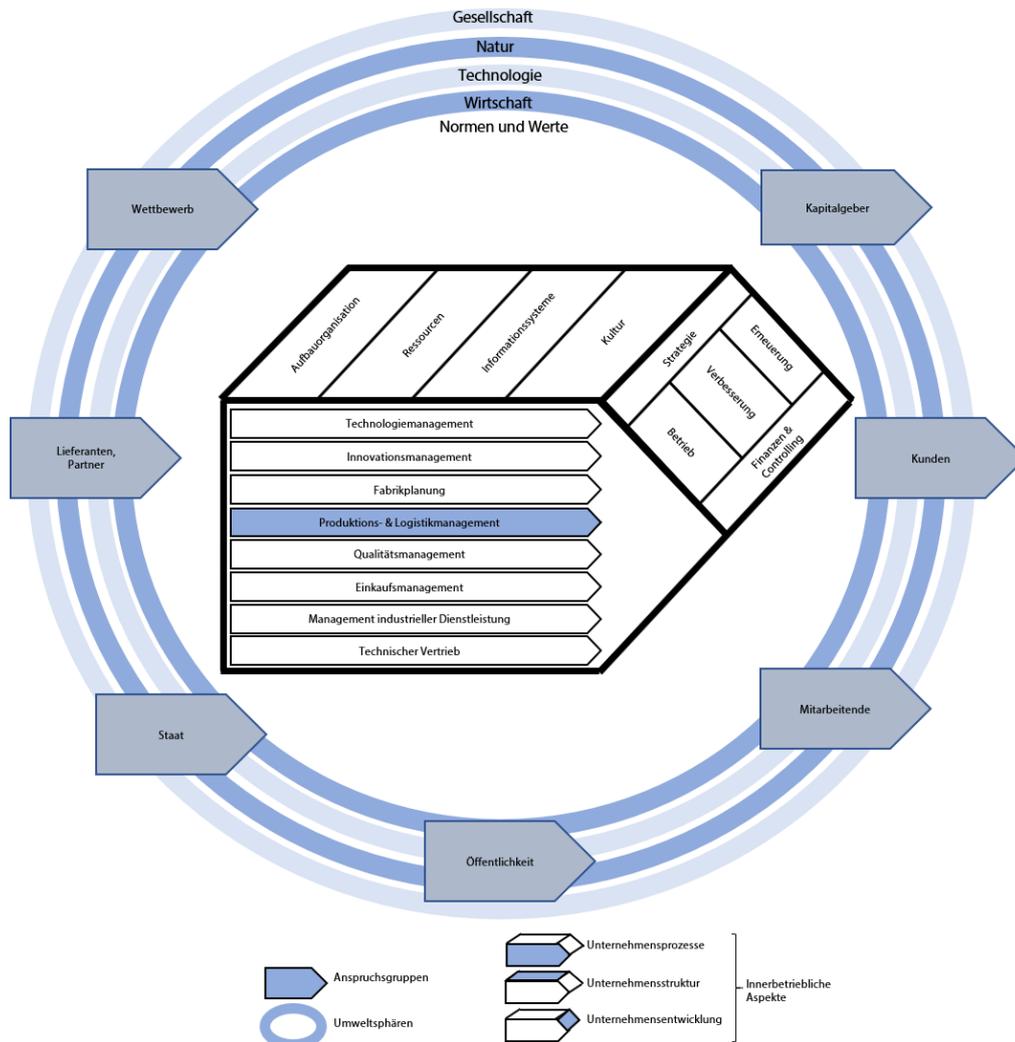


Abbildung 3-6: Ordnungsrahmen Produktion und Management [i. A. a. SCHUH, G. 2011, S. 2]

Die *Unternehmensprozesse* teilen sich im Ordnungsrahmen Produktion und Management in Geschäftsprozesse und technologische Prozesse auf. Während

Geschäftsprozesse immateriellen Input in immateriellen Output transformieren, wandeln technologische Prozesse materiellen Input in materiellen Output um [SCHUH, G. 2011, S. 3]. Das Untergebiet der Produktion beinhaltet sämtliche Aufgaben zur Gestaltung, Planung, Steuerung und Überwachung von Produktionssystemen und die betrieblichen Ressourcen Mensch, Maschine, Material und Information [SCHUH, G., et al. 2014, S. 1].

Die *Unternehmensstruktur* fasst die konstituierenden Elemente für ein Unternehmen zusammen. Dazu gehören die Aufbauorganisation, die eingesetzten Ressourcen, die Informationssysteme und die Unternehmenskultur (vgl. Abbildung 3-6). Der Bereich der Unternehmensentwicklung bildet sowohl die Unternehmensstrategie, als auch das strategische und operative Management eines Unternehmens ab [SCHUH, G. 2011, S. 1]. Die *Unternehmensentwicklung* kann als notwendige Bedingung für die Umsetzung von Industrie 4.0, angesehen werden. Sie kann dazu genutzt werden, einen Soll-Zustand mit Hinblick auf einen Industrie-4.0-Reifegrad zu definieren [SCHUH, G., et al. 2017, S. 46]. Elemente der Unternehmensstruktur und -entwicklung spielen in den meisten Reifegradmodellen für Industrie 4.0, die das gesamte Unternehmen abbilden, eine entscheidende Rolle. Diese Arbeit legt ihren Fokus allerdings auf die Produktion und geht deshalb nicht tiefer auf diese Elemente ein. Modelle wie der Industrie-4.0-Maturity-Index (vgl. Abschnitt 3.2) und das Industrie-4.0-Readiness-Modell (vgl. Abschnitt 3.4) haben einen weiter gefassten Fokus und beinhalten diese bereichsübergreifenden Aspekte [vgl. SCHUH, G., et al. 2017; LICHTBLAU, K., et al. 2015].

Die das Unternehmen umgebenden *Anspruchsgruppen* ziehen einen Nutzen aus dem Unternehmen und andersherum [SCHUH, G. 2011, S. 3]. Gruppen wie die Lieferanten, Mitarbeitern und die Kunden haben einen sehr direkten Einfluss auf produzierende Unternehmen. Aber auch andere Anspruchsgruppen sind relevant für Unternehmen. So bildet beispielsweise der Staat die rechtlichen Rahmenbedingungen, Kapitalgeber stellen die Finanzmittel und die Wettbewerber schaffen ein Marktgleichgewicht.

Die Anspruchsgruppen sind ein Teil der *Umweltsphären*, die das produzierende Unternehmen umgeben [SCHUH, G. 2011]. Die Umweltsphären haben sowohl eine direkte, als auch eine indirekte Wirkung auf die Anspruchsgruppen. Die Gesellschaft beeinflusst durch ihre große Reichweite alle anderen Sphären und hat so direkten Einfluss auf das ökologische Verständnis (Natur). Außerdem wirken sich Faktoren wie die wirtschaftliche Ordnung indirekt auf das Unternehmen aus.

4 **Entwicklung eines kombinierten Reifegradmodells**

Die vorgestellten, etablierten Reifegradmodelle (vgl. Kapitel 3) sind geeignet den Industrie-4.0-Umsetzungsstand von Unternehmen zu ermitteln. Um die Ziele (vgl. Kapitel 1) dieser Arbeit zu erreichen, ist es allerdings nötig, den Fokus weiter zu schärfen und explizit auf die Produktion einzugehen. Zu diesem Zweck werden die in Tabelle 3-1 vorgestellten Teilaspekte in einem kombinierten Reifegradmodell zusammengefasst und erweitert.

Das in diesem Kapitel konstruierte Modell dient der Industrie-4.0-Reifegradbestimmung in der Produktion von Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau. Basis folgender Ausführungen sind die in den Abschnitten 3.2 bis 3.4 vorgestellten Modelle. Zunächst wird in Abschnitt 4.1 das Reifegradmodell Industrie 4.0 in den Ordnungsrahmen Produktion und Management (vgl. Abschnitt 3.6) eingeordnet. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 4.2 das bei der Modellerstellung verwendete Vorgehen vorgestellt. Abschnitt 4.3 stellt die Ziele des Modells vor. Der Abschnitt der Modellkonstruktion ist in die Unterkapitel: 4.4 Reifegradstufen, 4.5 Reifegradindikatoren, 4.6 Gewichtung der Reifegraddimensionen und 4.7

Eine Zuordnung der Dimension *Produktionsprozesse* zu einem der Wort-Cluster nach HERMANN et al. [2016] ist auf Grund der Komplexität nur schwer möglich. Stattdessen wird die Dimension dem Begriff Smart Factory zugeordnet, welcher in einer Liste mit den meist genannten Begriffen, in praktischen Publikationen, bei HERMANN et al. [2016] erscheint.

Reifegrad-Kennwert-Matrix unterteilt. In Abschnitt 4.8 werden abschließend Maßnahmen zur Verbesserung der Reife vorgestellt.

4.1 Einordnung in den Ordnungsrahmen Produktion und Management

Das Reifegradmodell Industrie 4.0 findet in der Produktion im Maschinen- und Anlagenbau Anwendung. Daher lässt es sich dem Bereich der innerbetrieblichen Aspekte (vgl. Abbildung 3-6) auf den Flächenseiten des Würfels zuordnen und dabei innerhalb

der Komponente der Unternehmensprozesse in der Produktion verorten. Visualisiert findet sich die Einordnung innerhalb der Vorderseite des Würfels in blauer Farbe (vgl. Abbildung 4-1). Mit dieser Einordnung findet eine Abgrenzung zu den bereits vorgestellten Reifegradmodellen statt, welche sich vornehmlich auf die Bereiche Unternehmensstruktur, Unternehmensentwicklung und die Umweltsphären beziehen. Sie bieten dadurch eine makroskopische Sicht auf Unternehmen. Das in dieser Arbeit vorgestellte Modell hingegen ermöglicht durch seinen Fokus auf die Produktion eine detaillierte Sicht in einem einzelnen Unternehmensbereich. Da das Reifegradmodell in dieser Arbeit den Fokus auf die Industrie-4.0-Umsetzung der Produktion in Unternehmen des Maschinenbaus legt, werden im weiteren Verlauf die innerbetrieblichen Aspekte (Unternehmensprozesse, -struktur, -entwicklung) auf den Flächenseiten des Würfels weiter betrachtet. Die Anspruchsgruppen und Umweltsphären werden im betrachteten Zusammenhang nicht weiter behandelt.

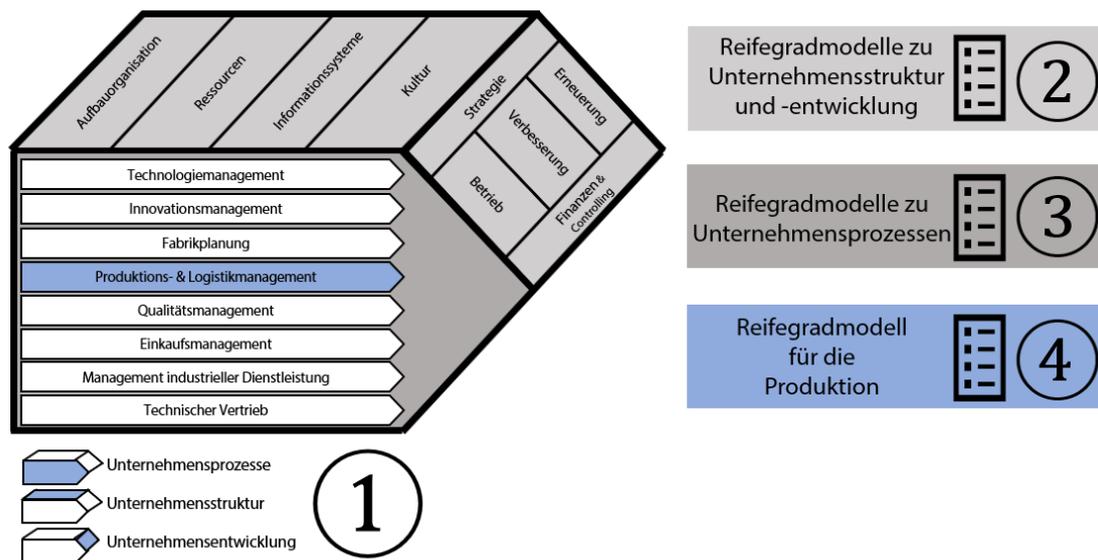


Abbildung 4-1: Gesamtzusammenhang des Reifegradmodells [i. A. a. SCHUH, G. 2011, S. 2]

Abbildung 4-1 visualisiert die Einordnung des vorliegenden Reifegradmodells in den betrieblichen Gesamtzusammenhang.

- ① Ausschnitt aus dem Ordnungsrahmen Produktion und Management. Die für diese Arbeit relevanten Aspekte sind in den Unternehmensprozessen verortet.
- ② In der vorliegenden Arbeit wird der Reifegrad der Produktion bestimmt. Um ein umfänglicheres Bild der Reife des gesamten Unternehmens zu erhalten, müssen neben den verschiedenen Unternehmensprozessen auch die Unternehmensstruktur und -entwicklung betrachtet werden. Dies wird als Gedankenanstoß in Kapitel 6 aufgegriffen.

③ Innerhalb der Unternehmensprozesse wird das erarbeitete Reifegradmodell der Subkategorie Produktions- und Logistikmanagement zugeordnet, wobei der Fokus auf der Produktion liegt.

④ Um die anderen Unternehmensprozesse hinsichtlich ihrer Reife für Industrie 4.0 zu untersuchen, kann das erarbeitete Reifegradmodell mit veränderten Dimensionen und Reifegradindikatoren genutzt werden. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch nur auf die Möglichkeit einer solchen Ausgestaltung verwiesen, ohne sie de facto zu realisieren. Der gewählte Betrachtungsrahmen dieser Arbeit liegt ausschließlich im Produktionsbereich.

Die Einordnung des Reifegradmodells in den Ordnungsrahmen Produktion und Management schafft einen fundierten Rahmen. Es wurde gezeigt, in welchem Verhältnis das hier vorgestellte Modell zu den Bereichen Unternehmensstruktur und -entwicklung steht und welche Zusammenhänge vorherrschen. Die Fokussierung auf die Produktion bietet den Vorteil detaillierter Analysemöglichkeiten. Gleichzeitig ist das Modell offen genug gehalten, um auch in anderen Unternehmensprozessen Anwendung finden zu können. Reifegradindikatoren können flexibel ausgetauscht und erweitert werden, ohne dass das Modell seine Gültigkeit verliert. Die nachfolgenden Kapitel behandeln die Konzeption des Reifegradmodells Industrie 4.0 sowie eine Sammlung von Maßnahmen zur Steigerung des Reifegrades in der Produktion.

4.2 Vorgehensweise zur Auslegung des Reifegradmodells

Die für diese Arbeit gewählte Vorgehensweise für den Aufbau des Reifegradmodells orientiert sich an der „Methodik zur Konzeption und Applikation anwendungsspezifischer Reifegradmodelle unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit“ [AKKASOGLU, G. 2013]. Die Auslegung des Reifegradmodells ist in der vorliegenden Arbeit in sieben Stufen unterteilt, welche sich den Phasen Vorbereitung und Konstruktion zuordnen lassen. Abbildung 4-2 visualisiert das Vorgehen:

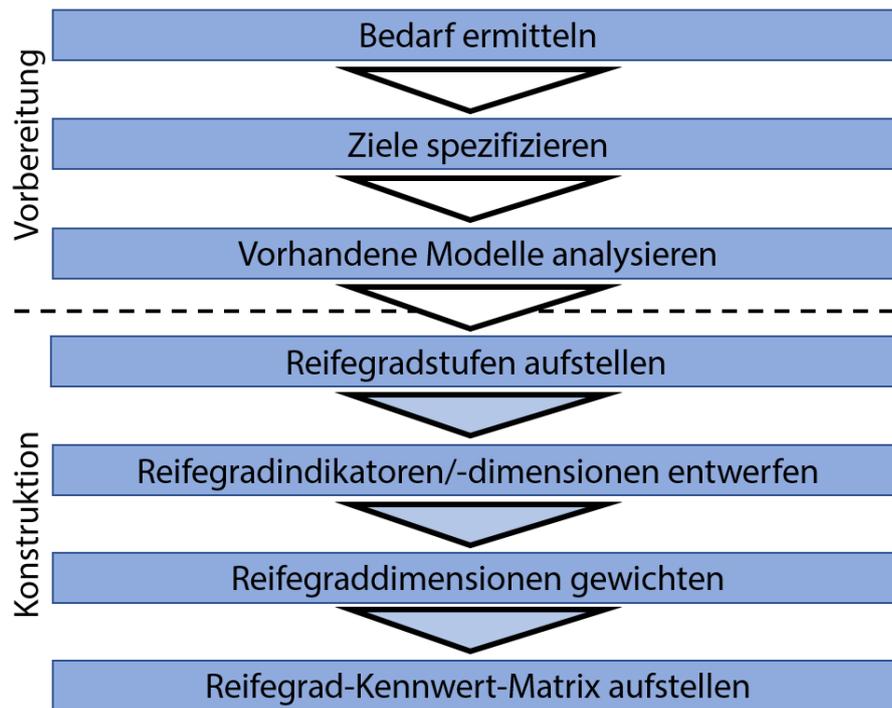


Abbildung 4-2: Auslegung von Reifegradmodellen [i. A. a. AKKASOGLU, G. 2013, S. 51]

Der Bedarf für ein Reifegradmodell leitet sich aus Kapitel 1 ab. Es unterstützt Unternehmen auf ihrem Weg von der Etablierung der Grundvoraussetzungen für Industrie 4.0 bis zur vollständigen Umsetzung [SCHUH, G., et al. 2017, S. 15].

Bereits etablierte Reifegradmodelle wurden in den Abschnitten 3.2 bis 3.4 vorgestellt und analysiert, sodass innerhalb der Phase Vorbereitung noch die Ziele an das Reifegradmodell spezifiziert werden müssen. Anschließend wird die Phase der Modellkonstruktion (vgl. Abschnitt 4.4 bis 4.7) betrachtet.

4.3 Ziele des Reifegradmodells Industrie 4.0

In Kapitel 1 wurde dargelegt, dass das vorliegende Reifegradmodell dieser Arbeit den Entwicklungsstand von Industrie 4.0 in Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus bestimmen soll. Der Fokus soll auf dem Entwicklungsstand von Industrie 4.0 im Bereich der Produktion liegen. Daraus leiten sich die folgenden Ziele des Reifegradmodells Industrie 4.0 ab:

- Das Reifegradmodell bewertet den aktuellen Umsetzungsstand von Industrie 4.0 im Bereich der Produktion.

- Das Reifegradmodell richtet sich an Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus.
- Das Reifegradmodell ist modular aufgebaut, sodass die Anzahl der Reifegradindikatoren angepasst werden kann, um unternehmensspezifische Aspekte mit aufzunehmen.
- Die gewählten Reifegradindikatoren decken das Themenfeld Industrie 4.0 mit Fokus auf die Produktion vollständig ab.
- Das Reifegradmodell deckt Dimensionen mit großem Entwicklungspotenzial auf.
- Die Einordnung des Reifegradmodells in den Gesamtzusammenhang des Unternehmens ist klar erkennbar.
- Das Reifegradmodell ist so gestaltet, dass die Anwendung ohne lange Einarbeitungszeit und ohne spezifisches Fachwissen möglich ist.

Die obenstehenden Ziele dienen als Leitfaden für die nachfolgende Konzeptionsphase.

4.4 Reifegradstufen

Den bislang vorgestellten Reifegradmodellen (vgl. Abschnitt 3.2 bis 3.4) folgend, wird in der vorliegenden Arbeit ein Stufenmodell zur Einordnung des Industrie-4.0-Reifegrades erstellt. Die Reifegradstufen sind so konzipiert, dass sie aufeinander aufbauen. Folglich geht die Erreichung einer Stufe mit der Erreichung der darunterliegenden Stufen einher. Die Ausgestaltung der Reifegradstufen orientiert sich am Vorgehen der Industrie-4.0-Readiness-Studie (vgl. Abschnitt 3.4). Folgende Entwicklungsstufen werden verwendet:

- Stufe 1: Außenstehend
- Stufe 2: Unerfahren
- Stufe 3: Fortgeschritten
- Stufe 4: Erfahren
- Stufe 5: Exzellent

Nachfolgend werden die Reifegradstufen kurz erläutert. Die Ausgestaltung der Stufen orientiert sich an LICHTBLAU et al.(2015):

Stufe 1: Außenstehend

Die Produktion von Unternehmen dieser Stufe erfüllt keine Anforderungen im Kontext von Industrie 4.0.

Stufe 2: Unerfahren

Für Unternehmen dieser Stufe ist das Themenfeld Industrie 4.0 noch weitgehend neu und unbekannt. Die Durchdringung der Produktion mit neuen Technologien ist sehr gering. Pilotprojekte mit geringem Investitionsvolumen erproben die Einsatzmöglichkeiten von Industrie 4.0. Der Maschinenpark dieser Unternehmen ist teilweise veraltet und erfüllt die Anforderungen an eine vernetzte, kommunikationsfähige Produktion nur sehr bedingt. Ein systemintegrierter Informationsaustausch findet noch nicht statt. Industrie 4.0 ist in allen Bereichen der Produktion nur unzureichend eingeführt, allerdings nähern sich Unternehmen dieser Stufe dem Themenfeld langsam an und sind offen für Veränderungen.

Stufe 3: Fortgeschritten

Unternehmen, die der Stufe 3 zugeordnet werden, haben die Bedeutung des Themenfeldes Industrie 4.0 erkannt. Sie fangen an, ihre Produktionen zu modernisieren und anzupassen. Die strategische Ausrichtung der Produktion geht auf die Einführung neuer Technologien und Ansätze ein. Entsprechende Kennzahlen werden bereits gesammelt und in geringem Ausmaß genutzt. Produktionsdaten werden zum Teil schon automatisiert erfasst und durch betriebsinterne Kommunikationsstrukturen weitergeleitet. Eine weiterreichende Implementierung von Industrie 4.0 ist an die Erweiterung, den Austausch oder eine Modernisierung des Maschinenparks gekoppelt.

Stufe 4: Erfahren

Erfahrene Unternehmen haben Industrie 4.0 als festen Bestandteil in ihre Strategie integriert. Das Innovationsmanagement fördert neue Projekte mit Bezug zu Industrie 4.0. Es stehen Maschine-Maschine- und Mensch-Maschine-Schnittstellen in den meisten Bereichen der Produktion zur Verfügung. Die Produktion ist so gestaltet, dass der Maschinenpark leicht erweitert werden kann und neue Maschinen problemlos an das bestehende Netzwerk angeschlossen werden können.

Stufe 5: Exzellent

Mit dem Erreichen der letzten Reifegradstufe hat ein Unternehmen die vollständige Integration von Industrie 4.0 in seine Produktion geschafft. Alle Bereiche sind vollständig miteinander vernetzt und bieten umfangreiche Kommunikationsmöglichkeiten. Daten werden automatisiert erhoben und verarbeitet. Die Produktion ist selbstständig in der

Lage, auf Veränderungen zu reagieren und sich flexibel anzupassen. Werkstücke sind in der Lage, ihren Produktionsprozess autonom zu steuern. Diese Stufe zeigt die Möglichkeiten einer vollständigen Industrie-4.0-Integration auf.

Die Reifegradstufen dieser Arbeit ermöglichen eine numerische Zuordnung zwischen der Ausprägung von Reifegradindikatoren und der resultierenden Industrie-4.0-Reife. Es wurden insgesamt fünf Abstufungen gewählt, um ein geeignetes Maß an Komplexität zu erhalten. Fünf Reifegradstufen sind leicht zu überblicken und bieten in der Anwendung Vorteile bei der Erfassung der Daten (vgl. Abschnitt 3.1).

Um die Produktion eines Unternehmens einem der vorgestellten Reifegrade zuzuordnen, wird in den folgenden Kapiteln eine Reifegrad-Kennwert-Matrix aufgestellt. Sie dient als Bewertungsbasis zur Ermittlung des Reifegrades. Die Einführung einer Gewichtung der einzelnen Dimensionen (vgl. Abschnitt 4.6) beruht auf dem Vorgehen der Industrie-4.0-Readiness-Studie (vgl. Abschnitt 3.4). In der vorliegenden Arbeit erfüllt diese Gewichtung die Aufgabe, branchenspezifische Unterschiede aufzufangen.

4.5 Reifegradindikatoren

Um den in Abschnitt 4.3 aufgeführten Zielen des Reifegradmodells gerecht zu werden, werden in diesem Abschnitt die entwickelten Reifegradindikatoren vorgestellt. Der Vorgehensweise zur Auslegung des Reifegradmodells (vgl. Abschnitt 4.2) folgend, ist es das Ziel der reifegradrelevanten Indikatoren, den Entwicklungsstand der Produktion aussagekräftig zu charakterisieren. Insgesamt wurden für das vorliegende Modell vierzehn Reifegradindikatoren definiert, welche zu fünf unterschiedlich großen Dimensionen zusammengefasst sind. Die Indikatoren jeder Dimension sind thematisch miteinander verwandt und werden in der Fachliteratur häufig zusammen genannt (vgl. Tabelle 2-1). In der Anwendung des Modells bietet diese thematische Zusammenfassung den Vorteil, dass Analysen oder Handlungsempfehlungen zu spezifischen Dimensionen möglich sind. Eine Gewichtung der übergeordneten Dimensionen bietet Unternehmen die Möglichkeit, gezielt einzelne Themengebiete je nach Branchenforderung oder anderen Spezifitäten zu gewichten (vgl. Abschnitt 4.6). Die nachfolgende Tabelle zeigt die gewählten Reifegradindikatoren und Dimensionen:

Tabelle 4-1: Reifegradindikatoren und Dimensionen

Dimension	Reifegradindikatoren
Cyber-physische Systeme	Identifikation
	Lokalisation
	Vernetzung
Kommunikation	Mensch-Maschine-Kommunikation
	Maschine-Maschine-Kommunikation
	Informations- und Kommunikationstechnologie in der Produktion
Daten	Sensorik / Aktorik
	Daten-Analyse
	Daten-Verwendung
	Daten-Speicherung
Kundenorientierte Prozesse	Effizienz bei kleinen Losgrößen
	Adaptionsfähigkeit
Produktionsprozesse	Planung & Steuerung
	Produktionsprozesse

Die Reifegradindikatoren leiten sich aus den vorgestellten Reifegradmodellen (vgl. Abschnitt 3.2 bis 3.4) und den in Abschnitt 2.1 vorgestellten Themenfeldern ab. Eine Übersicht über die verwendeten Quellen jedes Reifegradindikators befindet sich im Anhang (vgl. Anhang 1) dieser Arbeit.

Die Indikatoren sind sowohl nach den in Abschnitt 4.3 spezifizierten Zielen an das Modell, als auch nach den von AKKASOGLU [2013, S. 56] beschriebenen Anforderungen an Reifegradindikatoren (vgl. Abschnitt 3.1) entwickelt worden. Sie sind modular aufgebaut und bieten die Möglichkeit, einzelne Dimensionen und Reifegradindikatoren zu erweitern. Eine Veränderung der Dimensionen ist nur sinnvoll, wenn ein anderer Fokus als die Produktion gewählt werden soll. Durch die Unterteilung in übergeordnete Dimensionen ist es möglich, Teilgebiete mit besonders hohem Entwicklungspotential zu identifizieren.

Die Dimension *Cyber-physische Systeme* (CPS) ist eins der Kernelemente von Industrie 4.0 und bildet die Basis für fast alle weiterführenden Ansätze und Lösungen (vgl. Abschnitt 2.1 und Tabelle 4-1). Identifikation und Lokalisation sind dabei entscheidende Fähigkeiten eines CPS, welche besonders in der industriellen Produktion, aber auch in

logistischen Prozessen relevant sind. Der Indikator Vernetzung ist eine der Grundlagen für die anderen Dimensionen.

Kommunikation, genauer die Kommunikationsfähigkeit von Anlagen, ist ebenfalls eine Grundlage von Industrie 4.0 (vgl. Abschnitt 2.2). Der Übergang von Industrie 3.0 zu Industrie 4.0 kann nur gelingen, wenn Produktionsanlagen und -systeme in der Lage sind, Informationen und Daten untereinander auszutauschen.

Das Fundament aller Analysen, Berechnungen und Prognosen im Zeitalter von Industrie 4.0 bilden *Daten*. Aus diesem Grund wurden die Indikatoren zur deren Sammlung, Verwendung, Speicherung und Auswertung in einer Dimension zusammengefasst. Insbesondere Echtzeitdaten zu Produktionsanlagen, Werkstücken und Prozessen schaffen Klarheit über mögliche Probleme oder Schwierigkeiten. Sie ermöglichen ein frühzeitiges Eingreifen und Austauschen anfälliger Komponenten. In diesem Zusammenhang wird auch von präventiver Instandhaltung gesprochen.

Die Dimension *kundenorientierte Prozesse* bezieht sich auf die Prozesse, die von spontanen Änderungswünschen der Kunden betroffen sind. Externe Einflüsse, die ein geplantes Vorgehen unterbrechen oder stören, können in eng getakteten Produktionen zu Problemen führen. Die Effizienz im Umgang mit kleinen Losgrößen und die Anpassungsfähigkeit der Prozesse sind deshalb wichtige Eigenschaften der Produktion.

Die letzte Dimension – *Produktionsprozesse* – nimmt mit der Planung und Steuerung und den Produktionsprozessen zwei, für den Maschinenbau wichtige, Reifegradindikatoren in das Modell auf. Planung & Steuerung und die Produktionsprozesse können auch bei einem veralteten Maschinenpark mit Industrie-4.0-Maßnahmen verändert werden. Sie bieten dadurch eine gute Möglichkeit, erste Industrie 4.0 Anwendungen in die Produktion zu integrieren.

Unter den gewählten Reifegraddimensionen besteht, bedingt durch die Zugehörigkeit zum Themenfeld Industrie 4.0, eine gewisse Homogenität. Die Zusammenhänge sind in der untenstehenden Abbildung visualisiert.

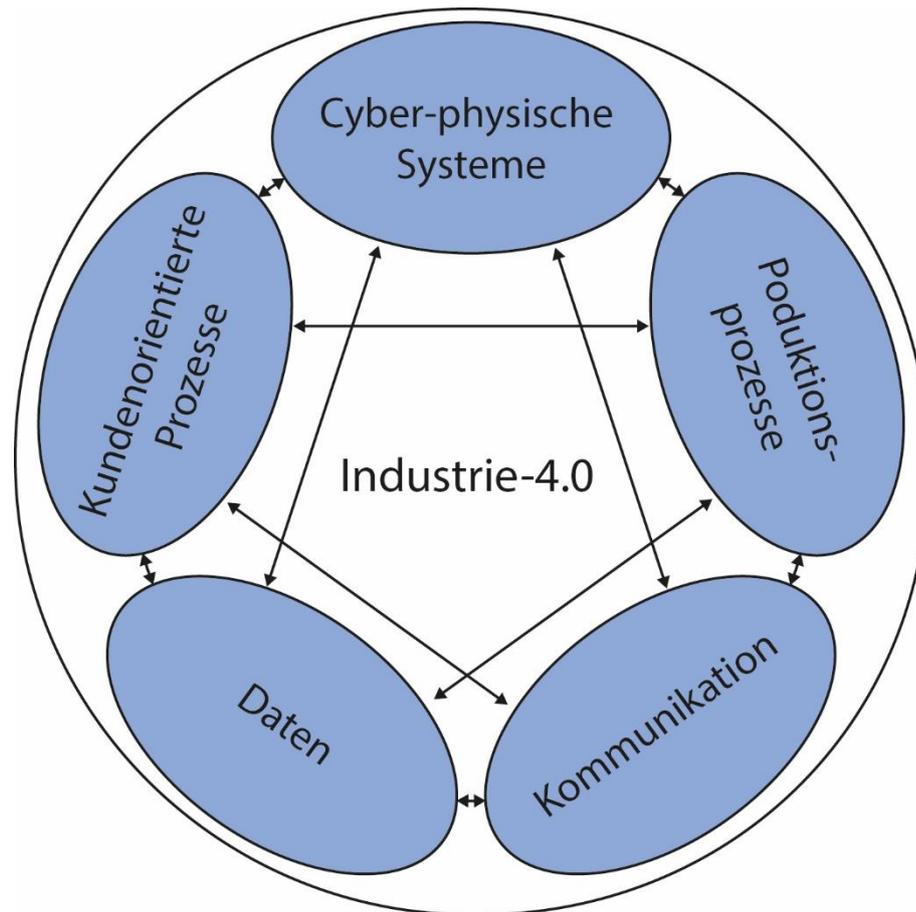


Abbildung 4-3: Zusammenhang der Reifegraddimensionen

4.6 Gewichtung der Reifegraddimensionen

Die Bedeutung der gewählten Reifegradindikatoren für den Unternehmenserfolg kann je nach Branche schwanken. Gleichzeitig sind die Reifegraddimensionen für Unternehmen von unterschiedlicher Bedeutung. Um eine zusätzliche Differenzierung der Ergebnisse für das betrachtete Unternehmen zu ermöglichen, wird eine Gewichtung der Reifegraddimensionen genutzt. Dieses Vorgehen lehnt sich an die Gewichtungen des Industrie-4.0-Readiness-Modells an (vgl. Abschnitt 3.4). Das gewählte Vorgehen bietet die Möglichkeit, nicht nur den Reifegrad für die gesamte Produktion zu ermitteln, sondern detaillierter auch Reifegrade einzelner Dimensionen auszuwerten.

Eine unternehmensspezifische Gewichtung bringt den Vorteil mit sich, dass Unternehmen die Dimensionen hervorheben können, die besonders erfolgskritisch in ihrer Branche sind. Jedoch würde so die Vergleichbarkeit des ermittelten Reifegrades teilweise verloren gehen. Um dies zu kompensieren, wird im weiteren Verlauf eine standardisierte Gewichtung der Reifegraddimensionen auf Basis ausgewählter

Fachliteratur entwickelt. Ein Vergleich der unternehmensspezifischen Gewichte, mit den hier ermittelten Gewichten, kann Aufschluss über die Unterschiede zwischen der unternehmerischen Realität und bisherigen Forschungsergebnissen liefern.

Die Gewichtung der Reifegraddimensionen wird mit Hilfe einer endpunktbenannten numerischen Skala von 1 bis 6 erfasst. Die Ausprägung 1 bedeutet, dass die Dimension von sehr geringer Bedeutung für das Unternehmen ist, während die Ausprägung 6 eine sehr hohe Bedeutung widerspiegelt. Es wurde eine gerade Anzahl an Ausprägungen gewählt. Eine gerade Anzahl an Antwortmöglichkeiten zwingt den Befragten eine Tendenz zu wählen und verhindert, dass die Skalenmitte als Ausweichoption gewählt wird [Franzen, A. 2014, S. 706].

Die Gewichtung der Reifegraddimensionen in Tabelle 4-2 bildet einen Vergleichswert, der anhand aktueller Forschung ermittelt wurde (vgl. Abschnitt 3.1). Mit ihrer Arbeit zum Thema Gestaltungskriterien schaffen HERMANN et al. [2016] eine Grundlage für die Gewichtung der hier vorgestellten Dimensionen. Die Forscher haben die Veröffentlichungen aus fünf Publikationsdatenbanken auf die Nennung vorher definierter Begriffe und Wortstämme im Themenfeld Industrie 4.0 analysiert, wobei zwischen akademischen und praktischen Publikationen differenziert wurde. Das Ergebnis ist eine Liste, in der die Wortstämme zu Clustern zusammengefasst sind. Diese Liste enthält ebenfalls die Anzahl der Nennungen von Wortstämmen und Clustern in den Publikationen. Die Häufigkeit der Begriffsnennungen in den praktischen Publikationen wird für diese Arbeit als Hauptindikator für die Wichtigkeit des Themenfeldes genutzt. Eine thematische Zuordnung der Dimensionen aus Abschnitt 4.5 mit den Wort-Clustern von HERMANN et al. [2016] führt zu den in Tabelle 4-2 gegebenen Gewichtungen.

Tabelle 4-2: Gewichtungen der Reifegraddimensionen

Dimension	Zugehörige Wort-Cluster	Resultierender Gewichtungswert
CPS	‚Decentralized Decisions‘	3
Kommunikation	‚Interconnection‘	4
Daten	‚Data Analytics‘	5
Kundenorientierte Prozesse	‚Standards‘	3
Produktionsprozesse	‚Smart Factory‘	4

Eine Zuordnung der Dimension *Produktionsprozesse* zu einem der Wort-Cluster nach HERMANN et al. [2016] ist auf Grund der Komplexität nur schwer möglich. Stattdessen wird die Dimension dem Begriff Smart Factory zugeordnet, welcher in einer Liste mit den meist genannten Begriffen, in praktischen Publikationen, bei HERMANN et al. [2016] erscheint.

4.7 Reifegrad-Kennwert-Matrix

Die Reifegrad-Kennwert-Matrix ist zentrales Element vieler Reifegradmodelle (vgl. Abschnitt 3.1). Abbildung 4-4 zeigt den schematischen Aufbau der Reifegrad-Kennwert-Matrix. Zur Bildung der Matrix wurden zunächst in Abschnitt 4.4 die Reifegradstufen definiert. Der Anzahl der Reifegradstufen entsprechend, sind Anforderungen zu jedem Reifegradindikator aufgestellt worden. Das gewählte Vorgehen orientiert sich an AKKASOGLU (vgl. Abschnitt 4.2), welcher für Sub-Indikatoren (in diesem Fall die Reifegradindikatoren) qualitative Beschreibungen als Merkmale vorschlägt. AKKASOGLU [2013] und ANDERL et al. [2015] (vgl. Abschnitt 3.3), nutzen ähnliche qualitative Ausprägungsbeschreibungen für die Indikatoren.

		Reifegradstufen Steigende Anforderungen					
Dimension	Sub-Indikator	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	...	Stufe m	Gew.
1	1.1	Anforderungen an 1.1 in Stufe 1	Anforderungen an 1.1 in Stufe 2	Anforderungen an 1.1 in Stufe 3	...	Anforderungen an 1.1 in Stufe m	...
	1.2	Anforderungen an 1.2 in Stufe 1	Anforderungen an 1.2 in Stufe 2	Anforderungen an 1.2 in Stufe 3	...	Anforderungen an 1.2 in Stufe m	
2	2.1	Anforderungen an 2.1 in Stufe 1	Anforderungen an 2.1 in Stufe 2	Anforderungen an 2.1 in Stufe 3	...	Anforderungen an 2.1 in Stufe m	...
	2.2	Anforderungen an 2.2 in Stufe 1	Anforderungen an 2.2 in Stufe 2	Anforderungen an 2.2 in Stufe 3	...	Anforderungen an 2.2 in Stufe m	
n	n.1	Anforderungen an n.1 in Stufe 1	Anforderungen an n.1 in Stufe 2	Anforderungen an n.1 in Stufe 3	...	Anforderungen an n.1 in Stufe m	...
	n.2	Anforderungen an n.2 in Stufe 1	Anforderungen an n.2 in Stufe 2	Anforderungen an n.2 in Stufe 3	...	Anforderungen an n.2 in Stufe m	

Abbildung 4-4: Aufbau der Reifegrad-Kennwert-Matrix [i. A. a. AKKASOGLU, G. 2013, S. 58]

Für jeden Reifegradindikator sind fünf ordinalskalierte Ausprägungsstufen definiert worden. Beispielhaft wird im Folgenden der Reifegradindikator Identifikation der Dimension Cyber-physische Systeme näher betrachtet. Die Reifegrad-Kennwert-Matrix ist so zu lesen, dass die Industrie-4.0-Reife des jeweiligen Indikators von links nach rechts zunimmt: Auf Stufe 1 ist eine geringe und auf Stufe 5 die maximale Industrie 4.0 Umsetzung erreicht. Die fünf Ausprägungsstufen sind mit den fünf Reifegradstufen verknüpft (vgl. Abschnitt 4.4).

		Reifegradstufen Steigende Anforderungen					
Dimension	Indikator	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Gew.
Cyber-physische Systeme	Identifikation	Keine eindeutige Identifikationsmöglichkeit	Eindeutige Identitätsmerkmale; nicht maschinell lesbar	Maschinell lesbare Identität mit menschlicher Aktivität	Teilautomatisierte, maschinell lesbare Identität ohne menschliche Aktivität	Autonome Identifikation in Echtzeit im gesamten Prozess	3
	1.2	

Abbildung 4-5: Reifegrad-Kennwert-Matrix zum Indikator Identifikation

Der Reifegradindikator Identifikation deckt das in Abschnitt 2.2 vorgestellte Konzept der Identifikation im Produktionsprozess ab. Je größer die Durchdringung der Produktion mit Industrie 4.0, desto automatisierter und echtzeitnäher werden die Möglichkeiten der Identifikation. Die erste Stufe ist gegeben, wenn keine Verfahren zur Identitätsbestimmung zur Verfügung stehen. Objekte besitzen keine eindeutig zuweisbare Identität. Auf Stufe zwei besitzen Objekte lesbare Identitätsmerkmale wie beispielsweise Anhängzetteln mit Identifikationsnummern. Eine maschinelle Auslesung dieser Identitäten ist jedoch nicht möglich. Mit den nächsten Stufen nimmt die Automatisierbarkeit immer weiter zu. Identitätsmerkmale wie zweidimensionale Codes

(bspw. QR-Codes) und RFID (vgl. Abschnitt 2.2) ermöglichen maschinelle Lesbarkeit bei eindeutiger Identifizierbarkeit. Der Indikator Identität ist der Dimension Cyber-physisches System zugeordnet, weil die Möglichkeiten zur Identifizierung sowohl zu den Voraussetzungen als auch zu den Treibern einer erfolgreichen Industrie 4.0 Strategie gehören [JODLBAUER, H. et al. 2016, S. 1477; acatech 2011, S. 15].

Abbildung 4-6 zeigt die vollständige Reifegrad-Kennwert-Matrix des erarbeiteten Reifegradmodells Industrie 4.0. Die inhaltliche Ausgestaltung der Reifegrad-Kennwert-Matrix wurde durch die Arbeiten von LICHTBLAU et al. (vgl. Abschnitt 3.4), ANDERL, R. et al. (vgl. Abschnitt 3.3) und AKKASOGLU (vgl. Abschnitt 3.1) beeinflusst.

		Reifegradstufen Steigende Anforderungen					
Dimension	Indikator	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Gew.
Cyber-physische Systeme	Identifikation	Keine eindeutige Identifikationsmöglichkeit	Eindeutige Identitätsmerkmale; nicht maschinell lesbar	Maschinell lesbare Identität mit menschlicher Aktivität	Teilautomatisierte, maschinell lesbare Identität ohne menschliche Aktivität	Autonome Identifikation in Echtzeit im gesamten Prozess	3
	Lokalisation	Keine Lokalisationsmöglichkeit	Grobe Verfahren zur Standortbestimmung	Spezifische Lokalisation in übergeordneten Prozessen	Detaillierte Lokalisation in einzelnen Unterprozessen	Autonome Lokalisation in Echtzeit im gesamten Produktionsprozess	
	Vernetzung	Keine Vernetzung der Produktion mit Informationssystemen	Informationsaustausch nur persönlich (Mail/Telefon)	Einheitliche Datenformate und Regeln zum Datenaustausch	Vernetzung der Produktionsanlagen mit Datensystemen	Produktionsübergreifend, vollständig vernetzte IT-Lösungen	
Kommunikation	Mensch-Maschine-Kommunikation	Kein Informationsaustausch möglich	Einsatz lokaler Anzeigegeräte	Zentrale Produktionsüberwachung und -steuerung	Einsatz mobiler Produktionsüberwachung	Einsatz tragbarer Computersysteme und alle vorhergehenden	4
	Maschine-Maschine-Kommunikation	Keine Kommunikation	Feldbus-Schnittstellen	Industrial Ethernet-Schnittstellen	Industrial Ethernet und Zugang zum Internet	Industrial Ethernet in Kombination mit Web- und Clouddiensten	
	Informations- und Kommunikationstechnologie in der Produktion	Informationsaustausch nur persönlich (Mail/Telefon)	Nutzung zentraler Datenserver	Internetbasierte Portale mit gemeinsamer Datennutzung	Automatisierter Informationsaustausch	Zulieferer/Kunden sind vollständig in die Kommunikation integriert	
Daten	Sensorik / Aktorik	Keine Nutzung von Sensoren/Aktoren	Einbindung von Sensoren zur Datenerfassung	Erfassung und Verarbeitung von Sensordaten	Nutzung von Sensordaten zu Analyse Zwecken	Autonome Reaktion von Aktoren auf Basis von Sensordaten	5
	Daten-Analyse	Keine Datenanalyse	Auswertung einzelner Produktionsdaten mit menschlicher Aktivität	Teilautomatisierte Datenanalyse einzelner Kennwerte	Prozessübergreifende automatisierte Datenanalyse	Dezentralisierte integrierte Datenanalyse	
	Daten-Verwendung	Keine Ausnutzung vorhandener Daten	Speicherung von Daten zur Dokumentation	Prozessüberwachung auf Basis von Datenauswertung	Prognosefähigkeit und Prozessplanung durch Datenauswertung (predictive maintenance)	Prozesssimulation mit Hilfe von Digitalen Zwillingen	
	Daten-Speicherung	Keine Prozessdatenspeicherung	Lokale und isolierte Datenspeicherung	Daten werden zentral gespeichert	Daten werden dezentral im Netzwerk gespeichert; besserer Datenzugang	Daten stehen den Teilnehmern der Wertschöpfungskette in der Cloud zur Verfügung	
Kundenorientierte Prozesse	Effizienz bei kleinen Losgrößen	Starre Produktionslose; geringer Anteil an Gleichteilen	Nutzung von flexiblen Produktionsmitteln und Gleichteilen	Einsatz flexibler Produktionsmittel und modularer Baukästen	Bauteiltriebene, flexible Produktion variierender Losgrößen	Bauteiltriebene, modulare Produktion von Kleinstmengen	3
	Adaptionsfähigkeit	Keine Möglichkeit zur Anpassung der Produktionsprozesse	Prozesse sind kaum anpassbar - starre Produktion	Prozesse sind anpassbar mit langen Rüstzeiten	Prozesse sind flexibel und können zwischen Schritten angepasst werden	Prozesse können in Echtzeit flexibel angepasst werden	
Produktionsprozesse	Planung & Steuerung	Keine Planung & Steuerung der Produktion	Starre Planung & Steuerung der Produktion ohne Anpassungsmöglichkeiten	Planung & Steuerung auf Basis von Auftrags- und historischen Daten	Anpassungsfähige Planung & Steuerung unter Einbezug von Echtzeitdaten	Automat. Planung auf Basis von Simulationen; Intelligente Produkte steuern ihre Produktion	4
	Produktionsprozesse	Starre, unflexible Produktionsprozesse	Standardisierte Produktionsprozesse	Modulare Produktionsprozesse; Baukastenprinzip	Einsatz anpassbarer, flexibler Prozesse und softwaregestützter Simulation	Intelligente Fabrik; Produkt steuert Produktion; Einsatz digitaler Zwillinge	

Abbildung 4-6: Reifegrad-Kennwert-Matrix

Auf Grundlage der bisherigen Überlegungen kann der Gesamt-Reifegrad der Produktion wie in Tabelle 4-3 gezeigt, berechnet werden.

Tabelle 4-3: Berechnung des Gesamt-Reifegrades

Ist-Ausprägung	Gewicht	Hilfsspalte
I_1	G_1	$H_1 = \frac{G_1}{\sum_{i=1}^n G_i}$
I_2	G_2	$H_2 = \frac{G_2}{\sum_{i=1}^n G_i}$
...
I_n	G_n	$H_n = \frac{G_n}{\sum_{i=1}^n G_i}$
$Gesamt - Reifegrad = \sum_{i=1}^n (I_i * H_i)$		

Die Dimensions-Gewichte werden dazu als Indikator-Gewichte übernommen und es wird eine Hilfsspalte erzeugt, welche das prozentuale Gewicht jedes einzelnen Indikators bestimmt. Die Summe über das Produkt der Ausprägungswerte mit dem prozentualen Gewicht ergibt dann den Gesamt-Reifegrad. In der Berechnung der Dimensions-Reifegrade werden die Gewichte außer Acht gelassen, weil alle Indikatoren innerhalb einer Dimension gleich betrachtet werden. Deshalb sind die Dimensions-Reifegrade gleich dem Mittelwert der Indikator-Ausprägungswerte.

Mit der Aufstellung der Reifegrad-Kennwert-Matrix ist die Phase der Modellkonstruktion abgeschlossen (vgl. Abbildung 4-2). Das Ergebnis der beiden Phasen Vorbereitung und Konstruktion ist ein Referenzmodell, durch welches der Industrie-4.0-Reifegrad der Produktion in Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus bestimmt werden kann. Zentrales Element dieses Modells ist die Reifegrad-Kennwert-Matrix. Auf welche Weise aus den Ist-Ausprägungswerten die Dimensions-Reifegrade und der Gesamt-Reifegrad werden, wurde in Abschnitt 4.5 dargelegt. Die Reifegradstufen zur Einordnung des numerischen Reifegradwertes sind in Abschnitt 4.3 vorgestellt worden. Zusammen ergeben die konstruierten Komponenten das Reifegradmodell Industrie 4.0. Das entwickelte Reifegradmodell Industrie 4.0 bildet das Themenfeld Industrie 4.0 in der

Produktion vollständig ab. Es wurde gezeigt, nach welchem Vorgehen das vorliegende Modell entwickelt und konzipiert wurde und wie die einzelnen Teile aufgebaut sind. Auf Grundlage dieser Konzeption lässt sich abschließend die Forschungsfrage F1) beantworten.

4.8 Maßnahmen zur Verbesserung der Reife

Das in dieser Arbeit entwickelte Reifegradmodell bildet die Grundlage, die es Unternehmen ermöglicht, ihre Produktion im Bereich Industrie 4.0 weiterzuentwickeln. Das Modell hilft dabei den aktuellen Umsetzungsstand von Industrie 4.0 in der Produktion zu ermitteln. Durch die Möglichkeit, einzelne Dimensionen in der Produktion gesondert auszuwerten, werden ausbaufähige Bereiche, die ein hohes Entwicklungspotenzial bieten, aufgedeckt. Die so geschaffene Basis ermöglicht es Unternehmen, gezielt an der Weiterentwicklung ihrer Produktion zu arbeiten. Unternehmen sind in der Lage diese Informationsgrundlage zu nutzen und in einer sich anschließenden Kreativitätsphase individuelle Lösungen zu erarbeiten [ANDERL, R. et al. 2015, S. 22]. Die Kreativitätsphase wird in der vorliegenden Arbeit nicht vertieft – die Grundlagen wurden allerdings kurz erläutert.

Zuerst ist es nötig, den Industrie- 4.0-Reifegrad der Produktion mit Hilfe des entwickelten Modells (vgl. Abschnitt 4.1 – 4.7) zu ermitteln. Das Unternehmen muss darauf aufbauend Ideen entwickeln, wie einzelne Dimensionen oder Indikatoren weiterentwickelt werden können (vgl. Abschnitt 3.3). Der St. Galler Business Model Navigator kann dabei ein hilfreiches Werkzeug sein (vgl. Abbildung 3-4 und ANDERL, R. et al. [2015]). In Anlehnung an den Werkzeugkasten Industrie 4.0 (vgl. Abschnitt 3.3) wurde das folgende Beispiel an den Fokus im Maschinen- und Anlagenbau angepasst und soll das beschriebene Vorgehen verdeutlichen:

Beispiel zur Ideenfindung mit Hilfe des Reifegradmodells Industrie 4.0

Die Ermittlung der Ist-Situation eines Indikators mit Hilfe des Reifegradmodells ist der erste Schritt bei der Ideenfindung:

Ein gewöhnliches Maschinenbauteil besitzt eine eindeutige Identifikationsmöglichkeit,

welche jedoch nicht maschinell ausgelesen werden kann – beispielsweise einen Anhängenzettel mit einer Identifikationsnummer.

Reifegradindikator	Industrie 4.0				
Identifikation	Keine eindeutige Identifikationsmöglichkeit	Eindeutige Identitätsmerkmale; nicht maschinell lesbar	Maschinell lesbare Identität mit menschlicher Aktivität	Teilautomatisierte, maschinell lesbare Identität ohne menschliche Aktivität	Autonome Identifikation in Echtzeit im gesamten Prozess

Abbildung 4-7: Ist-Situation des Reifegradindikators Identifikation

Während der Ideenfindung werden daraufhin die nächsten Entwicklungsschritte betrachtet, um einen Zielzustand zu ermitteln. Eine Idee wäre beispielsweise, dass ein RFID-Tag (vgl. Abschnitt 2.2) mit Identitätsinformationen am Bauteil befestigt wird. Dadurch könnte die Identität an bestimmten Stellen im Prozess mit Hilfe von RFID-Gates (vgl. Abschnitt 2.2) teilautomatisiert ermittelt werden.

Identifikation	Keine eindeutige Identifikationsmöglichkeit	Eindeutige Identitätsmerkmale; nicht maschinell lesbar	Maschinell lesbare Identität mit menschlicher Aktivität	Teilautomatisierte, maschinell lesbare Identität ohne menschliche Aktivität	Autonome Identifikation in Echtzeit im gesamten Prozess
----------------	---	--	---	---	---

Abbildung 4-8: Soll-Zustand des Indikators Identifikation

Bei der Ausarbeitung der Idee wird der St. Galler Business Model Navigator (vgl. Abbildung 3-4) genutzt.

Was ist der Nutzen?

- Die teilautomatisierte Identifizierung von Bauteilen ermöglicht erhöhte Genauigkeit in der Nachverfolgung
- Zeitersparnis durch den Wegfall menschlicher Aktivität
- Vermeidung von Fehlern

Wie wird Leistung erstellt?

- Integration eines RFID-Tags in geeignete Maschinenelemente
- Speicherung von Identitätsmerkmalen auf dem RFID-Tag

Wie wird Wert generiert?

- Umsatzsteigerung durch erhöhte Attraktivität der Maschinenelemente für den Kunden
- Zeitersparnis bei der Identifikation der Teile

Wer ist der Zielkunde?

- Hersteller von Produktionsanlagen
- Die Produktionslinie des Unternehmens

Das Beispiel zeigt, wie Ideen, die auf Grundlage des Reifegradmodells Industrie 4.0 entstanden sind, weiterentwickelt werden können. Allerdings ist die Verbesserung eines Indikators nicht für jedes Objekt sinnvoll. Einzelne Schrauben und andere Kleinteile werden auch in absehbarer Zukunft ohne Identitäts- und Lokalisationsmöglichkeit auskommen können [ANDERL, R. et al. 2015, S. 16]. Deshalb ist wichtig, dass die generierten Ideen am Ende des Prozesses auf ihre Umsetzbarkeit geprüft werden. Der generierte Mehrwert muss größer sein, als der betriebene Aufwand.

Maßnahmen zur Verbesserung der Industrie-4.0-Reife

Dem obenstehenden Beispiel folgend, sind Unternehmen in der Lage ihren Industrie-4.0-Reifegrad zu verbessern und neue Ideen für die Weiterentwicklung ihrer Produktion zu generieren. Maßnahmen sollten sich immer an der jeweiligen Ist-Situation in der Produktion orientieren. Die nachfolgende, allgemein gehaltene, Auflistung möglicher Maßnahmen soll als Gedankenanstoß und Ideenkatalog gesehen werden. Die Auflistung der Maßnahmen beantwortet somit die Forschungsfrage F2).

Cyber-physische Systeme – Identifikation

Die Identifikation im Produktionsprozess kann automatisiert oder teilautomatisiert über RFID-Tags (vgl. Abschnitt 2.2) oder den Einsatz zweidimensionaler Codes (vgl. Abschnitt 2.2) erfolgen. Je komplexer die zu speichernden Informationen, desto komplexer sollte auch das eingesetzte Speichermedium sein. Durch den Einsatz von Scannern (automatisiert oder händisch) vor Bearbeitungsschritten können Informationen abgerufen werden, welche die Bearbeitungshistorie und weitere Arbeitsschritte enthalten.

Cyber-physische Systeme – Lokalisation

Ähnlich wie die Identifikation kann auch die Lokalisation mit Hilfe von RFID-Tags gelöst werden [acatech 2011]. Dazu ist es allerdings nötig vor und nach jedem Bearbeitungsschritt die Standortinformationen zu aktualisieren. Weiterentwickelte Lösungsmöglichkeiten sind der Einsatz von GPS-Transpondern oder eine Ortung über W-LAN-Triangulation. Dazu ist jedoch ein umfangreiches und unter Umständen kostenintensives Infrastrukturnetz notwendig. Ein Mindestmaß an Lokalisationsfähigkeit kann erreicht werden, indem bei jedem Ein- und Auslagerungsvorgang der neue Standort im System hinterlegt wird. Voraussetzung hierfür ist die Identifizierbarkeit des Objektes.

Cyber-physische Systeme – Vernetzung

Das Ziel der Vernetzung ist die vollständige Integration Cyber-physischer Systeme (vgl. Abschnitt 2.1). Wenn keine Vernetzung in der Produktion vorliegt, bildet die Computerisierung der Produktionsanlagen die Basis für jegliche weiterreichende Vernetzung. Anlagen müssen in der Lage sein, an das Firmennetzwerk angeschlossen zu werden um elementare Prozessdaten auslesen zu können. Eine weitreichende Vernetzung räumlich getrennter Produktionsanlagen erfordert außerdem eine durchgängige Standardisierung der Wertschöpfungskette, um mit der zunehmenden Komplexität fertig zu werden.

Kommunikation – Mensch-Maschine-Kommunikation

Den ersten Schritt bei der Umsetzung von Mensch-Maschine-Schnittstellen bilden in vielen Fällen lokale Anzeigegeräte an Produktionsanlagen. Die Bedienoberflächen sind jedoch häufig veraltet und wenig anwenderfreundlich [ANDERL, R. et al. 2015, S. 15]. Der Einsatz mobiler Bedientechnologien wie Tablets, Smartphones, Datenbrillen oder Datenhandschuhen (vgl. Abschnitt 2.2) führt zu einer vereinfachten Bedienung und mehr Flexibilität der Mitarbeiter. Es geht darum, die richtigen Informationen am richtigen Ort in geeigneter Weise bereitzustellen, um Mitarbeiter zu entlasten und die Produktionseffizienz zu steigern.

Kommunikation – Maschine-Maschine-Kommunikation

Die Schnittstellen zwischen Maschinen sind für einen automatisierten Datenaustausch besonders wichtig. Sie bilden die Grundlage vielfältiger Industrie 4.0 Anwendungen. Der Einsatz von Feldbus-, Industrial Ethernet- und Internet-Schnittstellen erhöht den Grad der Vernetzung und dadurch die verfügbaren Möglichkeiten (vgl. Abschnitt 2.1). Insbesondere die Anbindung an das Internet bietet den Vorteil der Trennung von Informationen und Standort. Ziel ist es, den autonomen Informationsaustausch zwischen Maschinen zu ermöglichen.

Kommunikation – Informations- und Kommunikationstechnologien in der Produktion

Die Infrastruktur von Informations- und Telekommunikationstechnologien in der Produktion ist maßgebend für die Umsetzung innovativer Anwendungen und die

Verbesserung von Abläufen (vgl. 2.1). Der Einsatz von internetbasierten Portalen zum Austausch von Informationen macht Abläufe vom Standort unabhängig. Zentrale Datenserver helfen, den Zugang zu Informationen zu standardisieren. Der automatisierte Informationsaustausch innerhalb der Produktion und mit externen Partnern der Wertschöpfungskette, stellt das Ziel dieses Indikators dar.

Daten – Sensorik / Aktorik

Als eine der Kernideen von Industrie 4.0 und von Cyber-physischen Systemen stellt die Integration von Sensoren und Aktoren die Basis für viele weitere Anwendungen dar. Sensoren stellen den Informationsinput zur Verfügung, während Aktoren auf Basis dieser Daten reagieren. Den ersten Schritt bei der Einführung dieser Technologie stellt die Nutzung von Sensoren zur Datenerfassung dar. Eine mögliche Weiterentwicklung ist die Verarbeitung von Sensordaten direkt am Objekt. Je komplexer jedoch die eingesetzte Sensorik, desto kostenintensiver ist auch die Einführung. Gesammelte Sensordaten müssen analysiert und auf ihren potenziellen Nutzen hin untersucht werden. Das Ziel bilden Anlagen, die basierend auf Sensordaten autonom reagieren können.

Daten – Daten-Analyse

Die Analyse von Prozessdaten bietet die Möglichkeit, Probleme aufzudecken und Verbesserungspotenziale zu erkennen. Ein grundlegender Schritt ist die Analyse der Daten durch den Menschen. Nachteile dieses Vorgehens sind die vergleichsweise hohe Fehleranfälligkeit und die geringe Datenmenge, die händisch bearbeitet werden können. Eine kostengünstigere Alternative ist die automatisierte Verarbeitung von Datensätzen. Nur so können die anfallenden Datenmengen überhaupt bewältigt werden. Integrierte Softwarelösungen oder cloudbasierte Webdienste sind Möglichkeiten mit Big-Data umzugehen (vgl. Abschnitt 2.1).

Daten – Daten-Verwendung

Nicht nur die Analyse, sondern auch die Art und Weise, wie gewonnene Daten verwendet werden, ist für eine erfolgreiche Industrie 4.0 Umsetzung entscheidend [ANDERL, R. et al. 2015, S. 15]. In klassischen Produktionssystemen werden die gesammelten Daten häufig nur zur Dokumentation genutzt. Um allerdings schnell auf auftretende Probleme reagieren zu können, ist es sinnvoll, die Daten auch zur Prozessüberwachung und -vorhersage zu nutzen. Digitale Zwillinge (vgl. Abschnitt 2.1) bieten die Möglichkeit,

Produktionsvorgänge im Vorfeld zu simulieren. Sie bilden Produktionsanlagen oder Werkstücke digital ab und sind somit Datenspeicher, Prognosetool und Informationslieferant in einem.

Daten – Daten-Speicherung

Wie und wo Informationen gespeichert werden, beeinflusst die Effektivität der Produktion. Um eine hohe Flexibilität und Bereitschaft in der Produktion zu erzielen, ist es nötig, dass alle berechtigten Teilnehmer der Wertschöpfungskette auf relevante Informationen zugreifen können. Ein erster Schritt kann die zentrale Speicherung von Informationen im Firmennetzwerk sein. Um auch andere Teilnehmer der Wertschöpfungskette einzubringen, ist die Nutzung von Internetdiensten und Cloudanwendungen nötig. Eine mögliche Lösung könnte ist der Ansatz der gläsernen Supply Chain, bei der die Beteiligten der Lieferkette Einblicke in die Abläufe erhalten.

Kundenorientierte Prozesse – Effizienz bei kleinen Losgrößen

Die Effizienz, mit der kleine Losgrößen bearbeitet werden können, kann durch die Nutzung von Industrie 4.0 verbessert werden. Die Einführung von Gleichteilen ist ein wichtiger erster Schritt um kürzere Durchlauf- und Rüstzeiten zu erzielen. Flexible Produktionsmittel und ein modularer Aufbau der Produktionsanlagen steigern die Anpassungsfähigkeit der Produktion. Der Endzustand ist erreicht, wenn es gelingt, Kleinmengen in einer bauteilgetriebenen und modularen Produktion bei geringen Rüst- und Durchlaufzeiten zu fertigen. Ein Extremfall, der besonders im Sonderanlagenbau zum Tragen kommt, ist die Fertigung mit Losgröße 1 (vgl. Abschnitt 2.1). Um dies zu realisieren, muss schon früh im Prozess angesetzt werden. Kunden sollten in der Lage sein, über einen Konfigurator selbstständig einen Produktionsauftrag zu erstellen. Ist diese Softwarelösung in der Lage einen Fertigungsauftrag, aus dem kundengenerierten Auftrag, ohne menschliches Zutun zu generieren, kann viel Zeit eingespart werden. Wichtigster Faktor in der Realisierung kleiner Losgrößen ist eine funktionierende und effiziente Softwarelandschaft.

Kundenorientierte Prozesse – Adaptionfähigkeit

Die Anpassungs- oder Adaptionfähigkeit von Prozessen ist entscheidend, um mit kurzfristigen Änderungswünschen der Kunden umzugehen. Je individueller und kundenbezogener die Produkte, desto größer ist auch die Gefahr kurzfristiger

Änderungen. Neben diesem Problem können auch Maschinenausfälle oder Materialbereitstellungsprobleme zum Produktionsstillstand in eng getakteten Fertigungen führen. Um dem entgegenzuwirken, kann beispielsweise eine Werkstattfertigung angewandt werden, bei der Maschinen mit gleichen Aufgaben gebündelt werden. Sind die eingesetzten Anlagen kommunikationsfähig, können Aufträge flexibel verschoben und an anderen Stationen gefertigt werden. Um auf Kundenänderungen reagieren zu können, ist eine Vernetzung der Konstruktion mit der Fertigung entscheidend. Fertigungsaufträge müssen in Echtzeit angepasst und aktualisiert werden können. Dazu ist es sinnvoll, in Richtung der papierlosen Fertigung zu arbeiten. Nur so können Änderungen in Echtzeit umgesetzt werden.

Produktionsprozesse – Planung & Steuerung

Die Planung und Steuerung der Produktion sollte in den meisten Unternehmen bereits vorhanden sein. Um wirtschaftlich planen zu können, ist es eine Option historische Daten zu nutzen, um Prognosen für die Zukunft zu erstellen. Diese Prognosen helfen in der langfristigen Planung. Kurzfristig kann nur mit Auftragsdaten effektiv geplant werden. Ist die Produktion bereits mit Sensorik und einer automatischen Datenerfassung ausgestattet, können ebenfalls Echtzeitdaten mit in die Planung und Steuerung einbezogen werden. Ziel sollte es sein, so viele Daten wie möglich in die Planung und Steuerung zu integrieren um eine fundierte Basis für zukünftige Entscheidungen treffen zu können.

Produktionsprozesse – Produktionsprozesse

Die Anpassungsfähigkeit und die Gestaltung von Produktionsprozessen sind wichtige Merkmale einer Fertigung. Modulare Produktionsprozesse können durch den Einsatz des Baukastenprinzips geschaffen werden. Die standardisierte Produktion mit fest getakteten Abläufen ist zu unflexibel für zukünftige Herausforderungen. Eine Lösung, um Produktionsprozesse auf mögliche Probleme vorzubereiten, ist der Einsatz von Simulationssoftware. So können im Vorfeld alle geplanten Bearbeitungsschritte digital getestet werden, um frühzeitig auf Probleme aufmerksam zu machen. Eng damit verknüpft ist das Konzept der digitalen Zwillinge (vgl. Abschnitt 2.1). Diese können eingesetzt werden, um Produktionspläne und -simulationen direkt mit dem Objekt zu verknüpfen und jederzeit abrufbar zu machen.

5 Evaluation an einem Praxisbeispiel

In den vorangegangenen Kapiteln wurden sowohl die Grundlagen des Themenfeldes Industrie 4.0 in der Produktion, als auch die Besonderheiten des Maschinen- und Anlagenbaus vorgestellt (vgl. Kapitel 2). Im zweiten Schritt wurden bereits etablierte Reifegradmodelle des Themenkomplexes vorgestellt und verglichen (vgl. Kapitel 3). Darauf aufbauend wurde ein kombiniertes Reifegradmodell Industrie 4.0 entwickelt, welches die Industrie-4.0-Reife der Produktion in Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus ermitteln kann (vgl. Kapitel 4). Nun soll das entwickelte Modell an einem passenden Praxisbeispiel evaluiert werden. Dazu wird zunächst ein Beispielunternehmen vorgestellt und ein Untersuchungsobjekt definiert. Das entwickelte Modell wird in der Fertigung des Untersuchungsobjektes angewandt. Im Rahmen dieser Anwendung wird der Ist-Zustand im Bereich der Industrie-4.0-Reife in der Produktion bestimmt, um Aussagen über die Anwendbarkeit des Modells machen zu können. Danach wird ein Soll-Zustand definiert, über welchen die Lücke zum Ist-Zustand analysiert werden kann. Im Rahmen einer GAP-Analyse (Lückenanalyse) wird eine Liste möglicher Maßnahmen zur Schließung der Lücke ermittelt. Die erzielten Ergebnisse werden mit Befunden aus der Forschung verglichen, um Aussagen über die Güte des Modells treffen zu können.

5.1 Vorstellung des Beispielunternehmens

Das Beispielunternehmen (im weiteren Verlauf verkürzend Unternehmen genannt) ist ein weltweit agierender Hersteller von Abfüll- und Verpackungsanlagen für die Getränke-, Nahrungsmittel- und Nicht-Nahrungsmittel-Industrie. Die Unternehmensgeschichte ist geprägt durch eine Vielzahl von Fusionen und Übernahmen, wodurch die Standorte gewachsene Prozesse und Fertigungsanlagen aufweisen. Das betrachtete Unternehmen beschäftigt rund 5000 Mitarbeiter und erwirtschaftet einen jährlichen Umsatz von 1,1 Mrd. Euro.

Das Unternehmen produziert sein gesamtes Portfolio an Abfüll- und Verpackungsmaschinen an fünf deutschen Produktionsstandorten. Dabei sind an den einzelnen Standorten verschiedene Kompetenzen gebündelt. Im weiteren Verlauf wird insbesondere der Standort betrachtet, an welchem sich das Zentrum für Reinigungs-, Pasteur-, Inspektions- und Transporttechnik befindet. Neben den fünf deutschen

Standorten bilden Standorte in Indien, China, Brasilien, Mexiko und den USA das globale Produktionsnetzwerk des Unternehmens.

5.2 Untersuchungsobjekt: Etikettiermaschinen

Die Eignung des entwickelten Reifegradmodells Industrie 4.0 wird anhand der Produktion von Etikettiermaschinen untersucht. Dazu wird zunächst das Untersuchungsobjekt mit seinen Besonderheiten vorgestellt. Anschließend wird mit Hilfe des entwickelten Modells der Ist-Zustand des Reifegrades ermittelt.

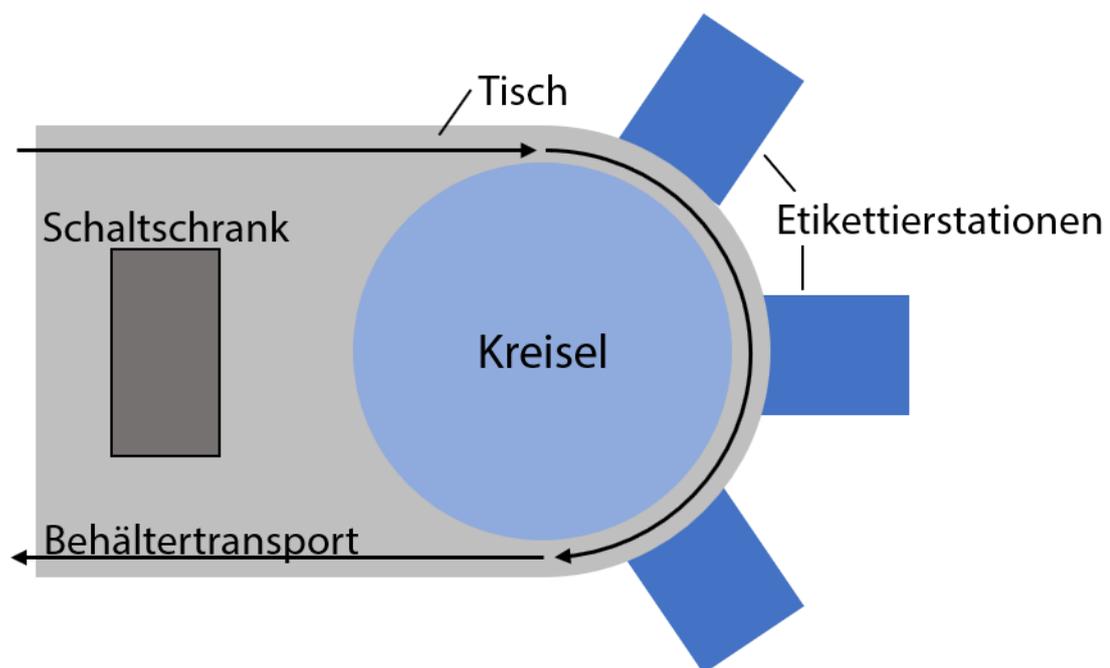


Abbildung 5-1: Schematischer Aufbau einer Etikettiermaschine

Untersuchungsobjekt

Das gewählte Untersuchungsobjekt ist die Fertigung einer Etikettiermaschine. Durch den modularen Aufbau und die Möglichkeit verschiedene Etikettierstationen anzubringen, kann die Anlage an die Bedürfnisse jedes Kunden angepasst werden. Abbildung 5-1 zeigt eine mögliche Konfiguration einer Etikettiermaschine mit drei Etikettierstationen. Es handelt sich um eine baukastenbasierte Systemlösung für die verschiedenen Etikettier-Verfahren. Dabei können die Klebehöhen und Positionen der Etiketten individuell an die benötigten Behälter angepasst werden. Eine Etikettiermaschine besteht prinzipiell aus vier Teilen (vgl. Abbildung 5-1): dem Tisch, einem Kreisel, einer oder mehrerer Etikettierstationen und einem elektrischen Schaltschrank. Der Tisch ist dabei die Basis

der Maschine. Darauf aufbauen ist der Kreisel über einer Mittelsäule montiert. Der Kreisel führt die Behälter zu den einzelnen Etikettierstationen, welche seitlich an den Tisch angedockt werden. Die Steuerung der Anlage wird über den am Tisch montierten elektrischen Schaltschrank abgewickelt. Zur Etikettierung laufen die Behälter in den Kreisel ein und werden von diesem an den einzelnen Etikettierstationen vorbeigeführt. Dort werden die Etiketten nach einem der nachfolgenden Verfahren verklebt.

Je nach Anwendungsfall gibt es dabei verschiedene Möglichkeiten, einen Behälter mit Etiketten zu versehen. Das Unternehmen bietet vier verschiedene Möglichkeiten der Klebung an:

- Selbstklebend
- Kaltleim
- Rollfeld
- Heißleim

Bei der *Selbstklebe-Etikettierung* werden zugeschnittene, selbstklebende Etiketten auf einem Etikettenträgerband als Rolle eingesetzt. In der Anlage wird das Trägerband über eine Kante gezogen, sodass der Behälter das Etikett aufnehmen kann. Die Selbstklebe-Etikettierung wird aufgrund der aufwendigen Etiketten hauptsächlich bei Premiumprodukten eingesetzt.

Das *Kaltleim-Verfahren* findet bei Mehrwegbehältern aus Glas oder Kunststoff vermehrt Anwendung, da der eingesetzte Klebstoff sich in Reinigungsanlagen leicht lösen lässt. Bei der Kaltleim-Etikettierung werden zugeschnittene Papieretiketten eingesetzt, die mit einem wasserbasierten Leim versehen auf die Behälter aufgebracht werden.

Rollfeld-Etiketten hingegen werden als durchgängiges Etikettenband bereitgestellt, welches erst in der Etikettierstation auf Länge geschnitten wird. Die zugeschnittenen Etiketten werden dann durch eine Rotationsbewegung um den Behälter gewickelt und überlappend mit geringen Mengen eines Schmelzklebstoffs verklebt. Dieses Verfahren wird bei Ein- und Mehrwegbehältern aus PET, Glas oder bei Dosen verwendet.

Bei der *Heißleim-Etikettierung* werden ähnlich wie im Kaltleim-Verfahren zugeschnittene Papier- oder Kunststoffetiketten verwendet. Diese werden über ein Etikettenmagazin zugeführt und direkt mit dem Behälter verklebt. Zu den Hauptanwendungsgebieten zählen Glaskonserven und Dosen in der Nahrungsmittelindustrie sowie verschiedene Kunststoffbehälter.

Der Behälterdurchsatz einer solchen Etikettiermaschine liegt bei bis zu 75.000 Behältern pro Stunde bei Kaltleim und bis zu 60.000 Behältern pro Stunde bei den anderen Klebverfahren.

Fertigung der Etikettiermaschinen

Der Fokus der Reifegradbetrachtungen im vorliegenden Unternehmen liegt auf den Bereichen der Montage und Inbetriebnahme (IBN) der Etikettiermaschine. Dieser Fokus wurde gewählt, weil die Montage und IBN Kernkompetenzen des Unternehmens im Feld der Etikettiermaschinen darstellen und zusätzlich eine der wesentlichen Tätigkeiten von Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau widerspiegeln. In der Montage werden alle Einzelkomponenten der Anlage zusammengebaut und zusammengeführt. Die IBN ist dafür zuständig, die Maschinen entweder im Werk und/oder beim Kunden in Betrieb zu nehmen und zu testen.

Die Montage der Etikettiermaschine ist in Form einer getakteten Linienmontage mit Vormontageplätzen aufgebaut. Abbildung 5-2 zeigt den Aufbau der Fertigungshalle:

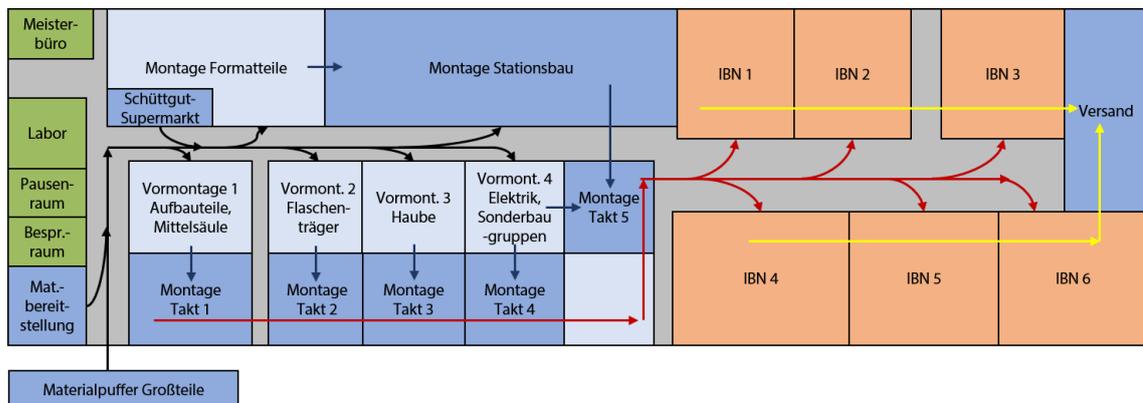


Abbildung 5-2: Getaktete Linienmontage der Etikettiermaschinen

Um die Durchlaufzeiten gering zu halten, werden die Etikettierstationen und die Grundmaschine parallel gefertigt. Im oberen Bereich der Halle findet die Montage der Etikettierstationen statt. Darunter wird die Montage der Grundmaschine in fünf Takten vorgenommen. An Vormontageplätzen (hellblau) werden die Einzelkomponenten vormontiert, die in den Takten 1 – 5 zur Grundmaschine zusammengebaut zu werden. Die Etikettierstationen und die Grundmaschine werden an einem der sechs Inbetriebnahmeplätze (hellrot) verheiratet und auf die Anforderungen des Kunden eingestellt. Die Schaltschränke werden direkt zum Inbetriebnahmeplatz angeliefert und dort montiert. Nachdem die Anlage vollständig eingestellt und getestet wurde, kommt sie

in den Versandbereich, um dort verpackt zu werden.

Im ganzen Fertigungsprozess befindet sich die Anlage auf einer Luftkissenplattform. Sie kann dadurch relativ leicht von Takt zu Takt bewegt werden. So entsteht eine Taktstraßenmontage mit stationären Arbeitsplätzen und bewegbaren Montageobjekten.

5.3 Industrie 4.0 im Beispielunternehmen

Die bisherigen Bemühungen des Unternehmens im Themenfeld Industrie 4.0 zeigen sich in einer Reihe von Pilotprojekten, in denen sich dem Thema angenähert wird. Dies spiegelt die Situation, wie sie bei einem Großteil der deutschen Maschinen- und Anlagenbauer vorherrscht, wider. Im betrachteten Unternehmen fehlt es jedoch an einer unternehmensweiten Einführung, da bisher neue Verfahren, Technologien und Ideen ausschließlich in einzelnen Bereichen oder Abteilungen als Pilot getestet werden. Die Verantwortung für Digitalisierungs- und Industrie-4.0-Projekte liegt im betrachteten Unternehmen in den einzelnen Verantwortungsbereichen – es fehlt eine zentrale Anlaufstelle, welche die Kompetenzen zu Industrie 4.0 bündelt.

Zu den Industrie-4.0-Projekten, welche das Unternehmen bereits beschreitet, zählen insbesondere Konzepte der Produktionslinien-Überwachung und der präventiven **Instandhaltung**. **Bereits marktreif sind beispielsweise das „Mensch-Maschine-Interface“**, welches direkt an der Anlage eine Auskunft über den Maschinenstatus geben kann und **die „Everywhere“-Applikation** (eine Anwendung für Mobiltelefone, welche jederzeit über den Status der eingesetzten Anlagen informiert). Andere Anwendungen befinden sich noch in der Entwicklung. Es handelt sich dabei beispielsweise um Anwendungen zur präventiven Instandhaltung der Anlagen. Um diese Projekte zu realisieren, wird ebenfalls an der Implementierung von RFID Formateilen und anderen Systemanpassungen gearbeitet.

Der Fokus der genannten Projekte liegt hauptsächlich auf der Produktseite und dem Servicegeschäft des Unternehmens. Die Konkurrenzsituation in der Branche und wachsende Anforderungen von den Kunden sind die primären Treiber dieser Industrie-4.0-Bemühungen. Ein geringerer Stellenwert kommt der Digitalisierung der eigenen Produktionsanlagen und -prozesse zu. Allerdings laufen auch in diesem Bereich Pilotprojekte, wie beispielsweise der Einsatz von 3D-PDF und die Erprobung neuer Rückmeldesysteme. Zu den Hemmnissen bei der Umsetzung von Industrie 4.0 in diesen

Bereichen zählen der Mangel an Fachkräften und ein Mangel finanzieller Mittel. Dies führt dazu, dass in erster Linie die Produktseite, welche direkt mit dem Erfolg des Unternehmens verbunden ist, betrachtet wird.

Insgesamt ist die Industrie-4.0-Ausrichtung des Unternehmens aktuell eher reaktiv als proaktiv. Das Vorgehen wird hauptsächlich von den Forderungen der Kunden bestimmt und die eigene Produktion spielt eine untergeordnete Rolle. Trotzdem gibt es bereits Pläne für die Realisierung, sowohl auf der Prozess-, als auch auf der Produktseite. Zukunftsträchtige Themen liegen bei der additiven Fertigung, dem Cloud-Computing, durchgängiger IT-Systeme, dem Einsatz automatisierter Rückmeldesysteme, der Nutzung von Augmented Reality in der Montage und ganz besonders in der präventiven Instandhaltung.

5.4 Anwendung des entwickelten Reifegradmodells

Ziel dieses Abschnitts ist es, dass in dieser Arbeit entwickelte kombinierte Reifegradmodell Industrie 4.0 (vgl. Kapitel 4) im beschriebenen Kontext anzuwenden. Die zu erwartenden Ergebnisse sind der Gesamtreifegrad der Etikettiermaschinen-Montage und die Einzelreifegrade der betrachteten Dimensionen (vgl. Abschnitt 4.5).

Zur Datenerhebung wird im vorliegenden Fall ein teilstrukturiertes Leitfadeninterview genutzt (vgl. Anhang 2). Eine leitfadengestützte Gesprächsführung hat den Vorteil, dass sie dem thematischen Fokus des Betrachtungsfeldes gerecht wird [LIEBOLD, R. et al. 2009, S. 39]. Die befragten Experten liefern Informationen, Hintergrundwissen und Rahmendaten zum betrachteten Forschungsvorhaben – ihr Kontextwissen hilft so bei der Validierung des entwickelten Modells [LIEBOLD, R. et al. 2009, S. 47]. Als Experte, im Sinne des teilstrukturierten Leitfadeninterviews, werden diejenigen Personen angesehen, die mit Blick auf das spezifische Forschungsthema relevantes Wissen beizutragen haben [LIEBOLD, R. et al. 2009, S. 34].

Die Fragen des Leitfadeninterviews sind nach den in Abschnitt 4.5 vorgestellten Dimensionen und Indikatoren ausgelegt (vgl. Anhang 2). Ziel dabei ist es, die Ausprägungsstufen jedes Indikators sowie die Gewichtung der Dimensionen zu erfassen. Die Befragung selbst ist in fünf Teile unterteilt, welche sich nach den betrachteten Dimensionen richten. Am Ende jedes Teils besteht die Möglichkeit, Anmerkungen zur jeweiligen Dimension hinzuzufügen. Dadurch sollen die Befragten die Chance haben,

Besonderheiten oder Probleme hervorzuheben, welche Auswirkungen auf das Ergebnis haben könnten.

Wie bereits erläutert, ist der vorliegende Betrachtungsrahmen die Produktion der Etikettiermaschinen. Deshalb handelt es sich bei den Befragten um Mitarbeiter und Führungskräfte, die in direktem Kontakt zum Betrachtungsobjekt stehen.

Beschreibung der Ist-Situation

Bei den Ergebnissen handelt es sich um Mittelwerte aus der Datenerhebung. Die Ist-Ausprägungen können Werte zwischen 1 und 5 annehmen, während die Gewichtung Werte zwischen 1 und 6 erreichen kann (vgl. Abschnitte 4.5 und 4.6). Die exemplarisch durchgeführte Datenerhebung bei Mitarbeitern und Führungskräften hat die nachfolgenden Ergebnisse geliefert (vgl. Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Ergebnisse der Datenerhebung

Dimensionen	Indikatoren	Ist-Ausprägung	Gewichtung
Cyber-physische Systeme	Identifikation	2,8	4,50
	Lokalisation	2,5	
	Vernetzung	2,8	
Kommunikation	Mensch-Maschine-Kommunikation	2,7	4,33
	Maschine-Maschine-Kommunikation	1,3	
	Informations- und Kommunikationstech. in der Produktion	2,7	
Daten	Sensorik / Aktorik	1,5	5,25
	Daten-Analyse	2,8	
	Daten-Verwendung	2,8	
	Daten-Speicherung	3,3	
Kundenorientierte Prozesse	Effizienz bei kleinen Losgrößen	3,0	4,75
	Adaptionsfähigkeit	3,3	
Produktionsprozesse	Planung & Steuerung	2,7	5,33
	Produktionsprozesse	2,7	

Abbildung 5-3 stellt die Ergebnisse aus Tabelle 5-1 graphisch dar. Die Ist-Ausprägungswerte sind in einem Spinnendiagramm dargestellt. Dabei repräsentieren die

numerischen Ausprägungswerte die qualitativen Beschreibungen der Antwortskala (vgl. Kapitel 3 und Abbildung 4-6).

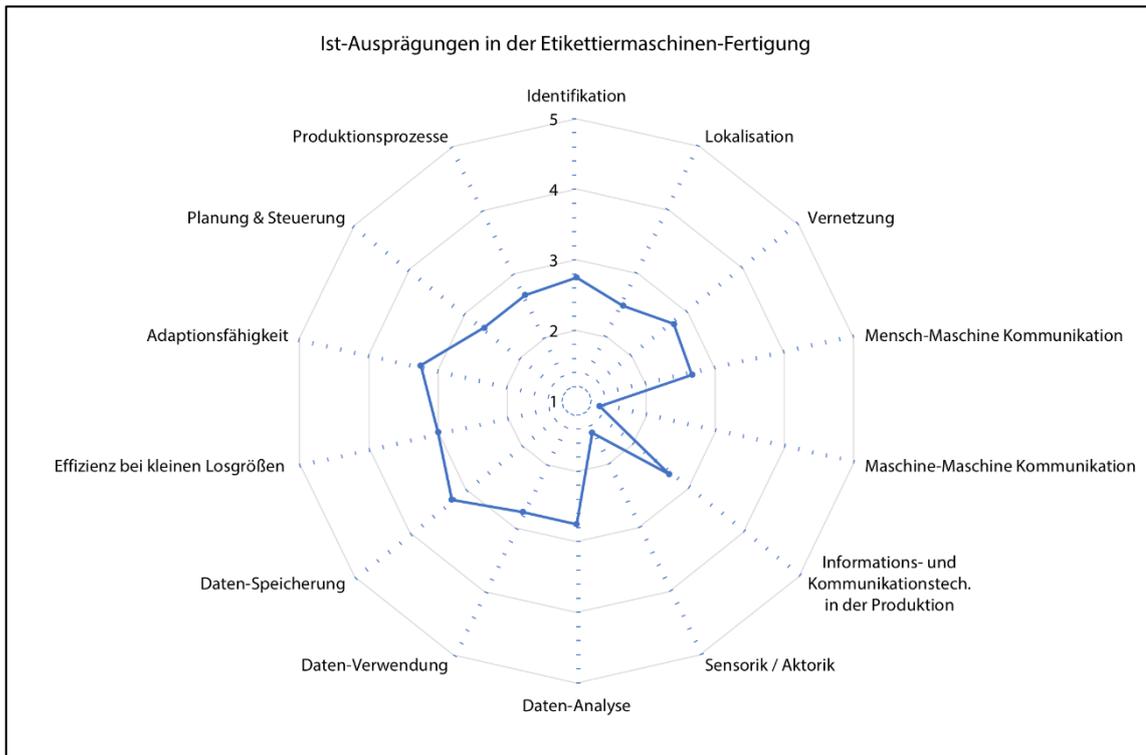


Abbildung 5-3: Ausprägungen der Indikatoren

Aus den erhobenen Ist-Ausprägungswerten der Indikatoren werden, nach den in Abschnitt 4.6 und Tabelle 4-3 vorgestellten Verfahren, die Dimensions-Reifegrade und der Gesamtreifegrad der Produktion bestimmt. Das Ergebnis der Berechnungen ist in Tabelle 5-2 aufgeführt.

Der mithilfe des erarbeiteten Modells ermittelte Reifegrad der Etikettiermaschinen-Montage beträgt 2,62. Damit fällt die betrachtete Produktion in die Stufe *Unerfahren* – Stufe 2 (vgl. Abschnitt 4.4). Die durchschnittliche Gewichtung einer Dimension beträgt 4,83 (von 6).

Tabelle 5-2: Dimensions-Reifegrade

Dimension	Gewichtung	Reifegrad der Dimension
Cyber-physische Systeme	4,50	2,67
Kommunikation	4,33	2,22
Daten	5,25	2,56
Kundenorientierte Prozesse	4,75	3,13
Produktionsprozesse	5,33	2,67
Gesamt-Reifegrad mit Einbeziehen der Gewichtungen		2,62

Beschreibung der Soll-Situation

Der Soll-Zustand der Etikettiermaschinen-Fertigung wird anhand der Dimensions-Gewichtungen ermittelt. Die Gewichtungswerte bilden eine geeignete Grundlage, um Aussagen über die Zielsituation (Soll-Zustand) zu treffen. Um die Gewichtungswerte im Sinne eines Soll-Zustandes nutzen zu können, ist es nötig, die 6-stufige Gewichtungsskala in das 5-stufige Format der Ausprägungswerte zu überführen (vgl. Tabelle 5-3). Zunächst werden die Gewichtungswerte als Prozentsatz (6 entspricht 100%) dargestellt. Anschließend wird dieser Prozentsatz auf das neue Skalenformat angewendet, um zu einem Soll-Dimensions-Reifegrad zu gelangen (vgl. Tabelle 5-3).

Tabelle 5-3: Ermittlung des Soll-Zustandes

Dimension	Gewichtung (absolut)	Gewichtung (relativ)	Soll-Zustand
Cyber-physische Systeme	4,50	75,00%	3,75
Kommunikation	4,33	72,22%	3,61
Daten	5,25	87,50%	4,38
Kundenorientierte Prozesse	4,75	79,17%	3,96
Produktionsprozesse	5,33	88,89%	4,44

Beschreibung der Lücke

Eine Gegenüberstellung der Ist-Situation mit dem Soll-Zustand deckt die Dimensionen mit dem größten Verbesserungsbedarf auf. Die Lücke zwischen Ist und Soll ist nachfolgend als blau-schraffierte Fläche, in Abbildung 5-4, dargestellt.

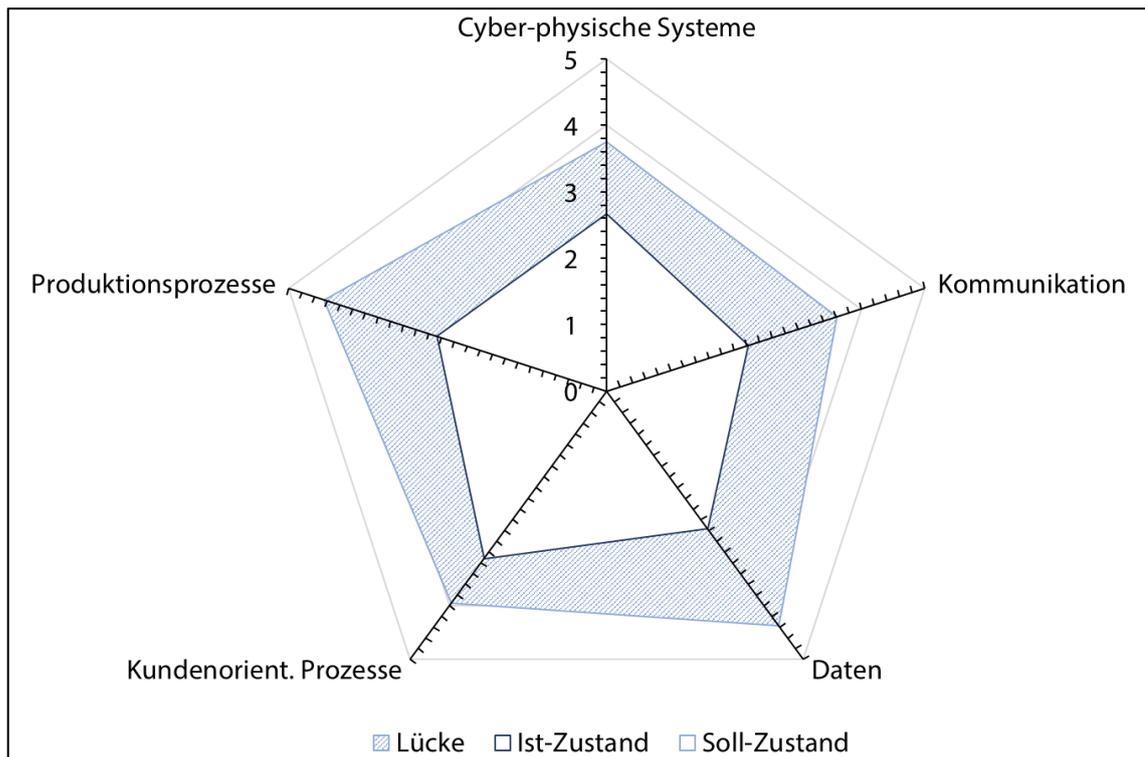


Abbildung 5-4: Darstellung der Lücke zwischen Ist- und Soll-Zustand

Es wird deutlich, dass alle Dimensionen ihren Soll-Wert verfehlen. Die größte Differenz zwischen Soll und Ist liegt in den Dimensionen *Daten* und *Produktionsprozesse* vor. Sie beträgt etwa 1,8 Reifegradstufen. Am geringsten ist die Lücke in der Dimension *Kundenorientierte Prozesse* mit etwa 0,8. Alle anderen Dimensionen liegen in dem Bereich zwischen diesen beiden Werten.

5.5 Bewertung der Ergebnisse

Die durchgeführten Untersuchungen haben ergeben, dass die Etikettiermaschinen-Fertigung des betrachteten Unternehmens einen Industrie-4.0-Reifegrad von 2,62 hat. Mit diesem Wert wird die Produktion in Stufe 2 (*Unerfahren*) verortet (vgl. Abschnitt 4.4), tendiert jedoch in Richtung Stufe 3 (*Fortgeschritten*). Diese Beobachtungen decken sich mit der in Abschnitt 5.3 beschriebenen aktuellen Industrie-4.0-Situation des Unternehmens.

Es ist auffällig, dass die erhobenen Dimensions-Gewichtungen sehr hoch ausfallen. Die durchschnittliche Gewichtung von 4,83 (Skala von 1 bis 6) macht deutlich, dass die gewählten Dimensionen für das Unternehmen wichtig sind. Ein Vergleich der erhobenen Gewichtungswerte mit den Gewichtungen auf Basis der Fachliteratur (vgl. Tabelle 4-2)

zeigt, dass die erhobene Gewichtung im Durchschnitt eine Stufe höher ausfällt (vgl. Tabelle 5-4). Dies ist auch ein Indiz dafür, dass die gewählten Dimensionen insbesondere im Sondermaschinenbau die Relevanz und den Handlungsbedarf hinsichtlich des Themenfeldes Industrie 4.0 gut abdecken.

Tabelle 5-4: Vergleich der Dimensions-Gewichtungen

Dimension	Erwartete Gewichtung auf Basis von HERMANN et al. [2016]	Gewichtung im Beispielunternehmen
Cyber-physische Systeme	3	4,50
Kommunikation	4	4,33
Daten	5	5,25
Kundenorientierte Prozesse	3	4,75
Produktionsprozesse	4	5,33

Im Verlauf der Datenerhebung ist immer wieder angemerkt worden, dass einige Indikatoren nicht, oder nur sehr schlecht auf das Untersuchungsobjekt (die Etikettiermaschinen-Montage) angewendet werden können: insbesondere die Indikatoren *Mensch-Maschine-Kommunikation*, *Maschine-Maschine-Kommunikation* und *Sensorik / Aktorik*. Das Problem bei dem betrachteten Untersuchungsobjekt liegt darin, dass nur sehr wenige Anlagen oder Maschinen eingesetzt werden – es handelt sich um eine manuelle Montage. Dadurch finden Indikatoren, die sich auf Maschinen und ihre Kommunikation beziehen, nur sehr schlechte Anwendung. Werden diese Indikatoren außer Acht gelassen, ändert sich das Ergebnis allerdings nur geringfügig. Der Gesamt-Reifegrad steigt auf 2,82 (vorher 2,62) und die Reifegrade der betroffenen Dimensionen steigen ebenfalls: Kommunikation: 2,67 (vorher 2,22) und Daten 2,92 (vorher 2,56). Das Weglassen einzelner oder mehrerer Indikatoren ist hier möglich, da das gesamte Reifegradmodell Industrie 4.0 modular aufgebaut ist. Im vorliegenden Fall wurden allerdings alle Indikatoren beibehalten, um auf das erhöhte Ausbaupotential in den Dimensionen aufmerksam zu machen (vgl. Abbildung 5-4).

Die Dimension *Kundenorientierte Prozesse* schneidet im vorliegenden Fall besonders gut ab (vgl. Abbildung 5-4). Die Lücke zwischen Soll- und Ist-Zustand ist dabei mit 0,83 Punkten am geringsten. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass das Unternehmen ein Sondermaschinenhersteller ist. In einer Branche, die darauf spezialisiert ist,

Einzelanfertigungen zu produzieren und für jeden Kunden eine individuelle Lösung zu schaffen, ist ein solches Ergebnis naheliegend.

Ein Vergleich der Ergebnisse dieser Arbeit mit der Industrie-4.0-Readiness-Studie (vgl. Abschnitt 3.4) macht deutlich, dass das Unternehmen geringfügig besser abschneidet, als der Durchschnitt des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus:

In der Readiness-Studie haben etwa 76% der befragten Unternehmen (Stichprobe von $n=234$ im Maschinen- und Anlagenbau) eine der beiden unteren Stufen erreicht. Knapp 39% gehören zu den Außenstehenden (Stufe 0) und etwa 36% werden als Anfänger (Stufe 1) gewertet – der durchschnittliche Reifegrad betrug 0,9 (auf einer Skala von 0-5) [LICHTBLAU, K., et al. 2015, S. 26]. Eine Möglichkeit, warum das betrachtete Unternehmen besser abschneidet, könnte sein, dass die Readiness-Studie aus dem Jahr 2015 stammt. Fortschritte in Technologien und Verfahren würden im Jahr 2018 evtl. einen leicht besseren durchschnittlichen Reifegrad begünstigen. Im Vergleich dazu erreicht das Unternehmen die zweite Reifegradstufe, allerdings mit einer deutlichen Tendenz zur dritten Stufe. Trotz des positiven Ergebnisses des Unternehmens wird deutlich, dass Industrie 4.0 noch nicht in Gänze in der Etikettiermaschinen-Produktion Umsetzung findet. Allerdings ist das Bewusstsein für die Thematik Industrie 4.0 bereits vorhanden und die Umsetzbarkeit wird in Pilotprojekten getestet.

5.6 Industrie-4.0-Maßnahmen

Maßnahmen zur Verbesserung des Industrie-4.0-Reifegrades machen insbesondere in den Dimensionen Sinn, die ein hohes Verbesserungspotenzial und eine große Lücke zwischen Ist- und Soll-Zustand aufweisen. Gleichzeitig ist es wichtig, auf generelle Schwächen in der Infrastruktur und in den genutzten Systemen einzugehen. Im vorliegenden Fall werden die Dimensionen *Daten* (Lücke von 1,81) und *Produktionsprozesse* (Lücke von 1,78) näher betrachtet. Der Einsatz der vorgestellten Verfahren zur Ideenfindung (vgl. Abschnitt 4.8) unterstützt dabei, eine Lösung zu finden, die im Unternehmen Anwendung finden kann.

Die nachfolgende Auflistung möglicher Maßnahmen stellt an dieser Stelle keinen Anspruch an Vollständigkeit oder Umsetzbarkeit – das Ziel dieser Arbeit ist nicht, einen Maßnahmenkatalog zur sofortigen Implementierung aufzustellen. Die vorgeschlagenen

Maßnahmen und Methoden sollen als Inspiration und Ideensammlung dabei helfen, Industrie 4.0 weiter voranzutreiben.

Dimension: Daten

Die Etikettiermaschinen-Fertigung des Unternehmens beruht auf reiner Handmontage. Aus diesem Grund sind bislang keine automatisierten Anlagen im Einsatz. Das Fehlen dieser Anlagen führt zunächst dazu, dass es weniger Möglichkeiten für den Einsatz von Sensoren und Aktoren gibt. Allerdings werden die Etikettiermaschinen auf beweglichen Luftkissen-Plattformen gefertigt, um leicht von einer Arbeitsstation zur nächsten transportiert werden zu können (vgl. Abschnitt 5.2). Diese Transportplattformen können als Ladungsträger angesehen werden. Auf dieser Grundlage bieten die Plattformen die Möglichkeit, mit Sensoren ausgestattet zu werden, um beispielsweise die Position der im Bau befindlichen Maschine bestimmen zu können. Außerdem können die Plattformen mit den nötigen Mensch-Maschine-Schnittstellen ausgestattet werden, um beispielsweise Montagepläne und -anleitungen direkt am Arbeitsplatz zur Verfügung zu stellen. Auf dieser Digitalisierung der Ladungsträger aufbauend, kann ein effektives Rückmeldesystem entwickelt werden, welches automatisiert Informationen im Netzwerk hinterlegt. Mögliche Informationen sind der Materialbedarf für individuelle Arbeitsplätze, Standortinformationen, Montagefortschritt oder Problemmeldungen. Die angesprochenen Punkte passen thematisch auch in die Kategorie CPS, schaffen aber zunächst die Basis, um objektbezogene Daten nutzen zu können.

Daten über den Standort können Auskunft über den Fertigungsstand und den Status der Auftragsbearbeitung geben. Eine ausgereifte IKT-Infrastruktur (Informations- und Kommunikationstechnologie) ermöglicht die Erprobung einer papierlosen Fertigung, indem Montagepläne digital zur Verfügung gestellt werden. Eine weitere Möglichkeit, um insbesondere neue Mitarbeiter in der Montage zu unterstützen, ist der Einsatz von tragbaren Technologien (Wearables; vgl. Abschnitt 2.2): Datenhandschuhe können, in Kombination mit Datenbrillen Montageanleitungen in einer erweiterten Realität (Augmented Reality) passiv zur Verfügung stellen und Mitarbeiter so durch die Montage leiten. Auch für diese Anwendung ist es zwingend notwendig, eine durchgängige Datengrundlage zu schaffen.

Ein erster Schritt ist die Erstellung digitaler Zwillinge, sowohl für die Produkte (hier Etikettiermaschinen), als auch für die Fertigungsanlagen (entfällt im Fall des betrachteten

Unternehmens). Ein nächster Schritt bei der Durchsetzung einer durchgängigen Datenlösung kann es sein, die Daten allen Beteiligten über das Internet zur Verfügung zu stellen. Dadurch entsteht ein offenes Daten-Konzept, welches eine schnelle und barrierefreie Zusammenarbeit verschiedener Abteilungen ermöglicht.

Neben den Maßnahmen, die direkt in den Fertigungsprozess eingreifen, ist es wichtig, auch Produktionsdaten zu erfassen und auszuwerten. Ist ein automatisches Rückmeldesystem integriert, können Bearbeitungs- und Durchlaufzeiten automatisiert erfasst werden. Eine digitalisierte und vernetzte Qualitätssicherung liefert Daten über Mängel oder Nacharbeitszeiten. Die kombinierte Menge dieser Daten bietet die Grundlage, um verlässliche Prognosen zu erstellen und dadurch die Prozessplanung zu verbessern.

Dimension: Produktionsprozesse

Damit Produktionsprozesse flexibler und anpassbarer gestaltet werden können, ist es zunächst nötig, eine technologische und datentechnische Basis zu schaffen. Die bislang beschriebenen Maßnahmen im Bereich der Dimension Daten helfen dabei, diese Grundlage zu schaffen. Darauf aufbauend ist es möglich, den Planungs- und Steuerungsprozess unter Einbezug von Auftrags-, historischen und Echtzeit-Daten anzupassen. Ein realitätsnahes Modell der Produktion bietet die Möglichkeit, Simulationen und Testläufe durchzuführen – es entsteht ein digitaler Zwilling der gesamten Produktion. Normalerweise ist die Erstellung eines digitalen Zwillings mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden (vgl. Abschnitt 2.1). Im vorliegenden Fall kann allerdings von weniger Problemen ausgegangen werden, weil keine komplexen Fertigungsanlagen zur Anwendung kommen. Es ist jedoch nötig, das Produkt (die Etikettiermaschine) vollständig digital abzubilden.

Neben der Montage der Anlage, ist auch die Materialbereitstellung ein Teil der Montage. In diesem Bereich setzt das Unternehmen bereits ein Karten-Kanban-System ein, um einen Großteil der Normteile (Schrauben, Muttern, etc.) bereitzustellen. Der Einsatz eines automatisierten und computergestützten Kanban-Systems verkürzt Bereitstellungszeiten und hilft bei der Vermeidung menschlicher Fehler. Intelligente Behälter bzw. intelligente Regale ermöglichen dies. Dazu ist es notwendig, dass alle Teile eindeutige und maschinell lesbare Identitäten besitzen.

Die Produktionsplanung im betrachteten Unternehmen basiert bereits teilweise auf historischen Daten. Die Einbeziehung von Echtzeitdaten in die Planung hilft dabei, das System anpassungsfähiger und flexibler zu machen. Diese Echtzeitdaten können Informationen über Lieferengpässe, mangelnde Qualität angelieferter Komponenten, Produktionsausfälle in der eigenen Wertschöpfungskette, veränderte Kundenanforderungen und vieles mehr enthalten. Industrie 4.0 kann durch die Flexibilisierung der Produktionsplanung dabei helfen, jederzeit auf Schwankungen reagieren zu können und so Fertigungsausfälle zu vermeiden.

Außerdem sollte überprüft werden, ob der Einsatz von additiven Fertigungsverfahren in der Etikettiermaschinen-Montage sinnvoll ist. Insbesondere in Situationen, in denen wichtige Komponenten fehlen und dadurch die Produktion aufhalten, könnten diese Verfahren weiterhelfen. Es ist aber davon auszugehen, dass die Einsatzmöglichkeiten in einer manuellen Montage begrenzt sind.

Letztlich ist es jedem Unternehmen überlassen, die ermittelten Schwachpunkte in den einzelnen Dimensionen mit geeigneten Maßnahmen anzugehen. Ideen können z.B. aus Abschnitt 4.8 entnommen werden. Das vorgestellte Reifegradmodell gibt das nötige Handwerkszeug zur Aufdeckung der Probleme an die Hand, darüber hinaus, müssen anwendende Unternehmen selbst aktiv werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zu Beginn dieser Arbeit wurde die Frage gestellt, wie ein Referenzmodell zur reifegradbasierten Ermittlung des Digitalisierungsgrades der Produktion eines Unternehmens im Maschinen- und Anlagenbau aussehen kann. Zur Beantwortung dieser Frage wurden zunächst die Grundlagen des Themenfeldes Industrie 4.0 in der Produktion beleuchtet (vgl. Kapitel 2). Anschließend wurden existierende, etablierte Reifegradmodelle vorgestellt (vgl. Kapitel 3). Auf Basis der vorgestellten Konzepte wurde ein kombiniertes Modell mit Fokus auf die Produktion konzipiert (vgl. Kapitel 4). In der Anwendung bei einem Sondermaschinenhersteller konnte das erarbeitete Modell getestet werden (vgl. Kapitel 5).

Mit dem gewählten Vorgehen wurde ein Modell entwickelt, das es erlaubt, den Industrie-4.0-Reifegrad der Produktion effektiv bestimmen zu können. Das Ergebnis ist leicht interpretierbar und die Anwendung des Modells ist ohne besondere Einarbeitung möglich. Der Fokus auf einen einzelnen Bereich, im vorliegenden Fall die Produktion, ist sinnvoll, um auf dessen Besonderheiten eingehen zu können. Die Modularität des erarbeiteten Modells erlaubt es einzelne Indikatoren unternehmensspezifisch anzupassen oder neue Dimensionen hinzuzufügen. Gleichzeitig hat die Evaluation gezeigt, dass die gewählten Dimensionen das Themenfeld bereits umfassend abdecken.

Da es sich bei dem Ergebnis des Modells um einen Reifegrad für die Produktion handelt, können nur Aussagen über die Industrie-4.0-Reife in diesem, sehr begrenzten, Bereich gemacht werden. Eine Anpassung der gewählten Dimensionen, Indikatoren und Indikatoreausprägungen führt, wie angesprochen, dazu, dass auch andere Unternehmensbereiche untersucht werden können. Diese Modularität ist wichtig, um zusätzlich die verschiedenen Branchen im Maschinen- und Anlagenbau abzudecken. Der Sondermaschinenbau hat andere erfolgsrelevanten Faktoren, als beispielsweise Erstausrüster (engl. Original Equipment Manufacturer – OEM) und legt dadurch auch Wert auf andere Reifegraddimensionen. Die Gewichtung der Dimensionen unterstützt in der Funktion, Diversifikationsmöglichkeiten zu schaffen. Es wurde bewusst auf eine Gewichtung einzelner Indikatoren verzichtet, um die Komplexität und den Zeitaufwand gering zu halten. Es ist jedoch anzumerken, dass die Gewichtung jedes Indikators ein noch detaillierteres Bild der Reife liefern würde, jedoch andererseits eine steigende Komplexität zur Folge hätte.

Es wäre darüber hinaus interessant herauszufinden, ob eine gewisse Grund-Reife bei Unternehmen vorliegt, die sich entscheiden ein Reifegradmodell anzuwenden. Es kann angenommen werden, dass Unternehmen mit Interesse an einer Analyse ihres Reifegrades in diesem Bereich tendenziell besser abschneiden, weil eine höhere Sensibilität und Interesse für das Thema vorliegen

Die durchgeführte Evaluation in der Praxis (vgl. Kapitel 5) hat gezeigt, dass mit dem entwickelten Modell ein Reifegrad ermittelt werden kann. Es bedarf allerdings weiterer Untersuchungen, bevor von einem repräsentativen Ergebnis gesprochen werden kann. Durch die Anwendung auf eine primär manuelle Montage, konnten nur unzureichende Aussagen über die Anwendbarkeit auf automatisierte Fertigungsanlagen gemacht werden. Die Modularität des Modells wurde angesprochen, allerdings bleibt offen, inwieweit sich ein angepasstes Modell in anderen Unternehmensbereichen durchsetzen kann und welche Schwierigkeiten entstehen. Die in Kapitel 3 vorgestellten Reifegradmodelle haben teilweise einen weiter gefassten Fokus und ermöglichen es direkt, das Unternehmen als Ganzes zu betrachten. Sie büßen dafür allerdings die Detailsicht hinsichtlich einzelner Bereiche ein, die diese Arbeit ermöglicht.

Weitere Nachforschungen mit Bezug auf eine mögliche Anwendung von Technologien wie der Blockchain und Deep-Learning in der Produktion bieten hohes Potenzial. Forschungsprojekte wie die vorgestellte Industrie-4.0-Readiness-Studie (vgl. Abschnitt 3.4) haben außerdem gezeigt, dass die Datensicherheit bei vielen Unternehmen einen großen Stellenwert hat. Modelle, die unternehmensübergreifend ausgelegt sind, müssen Aspekte der Datensicherheit berücksichtigen, um die unternehmerische Realität abbilden zu können. In der vorliegenden Arbeit wurde darauf verzichtet, da ein isolierter Unternehmensbereich betrachtet wurde.

Weiterer Forschungsbedarf besteht, um Industrie 4.0 in der Unternehmensstrategie und der -kultur zu untersuchen. Auch die Interaktion des Unternehmens mit der Außenwelt wurde weitgehend unbeachtet gelassen (vgl. Kapitel 4). Die Betrachtung der Außenverbindungen eines Unternehmens und wie Industrie 4.0 in diesem Zusammenspiel eingesetzt werden kann, ist vielversprechend. Die Vernetzung von Funktionsbereichen im Unternehmen und wie dadurch Synergieeffekte erzielt werden können, bietet ebenfalls großes Potenzial und sollte weiter untersucht werden. In diesem Zusammenhang ist es außerdem wichtig, die Rolle des Menschen im Zeitalter von Industrie 4.0 näher zu untersuchen. Besonders relevant für die Einführung sind dabei die

Akzeptanz, sowohl für die Technologie, als auch für Veränderungen in Aufgabenbereichen und die Qualifizierung der Mitarbeiter. Darauf aufbauende Nachforschungen können auch bei der Umsetzung von Industrie 4.0 in der Produktion weiterhelfen.

Ziel dieser Arbeit war es, Unternehmen ein Werkzeug an die Hand zu geben, um die eigene Industrie-4.0-Reife zu erfassen und weiterzuentwickeln. Dieses Ziel wurde erreicht, indem ein modulares Reifegradmodell konzipiert wurde. Die Ergebnisse einzelner Unternehmen sind allerdings nur begrenzt vergleichbar, weil jedes Unternehmen eine individuelle Gewichtung und eine Anpassung der Dimensionen vornehmen kann. In Zukunft bleibt zu untersuchen, wie das Reifegradmodell-Industrie-4.0 dieser Arbeit, in ein unternehmensübergreifendes und vergleichbares Referenzmodell weiterentwickelt werden kann.

7 Literaturverzeichnis

acatech (Hrsg.) (2011): Cyber-Physical Systems. Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion. Heidelberg.

acatech (Hrsg.) (2016): Kompetenzen für Industrie 4.0. Qualifizierungsbedarfe und Lösungsansätze. München: Herbert Utz Verlag GmbH.

AKKASOGLU, G. (2013): Methodik zur Konzeption und Applikation anwendungsspezifischer Reifegradmodelle unter Berücksichtigung der Informationsunsicherheit. Dissertation. Nürnberg.

ANDERL, R. (2014): Industrie 4.0 - Advanced Engineering of Smart Products and Smart Production. 19th International Seminar on High Technology. Piracicaba.

ANDERL, R.; PICARD, A.; WANG, Y.; DOSCH, S.; KLEE, B.; BAUER, J. (2015): Leitfaden Industrie 4.0. Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand. Frankfurt am Main: VDMA Verlag.

BACHMANN, R.; KEMPER, G.; GERZER, T. (2014): Big data - Fluch oder Segen? Unternehmen im Spiegel gesellschaftlichen Wandels. Heidelberg: mitp-Verlag.

BAGADE, A. A. & INGALE, R. K. (2017): Object Sorting Mechanism In Manufacturing Industry By Using Computer Vision. In: International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology 2 (2017) 3, S. 412–419.

BAUERNHANSL, T. (2017): Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Vogel-Heuser, B., Bauernhansl, T., ten Hompel, M. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.4. Allgemeine Grundlagen, Berlin: Springer Vieweg, S. 1–31.

BAUERNHANSL, T.; TEN HOMPEL, M., VOGEL-HEUSER, B. (Hrsg.) (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung Technologien Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg.

BELUSSI, L. F. F. & HIRATA, N. (2011): Fast QR Code Detection in Arbitrarily Acquired Images. In: Lewiner, T. (Hrsg.): 24th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images. 28 - 31 Aug. 2011, Maceió, Alagoas, Brazil: IEEE-Verlag, S. 281–288.

BILDSTEIN, A. & SEIDELMANN, J. (2014): Industrie 4.0-Readiness: Migration zur Industrie 4.0-Fertigung. In: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie

4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung Technologien Migration, Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 581–597.

BOBLAU, M.; GESING, J.; MEIER, H.; WIESEKE, J. (2017): Geschäftsmodelle für Industrielle Produkt-Service Systeme. In: Meier, H., Uhlmann, E. (Hrsg.): Industrielle Produkt-Service Systeme. Entwicklung, Betrieb und Management, Berlin: Springer Vieweg, 299-324.

BRENNEIS, E.; Computerwoche (Hrsg.) (2016): Machine-to-Machine-Kommunikation. Fünf Top-M2M-Trends für 2016. URL: <https://www.computerwoche.de/a/fuenf-top-m2m-trends-fuer-2016,3222040>. 03.01.2018.

BRÖDNER, P. (2015): Industrie 4.0 und Big Data – wirklich ein neuer Technologieschub? In: Hirsch-Kreinsen, H., Ittermann, P., Niehaus, J. (Hrsg.): Digitalisierung industrieller Arbeit. Die Vision Industrie 4.0 und ihre sozialen Herausforderungen, Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, S. 232–251.

BROY, M.; KAGERMANN, H.; ACHATZ, R.; acatech (Hrsg.) (2010): Agenda Cyber Physical Systems. Outlines of a new research domain. Intermediary Results. München.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.) (2014): Die neue Hightech-Strategie. Innovationen für Deutschland. Berlin.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2017a): Digitale Wirtschaft und Gesellschaft. Industrie 4.0. URL: <https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html>. 22.10.2017.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2017b): Industrie 4.0. Innovationen für die Produktion von morgen. Berlin.

BÜRGER, T. & TRAGL, K. (2014): SPS-Automatisierung mit den Technologien der IT-Welt verbinden. In: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung Technologien Migration, Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 559–569.

CHEN, Z.; XIA, F.; HUANG, T.; BU, F.; WANG, H. (2013): A localization method for the Internet of Things. In: The Journal of Supercomputing 63 (2013) 3, S. 657–674.

COVA, B. & SALLE, R. (2008): Marketing solutions in accordance with the S-D logic. Co-creating value with customer network actors. In: Industrial Marketing Management 37 (2008) 3, S. 270–277.

- CREMERS, D. (2017): Computer Vision für 3-D-Rekonstruktion. In: Informatik-Spektrum 40 (2017) 2, S. 205–209.
- DAIS, S. (2017): Industrie 4.0 – Anstoß, Vision, Vorgehen. In: Vogel-Heuser, B., Bauernhansl, T., ten Hompel, M. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.4. Allgemeine Grundlagen, Berlin: Springer Vieweg, S. 261–277.
- DEUSE, J.; WEISNER, K.; HENGSTEBECK, A.; BUSCH, F. (2015): Gestaltung von Produktionssystemen im Kontext von Industrie 4.0. In: Botthof, A., Hartmann, E. A. (Hrsg.): Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0, Berlin: Springer Vieweg, 99-109.
- Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) (Hrsg.) (2012): Im Fokus: Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Handlungsempfehlungen zur Umsetzung. Bericht der Promotorengruppe Kommunikation. Berlin.
- EVANS, P. C. & ANNUNZIATA, M.; General Electric Inc. (Hrsg.) (2012): Industrial Internet. Pushing the Boundaries of Minds and Machines.
- FINKENZELLER, K. & MÜLLER, D. (2010): RFID handbook. Fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication. Chichester: Wiley-Verlag.
- FRANZEN, A. (2014): Antwortskalen in standardisierten Befragungen. In: Baur, N., Blasius, J. (Hrsg.): Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung, Wiesbaden: Springer VS, S. 701–711.
- Fraunhofer IPK (2017): Themenblatt Smarte Fabrik 4.0 - Digitaler Zwilling. Berlin.
- Fraunhofer IPM (2017): Presseinformation. Track & Trace Fingerprint - Bauteil-Rückverfolgung per Fingerabdruck.
- Fraunhofer-Gesellschaft (Hrsg.) (2017): Produktion und Dienstleistung - Industrie 4.0. URL: <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/forschungsfelder/produktion-dienstleistung/industrie-4-0.html>. 22.10.2017.
- GANDOMI, A. & HAIDER, M. (2015): Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. In: International Journal of Information Management 35 (2015) 2, S. 137–144.
- GASSMANN, O.; FRANKENBERGER, K.; CSIK, M. (2013): Geschäftsmodelle entwickeln. 55 innovative Konzepte mit dem St. Galler Business Model Navigator. München: Carl Hanser Verlag.

- GESCHKA, H. & LANTELME, G. (2005): Kreativitätstechniken. In: Albers, S., Gassmann, O. (Hrsg.): Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement. Strategie - Umsetzung - Controlling, Wiesbaden: Gabler Verlag, S. 285–304.
- GOLOVINA, O.; TEIZER, J.; PRADHANANGA, N. (2016): Heat map generation for predictive safety planning. Preventing struck-by and near miss interactions between workers-on-foot and construction equipment. In: Automation in Construction 71 (2016), S. 99–115.
- GORECKY, D.; SCHMITT, M.; LOSKYLL, M. (2014): Mensch-Maschine-Interaktion im Industrie 4.0-Zeitalter. In: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung Technologien Migration, Wiesbaden: Springer Vieweg, 524-542.
- HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. (2016): Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. In: Bui, T. X., Sprague, R. H. (Hrsg.): Proceedings of the 49th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. 5-8 January 2016, Kauai, Hawaii, Piscataway, NJ: IEEE, S. 3928–3937.
- HUBER, W. (2016): Industrie 4.0 in der Automobilproduktion. Ein Praxisbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- IT & Production (2016): Identifikation 4.0. RFID und Lager. URL: <https://www.it-production.com/allgemein/rfid-und-lageridentifikation-4-0/>. 10.03.2018.
- JODLBAUER, H. & SCHAGERL, M. (2016): Reifegradmodell Industrie 4.0. Ein Vorgehensmodell zur Identifikation von Industrie 4.0 Potentialen. In: Mayr, H. C., Pinzger, M. (Hrsg.): Informatik 2016. Tagung vom 26.-30. September 2016 in Klagenfurt, Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V., S. 1473–1487.
- KAGERMANN, H. (2017): Chancen von Industrie 4.0 nutzen. In: Vogel-Heuser, B., Bauernhansl, T., ten Hompel, M. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.4. Allgemeine Grundlagen, Berlin: Springer Vieweg, S. 235–246.
- KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J.; acatech & Forschungsunion (Hrsg.) (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Berlin.
- KLETTI, J. (2015): Industrie 4.0: MES ermöglicht Dezentralisierung. In: Digital Manufacturing (2015) 1, S. 6–7.

- KÖHLER, P.; SIX, B.; MICHELS, J. S. (2015): Industrie 4.0: Ein Überblick. In: Köhler-Schute, C. (Hrsg.): Industrie 4.0. Ein praxisorientierter Ansatz, Berlin: KS-Energy-Verlag, S. 17–43.
- KRIZHEVSKY, A.; SUTSKEVER, I.; HINTON, G. E. (2017): ImageNet classification with deep convolutional neural networks. In: Communications of the ACM 60 (2017) 6, S. 84–90.
- KUHN, T. (2017): Digitaler Zwilling. In: Informatik-Spektrum (Online First Articles) (2017), S. 1–5.
- LANEY, D.; META Group (Hrsg.) (2001): 3D Data Management: Controlling Data Volume, Velocity, and Variety. Application Delivery Strategies by META Group Inc.
- LASI, H.; FETTKE, P.; KEMPER, H.; FELD, T.; HOFFMANN, M. (2014): Industrie 4.0. In: Wirtschaftsinformatik 56 (2014) 4, S. 261–264.
- LICHTBLAU, K.; STICH, V.; BERTENRATH, R.; BLUM, M.; BLEIDER, M.; MILLACK, A.; SCHMITT, K.; SCHMITZ, E.; SCHRÖTER, M.; VDMA (Hrsg.) (2015): Impuls. Industrie 4.0-Readiness. Stiftung für den Maschinenbau, den Anlagenbau und die Informationstechnik. Aachen, Köln.
- LIEBOLD, R. & TRINCZEK, R. (2009): Experteninterview. In: Kühl, S., Strodtholz, P., Taffertshofer, A. (Hrsg.): Handbuch Methoden der Organisationsforschung. Quantitative und Qualitative Methoden, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH, S. 32–56.
- LOSKYLL, M. & SCHLICK, J. (2013): Cyber-Physische Produktionssysteme. In: at – Automatisierungstechnik 61 (2013) 10, S. 690–699.
- McFARLANE, D.; SARMA, S.; CHIRN, J. L.; WONG, C. ; ASHTON, K. (2003): Auto ID systems and intelligent manufacturing control. In: Engineering Applications of Artificial Intelligence 16 (2003) 4, S. 365–376.
- MEYER, G. G.; FRÄMLING, K.; HOLMSTRÖM, J. (2009): Intelligent Products. A survey. In: Computers in Industry 60 (2009) 3, S. 137–148.
- MÜLLER-STEWENS, G. & LECHNER, C. (2011): Strategisches Management. Wie strategische Initiativen zum Wandel führen. Der St. Galler General Management Navigator®. 4., überarb. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.

- NAUMANN, M.; DIETZ, T.; KUSS, A. (2017): Mensch-Maschine-Interaktion. In: Vogel-Heuser, B., Bauernhansl, T., ten Hompel, M. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.4. Allgemeine Grundlagen, Berlin: Springer Vieweg, 201-215.
- PFEIFFER, S.; LEE, H.; ZIRNIG, C.; SUPHAN, A.; VDMA (Hrsg.) (2016): Industrie 4.0 - Qualifizierung 2025. Lehrstuhl für Soziologie der Universität Hohenheim.
- President's Office of Advisors on Science and Technology (2014): Acceleration of U.S. Advanced Manufacturing. Report to the President.
- ProGlove (2016): Pressemitteilung. ProGlove launcht ersten intelligenten Handschuh für die Industrie. München.
- ROSEN, R.; WICHERT, G. von; LO, G.; BETTENHAUSEN, K. D. (2015): About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. In: IFAC-PapersOnLine 48 (2015) 3, S. 567–572.
- RÜEGG-STÜRM, J. (2003): Das neue St. Galler Management-Modell. Grundkategorien einer integrierten Managementlehre - der HSG-Ansatz. Bern: Haupt-Verlag.
- RUNDE, C.; Virtual Dimension Center (Hrsg.) (2014): Head Mounted Displays & Datenbrillen. Einsatz und Systeme. Fellbach.
- SAUER, O. (2013): Maschinenbau der Zukunft. In: visIT Industrie 4.0 14 (2013), S. 6–7.
- SCHLICK, J.; STEPHAN, P.; LOSKYLL, M.; LAPPE, D. (2014): Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung. In: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung Technologien Migration, Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 57–84.
- SCHUH, G. (2011): Der Ordnungsrahmen Produktion und Management. In: Schuh, G., Klappert, S. (Hrsg.): Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management 2, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, S. 1–4.
- SCHUH, G.; ANDERL, R.; GAUSEMEIER, J.; TEN HOMPEL, M., WAHLSTER, W. (Hrsg.) (2017): Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten. München: Herbert Utz Verlag.
- SCHUH, G. & SCHMIDT, C. (Hrsg.) (2014): Produktionsmanagement. Handbuch Produktion und Management 5. 2. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

- SEGURA VELANDIA, D. M.; KAUR, N.; WHITTOW, W. G.; CONWAY, P. P.; WEST, A. A. (2016): Towards industrial internet of things. Crankshaft monitoring, traceability and tracking using RFID. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 41 (2016), S. 66–77.
- Siemens AG (2015): Der digitale Zwilling. In: advance - Digital enterprise auf dem Weg zur Industrie 4.0 (2015) 2, S. 4–9.
- SIEPMANN, D. (2016): Industrie 4.0 - Grundlagen und Gesamtzusammenhang. In: Roth, A. (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis, Berlin: Springer Gabler.
- TEUCKE, M.; WERTHMANN, D.; LEWANDOWSKI, M.; THOBEN, K. D. (2017): Einsatz mobiler Computersysteme im Rahmen von Industrie 4.0 zur Bewältigung des demografischen Wandels. In: Vogel-Heuser, B., Bauernhansl, T., ten Hompel, M. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.2. Automatisierung, Berlin: Springer Vieweg, S. 575–604.
- THOMAS, O. (2005): Das Modellverständnis in der Wirtschaftsinformatik. Historie, Literaturanalyse und Begriffsexplikation. In: Veröffentlichungen des Instituts für Wirtschaftsinformatik 2005 (2005) 184, S. 1–41.
- VDI/VDE (Hrsg.) (2013): Thesen und Handlungsfelder. Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation. Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik.
- VDMA (2017): VDMA: Embedded Vision schafft neue Anwendungsfelder für die Bildverarbeitung. URL: <http://ibv.vdma.org/viewer/-/article/render/16217782>. 02.01.2018.
- VDMA; BITKOM e.V., ZVEI e.V. (Hrsg.) (2015): Umsetzungsstrategie Industrie 4.0. Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0. Plattform Industrie 4.0.
- VDMA & McKinsey & Company (2014): Zukunftsperspektive deutscher Maschinenbau. Erfolgreich in einem dynamischen Umfeld agieren.
- Vodafone Group (2017): Vodafone IoT-Barometer 2017/18.
- VOGEL-HEUSER, B.; BAUERNHANSL, T., TEN HOMPEL, M. (Hrsg.) (2017a): Handbuch Industrie 4.0 Bd.1. Produktion. Berlin: Springer Vieweg.

- VOGEL-HEUSER, B.; BAUERNHANSL, T., TEN HOMPEL, M. (Hrsg.) (2017b): Handbuch Industrie 4.0 Bd.3. Logistik. Berlin: Springer Vieweg.
- VOGEL-HEUSER, B.; BAUERNHANSL, T., TEN HOMPEL, M. (Hrsg.) (2017c): Handbuch Industrie 4.0 Bd.4. Allgemeine Grundlagen. Berlin: Springer Vieweg.
- VOGEL-HEUSER, B.; BAYRAK, G.; FRANK, U.; acatech (Hrsg.) (2012): Forschungsfragen in "Produktionsautomatisierung der Zukunft". Diskussionspapier für die acatech Projektgruppe "ProCPS - Production CPS".
- WEILER, A.; INFORM GmbH (Hrsg.) (2015): Der Kunde ist König- Individualisierte Produktion mit Losgröße 1. URL: <https://www.inform-software.de/blog/post/der-kunde-ist-koenig-individualisierte-produktion-mit-losgroesse-1>. 27.11.2017.
- WENDE, J. & KIRADJIEV, P. (2014): Eine Implementierung von Losgröße 1 nach Industrie-4.0-Prinzipien. In: e & i Elektrotechnik und Informationstechnik 131 (2014) 7, S. 202–206.
- WICK, C. (2017): Deep Learning. In: Informatik-Spektrum 40 (2017) 1, S. 103–107.
- WONG, C. Y.; MCFARLANE, D.; AHMAD ZAHARUDIN, A.; AGARWAL, V. (2011): The intelligent product driven supply chain. In: Philippot, A., Sayed-Mouchaweh, M., Carré-Ménétrier, V., Riera, B. (Hrsg.): Generation of candidates' tree for the fault diagnosis of discrete event systems: IEEE.
- YIN, R. K. (2009): Case study research. Design and methods. Thousand Oaks: SAGE-Verlag.
- YIN, S. & KAYNAK, O. (2015): Big Data for Modern Industry. Challenges and Trends. [Point of View]. In: Proceedings of the IEEE 103 (2015) 2, S. 143–146.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Die 4 Stufen industrieller Revolution [i. A. a. Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) 2012, S. 13]	4
Abbildung 2-2: Ablösung der Automatisierungspyramide [i. A. a. VDI/VDE 2013, S. 4]	7
Abbildung 2-3: Die Entwicklung eingebetteter Systeme zum Internet der Dinge und Dienste [i. A. a. acatech 2011, S. 10]	8
Abbildung 3-1: Vorgehensweise der Maturity Index Studie [SCHUH, G., et al. 2017, S. 13]	28
Abbildung 3-2: Industrie 4.0 Maturity Index [SCHUH, G., et al. 2017, S. 16]	29
Abbildung 3-3: Werkzeugkasten Industrie 4.0 [ANDERL, R. et al. 2015, S. 9]	33
Abbildung 3-4: St. Gallen Business Model Navigator [i. A. a. Gassmann, O. et al. 2013, S. 6]	34
Abbildung 3-5: Dimensionen im Readiness-Modell [LICHTBLAU, K., et al. 2015, S. 22]	37
Abbildung 3-6: Ordnungsrahmen Produktion und Management [i. A. a. SCHUH, G. 2011, S. 2]	42
Abbildung 4-1: Gesamtzusammenhang des Reifegradmodells [i. A. a. SCHUH, G. 2011, S. 2]	45
Abbildung 4-2: Auslegung von Reifegradmodellen [i. A. a. AKKASOGLU, G. 2013, S. 51]	47
Abbildung 4-3: Zusammenhang der Reifegraddimensionen	53
Abbildung 4-4: Aufbau der Reifegrad-Kennwert-Matrix [i. A. a. AKKASOGLU, G. 2013, S. 58]	56
Abbildung 4-5: Reifegrad-Kennwert-Matrix zum Indikator Identifikation	56
Abbildung 4-6: Reifegrad-Kennwert-Matrix	58
Abbildung 4-7: Ist-Situation des Reifegradindikators Identifikation	61
Abbildung 4-8: Soll-Zustand des Indikators Identifikation	61
Abbildung 5-1: Schematischer Aufbau einer Etikettiermaschine	68
Abbildung 5-2: Getaktete Linienmontage der Etikettiermaschinen	70
Abbildung 5-3: Ausprägungen der Indikatoren	74
Abbildung 5-4: Darstellung der Lücke zwischen Ist- und Soll-Zustand	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Oberbegriffe im Themenfeld Industrie 4.0	15
Tabelle 3-1: Modell Aspekte der vorgestellten Reifegradmodelle.....	41
Tabelle 4-1: Reifegradindikatoren und Dimensionen	51
Tabelle 4-2: Gewichtungen der Reifegraddimensionen.....	55
Tabelle 4-3: Berechnung des Gesamt-Reifegrades	59
Tabelle 5-1: Ergebnisse der Datenerhebung	73
Tabelle 5-2: Dimensions-Reifegrade.....	75
Tabelle 5-3: Ermittlung des Soll-Zustandes	75
Tabelle 5-4: Vergleich der Dimensions-Gewichtungen.....	77

Abkürzungsverzeichnis

acatech	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.
BITKOM	Bundesverband Informationswirt., Telekommunikation und neue Medien
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CPPS	Cyber-physisches Produktionssystem
CPS	Cyber-physisches System
HMD	Head Mounted Display
IBN	Inbetriebnahme
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IoT	Internet of Things – Internet der Dinge
IPSS	Industrielles Produkt Service System
IT	Informationstechnik
M2M	Maschine-Maschine-Kommunikation
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SSOT	Single source of truth – Einzige Quelle der Wahrheit
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.

Anhang

Anhang 1: Reifegradindikatoren - Quellen

Dimension	Reifegradindikatoren	Verwendete Quellen
Cyber-physische Systeme	Identifikation	[JODLBAUER, H. et al. 2016]
	Lokalisation	[VOGEL-HEUSER, B., et al. 2017b]
	Vernetzung	[LICHTBLAU, K., et al. 2015] [ANDERL, R. et al. 2015]
Kommunikation	Mensch-Maschine-Kommunikation	[ANDERL, R. et al. 2015] [GORECKY, D. et al. 2014]
	Maschine-Maschine-Kommunikation (M2M)	[ANDERL, R. et al. 2015]
	IKT-Infrastruktur	[ANDERL, R. et al. 2015] [JODLBAUER, H. et al. 2016]
Daten	Sensorik / Aktorik	[ANDERL, R. et al. 2015] Abschnitt 2.1 - Cyber-physische Systeme
	Daten-Analyse	[LICHTBLAU, K., et al. 2015] [ANDERL, R. et al. 2015] [SCHUH, G., et al. 2017]
	Daten-Nutzen	[LICHTBLAU, K., et al. 2015] [ANDERL, R. et al. 2015] Abschnitt 2.1 - Digitaler Zwilling
	Daten-Speicherung	[ANDERL, R. et al. 2015] [SCHUH, G., et al. 2017]
Kundenorient. Prozesse	Losgröße 1	[ANDERL, R. et al. 2015]
	Adaptionsfähigkeit	[SCHUH, G., et al. 2017]
Produktionsprozesse	Planung & Steuerung	[VOGEL-HEUSER, B., et al. 2017a] [acatech 2016]
	Produktionsprozesse	[VOGEL-HEUSER, B., et al. 2017a] [acatech 2016]

Anhang 2: Interviewleitfaden

Industrie 4.0 Reifegrad-Ermittlung der Produktionsline XY

Dimension 1: Cyber-physische Systeme

Cyber-physische Systeme sind Systeme, die mit Netzwerken verbunden sind, mittels Sensoren und Aktoren Daten erfassen, Prozesse beeinflussen und über Mensch-Maschine-Schnittstellen verfügen. Sie ermöglichen eine Vernetzung sich situativ selbststeuernder, räumlich verteilter, Produktionsressourcen.

Die Dimension „Cyber-physische Systeme“ umfasst daher die Indikatoren Identifikation, Lokalisation und Vernetzung. Die Indikatoren Identifikation und Lokalisation beziehen sich auf das Werkstück, während sich der Indikator Vernetzung auf die Anlagen und Systeme bezieht.

Gewichtung der Dimension Cyber-physische Systeme:

Bitte geben Sie an, wie wichtig die Dimension Cyber-physische Systeme für ihre Produktion ist.

unwichtig 1 2 3 4 5 6 Sehr wichtig

Indikatoren:

Im folgenden Abschnitt werden die wesentlichen Eigenschaften der Dimension behandelt. Bitte geben Sie zu jedem Indikator die Ausprägung an, die der Realität in der Produktion am nächsten kommt.

1.1 Identifikation

- a. Keine eindeutige Identifikationsmöglichkeit
- b. Eindeutige Identitätsmerkmale; nicht maschinell lesbar
- c. Maschinell lesbare Identität mit menschlicher Aktivität
- d. Teilautomatisierte Identifikation
- e. Autonome Identifikation in Echtzeit im gesamten Prozess

1.2 Lokalisation

- a. Keine Lokalisationsmöglichkeit
- b. Grobe Verfahren zur Lokalisationsbestimmung
- c. Spezifische Lokalisation in übergeordneten Prozessen
- d. Detaillierte Lokalisation in einzelnen Unterprozessen
- e. Autonome Lokalisation in Echtzeit im gesamten Produktionsprozess

1.3 Vernetzung

- a. Keine Vernetzung der Produktion mit Informationssystemen
- b. Informationsaustausch nur persönlich (E-Mail / Telefon)
- c. Einheitliche Datenformate und Regeln zum Datenaustausch
- d. Vernetzung der Produktionsanlagen mit Datensystemen
- e. Produktionsübergreifende, vollständig vernetzte IT-Lösungen

Anmerkungen:

Bitte notieren Sie alle Anmerkungen, die Sie zur Dimension Cyber-physische Systeme noch haben:

Dimension 2: Kommunikation

Kommunikation ist eine wichtige Voraussetzung für die Umsetzung von Industrie 4.0. Maschinen müssen sowohl untereinander, als auch mit Menschen und anderen Systemen kommunizieren können.

Die Dimension „Kommunikation“ umfasst daher die Indikatoren Mensch-Maschine-Kommunikation (bilateral), Maschine-Maschine-Kommunikation und Informations- und Kommunikationstechnologien.

Gewichtung der Dimension Kommunikation:

Bitte geben Sie an, wie wichtig die Dimension Kommunikation für ihre Produktion ist.

unwichtig 1 2 3 4 5 6 Sehr wichtig

Indikatoren:

Im folgenden Abschnitt werden die wesentlichen Eigenschaften der Dimension behandelt. Bitte geben Sie zu jedem Indikator die Ausprägung an, die der Realität in der Produktion am nächsten kommt.

2.1 Mensch-Maschine-Kommunikation

- a. Kein Informationsaustausch möglich
- b. Einsatz lokaler Anzeigeräte
- c. Zentrale Produktionsüberwachung und -steuerung
- d. Einsatz mobiler Produktionsüberwachung
- e. Einsatz von tragbaren Computersystemen (Wearables)

2.2 Maschine-Maschine-Kommunikation

- a. Keine Kommunikation
- b. Feldbus-Schnittstellen
- c. Industrial Ethernet-Schnittstellen
- d. Industrial Ethernet und Zugang zum Internet
- e. Industrial Ethernet in Kombination mit Web- und Clouddiensten

2.3 Informations- und Kommunikationstechnologien in der Produktion

- a. Informationsaustausch nur persönlich (E-Mail / Telefon)
- b. Nutzung zentraler Datenserver
- c. Internetbasierte Portale mit gemeinsamer Datennutzung
- d. Automatisierter Informationsaustausch
- e. Zulieferer / Kunden sind vollständig in die Kommunikation integriert

Anmerkungen:

Bitte notieren Sie alle Anmerkungen, die Sie zur Dimension Kommunikation noch haben:

Dimension 3: Daten

Daten bilden die Grundlage aller Informationsbasierten Anwendungen. Insbesondere Produktionsdaten rücken immer näher in den Fokus der Untersuchungen. Sie bergen ein riesiges Potenzial.

Die Dimension „Daten“ umfasst daher die Indikatoren Sensorik / Aktorik, Daten-Analyse, Daten-Verwendung und Daten-Speicherung. Sensoren liefern einen Informationsinput, während Aktoren an der Ausführung von Befehlen beteiligt sind.

Gewichtung der Dimension Daten:

Bitte geben Sie an, wie wichtig die Dimension Daten für ihre Produktion ist.

unwichtig 1 2 3 4 5 6 Sehr wichtig

Indikatoren:

Im folgenden Abschnitt werden die wesentlichen Eigenschaften der Dimension behandelt. Bitte geben Sie zu jedem Indikator die Ausprägung an, die der Realität in der Produktion am nächsten kommt.

3.1 Sensorik / Aktorik

- a. Keine Nutzung von Sensoren / Aktoren
- b. Einbindung von Sensoren zur Datenerfassung
- c. Erfassung und Verarbeitung von Sensordaten
- d. Nutzung von Sensordaten zu Analysezielen
- e. Autonome Reaktion von Aktoren auf Basis von Sensordaten

3.2 Daten-Analyse

- a. Keine Datenanalyse
- b. Auswertung einzelner Produktionsdaten mit menschlicher Aktivität
- c. Teilautomatisierte Datenanalyse einzelner Kennwerte
- d. Prozessübergreifende automatisierte Datenanalyse
- e. Dezentralisierte integrierte Datenanalyse

3.3 Daten-Verwendung

- a. Keine Ausnutzung vorhandener Daten
- b. Speicherung von Daten zur Dokumentation
- c. Prozessüberwachung auf Basis von Datenauswertung
- d. Prognosefähigkeit und Prozessplanung durch Datenauswertung
- e. Prozesssimulation mit Hilfe von Digitalen Zwillingen

3.4 Daten-Speicherung

- a. Keine Prozessdatenspeicherung
- b. Lokale und isolierte Datenspeicherung
- c. Daten werden zentral gespeichert
- d. Daten werden dezentral im Netzwerk gespeichert
- e. Daten stehen den Teilnehmern der Wertschöpfungskette in der Cloud zur Verfügung

Anmerkungen:

Bitte notieren Sie alle Anmerkungen, die Sie zur Dimension Daten noch haben:

Dimension 4: Kundenorientierte Prozesse

Kundenorientierte Prozesse sind solche, die besonders von kurzfristigen Änderungswünschen der Kunden beeinflusst werden. Externe Einflüsse und Probleme können besonders in eng getakteten Produktionen zu Problemen führen. Deshalb zählt die Flexibilität der Prozesse zu einem der wichtigsten Ziele von Industrie 4.0

Gewichtung der Dimension Kundenorientierte Prozesse:

Bitte geben Sie an, wie wichtig die Dimension Kundenorientierte Prozesse für ihre Produktion ist.

unwichtig 1 2 3 4 5 6 Sehr wichtig

Indikatoren:

Im folgenden Abschnitt werden die wesentlichen Eigenschaften der Dimension behandelt. Bitte geben Sie zu jedem Indikator die Ausprägung an, die der Realität in der Produktion am nächsten kommt.

4.1 Effizienz bei kleinen Losgrößen

- a. Starre Produktionslose; geringer Anteil an Gleichteilen
- b. Nutzung von flexiblen Produktionsmitteln und Gleichteilen
- c. Einsatz flexibler Produktionsmittel und modularer Baukästen
- d. Bauteilgetriebene flexible Produktion variierender Losgrößen
- e. Bauteilgetriebene, modulare Produktion von Kleinstmengen

4.2 Adaptionsfähigkeit

- a. Keine Möglichkeit zur Anpassung der Produktionsprozesse
- b. Prozesse sind kaum anpassbar – starre Produktion
- c. Prozesse sind anpassbar aber mit langen Rüstzeiten
- d. Prozesse sind flexibel und können zwischen Schritten angepasst werden
- e. Prozesse können in Echtzeit flexibel angepasst werden

Anmerkungen:

Bitte notieren Sie alle Anmerkungen, die Sie zur Dimension Agilität noch haben:

Dimension 5: Produktionsprozesse

Neben den Anlagen und Systemen spielen auch Produktionsprozesse eine Rolle für eine erfolgreiche Industrie-4.0-Strategie. Wie Prozesse geplant und gesteuert werden ist dabei ebenso wichtig, wie die Anpassungsfähigkeit der Prozesse selbst.

Die Dimension „Prozesse“ umfasst die Indikatoren Planung & Steuerung und Produktionsprozesse.

Gewichtung der Dimension Produktionsprozesse:

Bitte geben Sie an, wie wichtig die Dimension Produktionsprozesse für ihre Produktion ist.

unwichtig 1 2 3 4 5 6 Sehr wichtig

Indikatoren:

Im folgenden Abschnitt werden die wesentlichen Eigenschaften der Dimension behandelt. Bitte geben Sie zu jedem Indikator die Ausprägung an, die der Realität in der Produktion am nächsten kommt.

5.1 Planung & Steuerung

- a. Keine Planung & Steuerung der Produktion
- b. Starre Planung & Steuerung der Produktion ohne Anpassungsmöglichkeiten
- c. Planung & Steuerung auf Basis von Auftrags- und historischen Daten
- d. Anpassungsfähige Planung & Steuerung unter Einbezug von Echtzeitdaten
- e. Automatisierte Planung auf Basis von Simulationen; Intelligente Produkte steuern ihre Produktion

5.2 Produktionsprozesse

- a. Starre, unflexible Produktionsprozesse
- b. Standardisierte Produktionsprozesse
- c. Modulare Produktionsprozesse; Baukastenprinzip
- d. Einsatz anpassbarer, flexibler Prozesse und softwaregestützter Simulation
- e. Intelligente Fabrik; Produkt steuert Produktion; Einsatz digitaler Zwillinge

Anmerkungen:

Bitte notieren Sie alle Anmerkungen, die Sie zur Dimension Prozesse noch haben:

Eidesstattliche Versicherung

Loh, Henning

182026

Name, Vorname

Matr.-Nr.

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel

Aufbau eines Referenzmodells zur reifegradbasierten Ermittlung des Digitalisierungsgrades der Produktion eines Unternehmens im Maschinen- und Anlagenbau

selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ort, Datum

Unterschrift

Belehrung:

Wer vorsätzlich gegen eine die Täuschung über Prüfungsleistungen betreffende Regelung einer Hochschulprüfungsordnung verstößt, handelt ordnungswidrig. Die Ordnungswidrigkeit kann mit einer Geldbuße von bis zu 50.000,00 € geahndet werden. Zuständige Verwaltungsbehörde für die Verfolgung und Ahndung von Ordnungswidrigkeiten ist der Kanzler/die Kanzlerin der Technischen Universität Dortmund. Im Falle eines mehrfachen oder sonstigen schwerwiegenden Täuschungsversuches kann der Prüfling zudem exmatrikuliert werden. (§ 63 Abs. 5 Hochschulgesetz - HG -)

Die Abgabe einer falschen Versicherung an Eides statt wird mit Freiheitsstrafe bis zu 3 Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

Die Technische Universität Dortmund wird ggfls. elektronische Vergleichswerkzeuge (wie z.B. die Software „turnitin“) zur Überprüfung von Ordnungswidrigkeiten in Prüfungsverfahren nutzen.

Die obenstehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

Ort, Datum

Unterschrift