

Markus Fischer

---

# Implementierung von Manufacturing Execution Systems basierend auf Industrie-4.0-Reifegradmodellen



Herausgeber:  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günther Schuh



# Implementierung von Manufacturing Execution Systems basierend auf Industrie-4.0-Reifegradmodellen

## Implementation of Manufacturing Execution Systems based on Industry 4.0 Maturity Models

Von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Markus Franz Peter Fischer

### **Berichter/in:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günther Schuh  
apl. Prof. Dr.-Ing. Volker Stich

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Januar 2022



# SCHRIFTENREIHE RATIONALISIERUNG

**Markus Fischer**

Implementierung von Manufacturing  
Execution Systems basierend auf  
Industrie-4.0-Reifegradmodellen

**Herausgeber:**

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh

Band 182

***fir***  an der  
**RWTH Aachen**

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Markus Fischer:

Implementierung von Manufacturing Execution Systems basierend auf  
Industrie-4.0-Reifegradmodellen

1. Auflage, 2022

Apprimus Verlag, Aachen, 2022

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien  
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen

Internet: [www.apprimus-verlag.de](http://www.apprimus-verlag.de), E-Mail: [info@apprimus-verlag.de](mailto:info@apprimus-verlag.de)

ISBN 978-3-98555-063-0

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2022)

---

## Danksagung

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand im Laufe meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungsinstitut für Rationalisierung e. V. (FIR) an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH Aachen University) in Aachen.

Mein Dank für die Möglichkeit der Promotion gilt meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Günther Schuh sowie dem Korreferenten Prof. Dr.-Ing. Volker Stich. Darüber hinaus danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie Herrn Prof. Dr. rer. nat. Carlo Holly für die Übernahme des Beisitzes in der Prüfungskommission.

Zudem möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen, insbesondere in meinem Bereich Produktionsmanagement, für die herausragende Gemeinschaft, die unermüdliche, gegenseitige Unterstützung und die besonders freundschaftliche Zusammenarbeit bedanken. Durch das besondere Teamgefühl am Institut konnte ich mich persönlich sowie fachlich weiterentwickeln – eine Zeit, an die ich mich immer gerne erinnern werden. Besonders danken möchte ich Dr. Philipp Wetzchewald, Dr. Andreas Külschbach, Svenja Scholz und Tobias Schröer, die mich ermutigt haben, das Promotionsvorhaben anzugehen und mir während des Entstehungsprozesses stets mit Rat und Tat zur Seite standen.

Darüber hinaus möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Kolleg:innen und Freund:innen Katharina Berwing, Dr. Moritz Schröter, Felix Steinlein, Dr. Themo Voswinckl, Jockim Janßen und Dino Hardjosuwito bedanken für die Unterstützung auf unterschiedlicher Weise während der gesamten Erstellungsphase meiner Dissertation.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Freunden außerhalb des FIR für die konstante, freundschaftliche Unterstützung und willkommene Zerstreuung während der zeitintensiven Promotion bedanken.

Mein größter und innigster Dank gilt meiner Familie. Euer immerwährender Rückhalt und die liebevolle Unterstützung ermöglichten mir erst, diesen besonderen Weg einzuschlagen und zu Ende zu gehen.

Aachen, 11. Januar 2022

Markus Franz Peter Fischer



## Zusammenfassung

Mit dem Fokus produzierender Unternehmen auf der digitalen Transformation stellen Manufacturing-Execution-Systeme marktreife, modulare Softwarelösungen zur Befähigung der Transformation dar. MES können in Industrie-4.0-Initiativen im Gestaltungsfeld der Informationstechnologie zur horizontalen und vertikalen Integration der wertschöpfenden und unterstützenden Prozesse in der Produktion eingesetzt werden. Für Unternehmen, insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen, entstehen hohe interne und externe Kosten bei der Implementierung von MES-Lösungen.

Der modulare Aufbau der ME-Systeme ermöglicht die sukzessive, also die zeitlich und örtlich versetzte, Einführung der Systeme in den Unternehmen. Zur erfolgreichen Umsetzung der sukzessiven Implementierung ist die Planung der Implementierungsschritte entscheidend. Hierbei müssen sowohl die zu implementierenden MES-Funktionsmodule als auch die Implementierungsorte, also Unternehmensfunktionen sowie möglicherweise Standorte, festgelegt werden. Unternehmen stehen jedoch vor der Herausforderung, die Implementierung so zu gestalten, dass die Reihenfolge der sukzessiv einzuführenden Funktionsmodule einen möglichst großen Nutzen bei der unternehmensspezifischen Ausgangssituation erzielt. Die Gestaltung der Implementierung wird sowohl aufgrund nicht ausreichend beschriebener Wirkungszusammenhänge zwischen den Funktionen eines ME-Systems und deren Einfluss auf den Nutzen von Unternehmen im Allgemeinen und in Bezug zu Industrie 4.0 als auch aufgrund fehlender praktisch anwendbarer Vorgehen erschwert.

Ziel der vorliegenden Dissertationsschrift ist daher die Entwicklung eines Vorgehens zur Bestimmung der Implementierungsreihenfolge von Manufacturing-Execution-Systemen unter Berücksichtigung des Industrie-4.0-Reifegrades des Unternehmens. Hierzu werden sowohl der Implementierungskontext der Produktion als auch der Aufbau und die Funktionen von ME-Systemen umfassend beschrieben. Anschließend wird ein Reifegradmodell aufgebaut, welches die Unterstützung von ME-Systemen bei der Durchführung von Aufgaben und Prozessen im Bereich der Produktion in Bezug zum Industrie-4.0-Reifegrad eines Unternehmens misst. Reifegradmodelle stellen in diesem Kontext ein geeignetes Werkzeug dar, das Implementierungsprojekt der ME-Systeme im Kontext von Industrie-4.0-Initiativen zu bewerten. Die Teilmodelle sowie das Reifegradmodell bilden die Grundlage zur Entwicklung eines anwendbaren Vorgehens, welches Unternehmen bei der Gestaltung der reifegradbasierten Implementierung von Manufacturing-Execution-Systemen unterstützt.

Mit dieser Arbeit erhalten Unternehmen ein konkretes Vorgehen, um ihren eigenen Stand in Bezug zur Digitalisierung sowie das Potenzial einer MES-Implementierung in den Unternehmensfunktionen der Produktion zu bewerten. Damit können Unternehmen anschließend anhand eines Industrie-4.0-Reifegradmodells die Implementierung einer MES-Lösung gestalten.

## Summary

With the focus of manufacturing companies on digital transformation, Manufacturing Execution Systems represent market-ready, modular software solutions for manufacturing companies. MES are part of Industrie 4.0 initiatives for the horizontal and vertical integration of value-adding and supporting processes in production and can be located in the strategy area of information technology. For companies, especially for small and medium-sized enterprises, high internal and external costs arise with the implementation of MES solutions.

The modular structure of ME systems enables the successive - temporally and locally staggered - introduction of the systems into the companies. The planning of the implementation steps is decisive for the successful realization of the successive implementation. The MES function modules, that have to be implemented, and the implementation locations, i.e. company functions and possibly sites, must be defined. However, companies face the challenge of designing the implementation of the MES in such a way that the sequence of the function modules to be successively implemented achieves the greatest possible benefit based on the company-specific situation. The design of the implementation is not sufficiently described due of the interdependencies between the functions of an ME system and their influence on the benefit of companies in general and in relation to Industry 4.0. Furthermore, there is a lack of practically applicable methods.

The aim of this thesis is to develop a method for determining the implementation sequence of Manufacturing Execution Systems, taking into account the Industrie 4.0 maturity level of a company. For this purpose, both the implementation context of production and the structure and functions of ME systems are described in detail. A maturity model is then built that measures the support of ME systems in the execution of tasks and processes in the area of production in relation to the Industrie 4.0 maturity level of a company. In this context, maturity models are a suitable tool for evaluating the implementation project of ME systems in the context of Industrie 4.0 initiatives. The sub models and the maturity model form the basis for developing an applicable method that supports companies in designing the maturity-based implementation of manufacturing execution systems.

This work provides companies with a concrete method for evaluating their own status with regard to digitization and the potential of an MES implementation in the corporate functions of production. This enables companies to subsequently design the implementation of an MES solution on the basis of an Industrie 4.0 maturity model.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung .....	7
1.3 Wissenschaftstheoretische Einordnung und Aufbau der Arbeit .....	8
<b>2 Terminologie und Eingrenzung der Untersuchung</b> .....	<b>13</b>
2.1 Produzierende Unternehmen .....	13
2.2 Informationssysteme in produzierenden Unternehmen .....	17
2.2.1 Enterprise-Resource-Planning-System .....	19
2.2.2 Advanced-Planning-and-Scheduling-System .....	20
2.2.3 Warehouse-Management-System .....	21
2.2.4 Product-Lifecycle-Management-System .....	22
2.2.5 Instandhaltungsmanagement-System .....	24
2.2.6 Manufacturing-Execution-System .....	24
2.3 Lebenszyklus von Informationssystemen .....	29
2.3.1 Implementierung von Informationssystemen .....	32
2.4 Reifegradmodelle .....	35
2.5 Eingrenzung des Untersuchungsbereiches .....	37
<b>3 Stand der Erkenntnisse</b> .....	<b>41</b>
3.1 Ansätze und Beiträge zu Industrie-4.0-Reifegradmodellen .....	41
3.2 Ansätze und Beiträge zur Bewertung des Nutzens von Informationssystemen .....	44
3.3 Ansätze und Beiträge zur Implementierung von Informationssystemen .....	49
3.4 Kritische Würdigung des Stands der Erkenntnisse .....	54
<b>4 Herleitung des Konzeptansatzes</b> .....	<b>57</b>
4.1 Anforderungen an das zu entwickelnde Vorgehen zur Bestimmung der Implementierungsreihenfolge .....	57
4.2 Methodische Grundlagen .....	59
4.2.1 Systemtheorie .....	59
4.2.2 Modellbildung .....	63
4.2.3 Methodische Entwicklung von Reifegradmodellen .....	64
4.2.4 Typisierung und Morphologie .....	68
4.2.5 Analyse von Ursache-Wirkungszusammenhängen in Systemen ...	70

4.3	Konkretisierung der Herangehensweise.....	71
<b>5</b>	<b>Beschreibungselemente produzierender Unternehmen und von Manufacturing-Execution-Systemen.....</b>	<b>75</b>
5.1	Unternehmensziele produzierender Unternehmen für die Nutzenbewertung einer MES-Implementierung.....	75
5.2	Identifikation relevanter Kernaufgaben produzierender Unternehmen .....	83
5.2.1	Kernaufgaben der Arbeitsplanung.....	83
5.2.2	Kernaufgaben der Entwicklung und Konstruktion.....	87
5.2.3	Kernaufgaben der Fertigung und Montage .....	92
5.2.4	Kernaufgaben der Instandhaltung .....	93
5.2.5	Kernaufgaben der Produktionslogistik.....	97
5.2.6	Kernaufgaben der Produktionsplanung und -steuerung.....	99
5.2.7	Kernaufgaben der Qualitätssicherung.....	111
5.3	Beschreibung und Klassifikation der Funktionen eines Manufacturing-Execution-Systems .....	119
5.3.1	Beschreibung der Funktionsmodule.....	119
5.3.2	Wirkungszusammenhänge und Abhängigkeiten der MES-Funktionalitäten .....	143
<b>6</b>	<b>Reifegradbasierte Bewertung des Nutzens von Manufacturing-Execution-Systemen.....</b>	<b>147</b>
6.1	Deduktion der Reifegradindikatoren .....	147
6.1.1	Vorgehen zur Deduktion der Reifegradindikatoren .....	147
6.1.2	Wirkungszusammenhänge zwischen den Kernaufgaben produzierender Unternehmen und den MES-Funktionen.....	150
6.2	Aufstellung und Erläuterung der Reifegrad-Kennwert-Matrix zur Bewertung der Unterstützung von ME-Systemen .....	173
6.2.1	Morphologischer Kasten zur Beschreibung der Reifegradstufen des <i>acatech Industrie 4.0 Maturity Index</i> .....	173
6.2.2	Beschreibung und Erläuterung der Reifegradstufen des <i>acatech Industrie 4.0 Maturity Index</i> .....	184
6.2.3	Bewertung des Einsatzes von ME-Systemen in produzierenden Unternehmen .....	192
6.3	Untersuchung der Wirkungszusammenhänge zwischen Aufgaben und Nutzen des Unternehmens durch eine MES-Implementierung .....	210
<b>7</b>	<b>Gestaltung der reifegradbasierten Implementierung von Manufacturing-Execution-Systemen .....</b>	<b>221</b>
7.1	Konzeption des Vorgehens zur reifegradbasierten Implementierung von Manufacturing-Execution-Systemen .....	221
7.2	Detaillierung des Vorgehens zur reifegradbasierten Implementierung von Manufacturing-Execution-Systemen .....	225

---

7.2.1	Beschreibung des Anstoß-Momentes .....	225
7.2.2	Situationsanalyse .....	226
7.2.3	Zielformulierung .....	228
7.2.4	Synthese und Analyse von Lösungen .....	231
7.2.5	Bewertung .....	234
7.2.6	Entscheidung und Ergebnis .....	234
7.3	Zusammenfassung .....	235
<b>8</b>	<b>Evaluierung der Modelle im Anwendungszusammenhang .....</b>	<b>237</b>
8.1	Evaluierung der Zwischenergebnisse .....	237
8.1.1	Beschreibungsmodell der MES-Funktionen .....	237
8.1.2	Validierung der Reifegrad-Kennwert-Matrix .....	242
8.2	Evaluierung des Vorgehens anhand einer Fallstudie bei einem Anwendungsunternehmen .....	243
8.2.1	Ausgangssituation des Anwendungsunternehmens .....	244
8.2.2	Anwendung des Vorgehens .....	245
8.2.3	Diskussion der Ergebnisse der Fallstudienuntersuchung .....	253
8.3	Zusammenfassende Bewertung der Evaluierung .....	254
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>257</b>
9.1	Zusammenfassung .....	257
9.2	Ausblick .....	261
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>263</b>
	<b>Veröffentlichungen von Fischer, Markus .....</b>	<b>287</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>289</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Referenzmodell RAMI 4.0.....	2
Abbildung 1-2: Referenzarchitektur des Internet of Production .....	3
Abbildung 1-3: Aufwand-Nutzenverläufe verschiedener Implementierungsstrategien .....	6
Abbildung 1-4: Aufbau der Dissertationsschrift.....	11
Abbildung 2-1: Funktionale Struktur eines produzierenden Unternehmens.....	14
Abbildung 2-2: Hierarchiemodell der DIN EN 62264-1 .....	19
Abbildung 2-3: Supply-Chain-Planning-Matrix .....	21
Abbildung 2-4: CAx-Landschaft.....	23
Abbildung 2-5: Wirkungskreislauf und Funktionen eines MES .....	26
Abbildung 2-6: Übersicht über mögliche Schnittstellen und Überschneidungen eines MES .....	29
Abbildung 2-7: Lebenszyklusmodell für Informationssysteme nach KRCMAR,.....	30
Abbildung 2-8: Morphologischer Kasten zur Gestaltung von Implementierungsstrategie .....	33
Abbildung 2-9: Eingrenzung des Untersuchungs- und Betrachtungsraumes .....	37
Abbildung 4-1: Allgemeine Darstellung eines Systems sowie der relevanten Elemente .....	61
Abbildung 4-2: Vorgehensmodell zur Entwicklung von Reifegradmodellen nach BRUIN ET AL.....	65
Abbildung 4-3: Vorgehensmodell zur Entwicklung von Reifegradmodellen nach BECKER ET AL.....	66
Abbildung 4-4: Vorgehensmodell zur Entwicklung von Reifegradmodellen nach AKKASOGLU.....	67
Abbildung 4-5: Angepasstes Vorgehensmodell der Dissertationsschrift.....	72
Abbildung 5-1: Zielsystem zur Messung des Nutzens der MES-Einführung.....	76
Abbildung 5-2: Kennzahlen zur Messung des Nutzens von MES- Einführungen .....	82
Abbildung 5-3: Strukturierung der Kernaufgaben .....	83
Abbildung 5-4: Strukturierung der Arbeitsvorbereitung.....	84
Abbildung 5-5: Kernaufgaben der Arbeitsplanung .....	87

Abbildung 5-6: Aktivitäten der Entwicklung und Konstruktion nach der VDI-Richtlinie 2221 .....	88
Abbildung 5-7: Kernaufgaben der Entwicklung und Konstruktion (1/2).....	90
Abbildung 5-8: Kernaufgaben der Entwicklung und Konstruktion (2/2).....	92
Abbildung 5-9: Kernaufgaben der Fertigung und Montage .....	93
Abbildung 5-10: Kernaufgaben der Instandhaltung .....	97
Abbildung 5-11: Kernaufgaben der Produktionslogistik .....	99
Abbildung 5-12: Aufgabensicht des Aachener PPS-Modell .....	100
Abbildung 5-13: Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung (1/3).....	104
Abbildung 5-14: Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung (2/3).....	107
Abbildung 5-15: Kernaufgaben der Produktionsplanung und -steuerung (3/3).....	111
Abbildung 5-16: Kernaufgaben der Qualitätssicherung .....	118
Abbildung 5-17: Strukturierung der MES-Funktionen in Funktionsklassen und -module.....	120
Abbildung 5-18: Funktionen des MES-Moduls <i>Auftragsmanagement</i> .....	120
Abbildung 5-19: Funktionen des MES-Moduls <i>Betriebsmittelmanagement</i> .....	122
Abbildung 5-20: Funktionen des MES-Moduls <i>Datenerfassung</i> .....	124
Abbildung 5-21: Funktionen des MES-Moduls <i>Energiemanagement</i> .....	126
Abbildung 5-22: Funktionen des MES-Moduls <i>Feinplanung und Feinsteuerung</i> ...	128
Abbildung 5-23: Funktionen des MES-Moduls <i>Informationsmanagement</i> .....	131
Abbildung 5-24: Funktionen des MES-Moduls <i>Leistungsanalyse</i> .....	133
Abbildung 5-25: Funktionen des MES-Moduls <i>Materialmanagement</i> .....	135
Abbildung 5-26: Funktionen des MES-Moduls <i>Personalmanagement</i> .....	137
Abbildung 5-27: Funktionen des MES-Moduls <i>Qualitätsmanagement</i> .....	140
Abbildung 5-28: Abhängigkeiten der MES-Module .....	143
Abbildung 6-1: Struktur der Aufgaben-Funktionsmatrix .....	149
Abbildung 6-2: Zusammenfassung der Fälle für die Darstellung der Wirkungszusammenhänge zwischen MES-Funktion und Kernaufgabe .....	150
Abbildung 6-3: Aufgaben-Funktionsmatrix der <i>Arbeitsplanung</i> .....	151
Abbildung 6-4: Aufgaben-Funktionsmatrix der <i>Entwicklung und Konstruktion</i> .....	153
Abbildung 6-5: Aufgaben-Funktionsmatrix der <i>Fertigung und Montage</i> .....	154

---

Abbildung 6-6: Aufgaben-Funktionsmatrix der <i>Instandhaltung (1/2)</i> .....	155
Abbildung 6-7: Aufgaben-Funktionsmatrix der <i>Instandhaltung (2/2)</i> .....	157
Abbildung 6-8: Aufgaben-Funktionsmatrix der <i>Produktionslogistik</i> .....	159
Abbildung 6-9: Aufgaben-Funktionsmatrix der <i>Produktionsplanung und -steuerung (1/3)</i> .....	161
Abbildung 6-10: Aufgaben-Funktionsmatrix der <i>Produktionsplanung und -steuerung (2/3)</i> .....	162
Abbildung 6-11: Aufgaben-Funktionsmatrix der <i>Produktionsplanung und -steuerung (3/3)</i> .....	165
Abbildung 6-12: Aufgaben-Funktionsmatrix der <i>Qualitätssicherung (1/2)</i> .....	167
Abbildung 6-13: Aufgaben-Funktionsmatrix der <i>Qualitätssicherung (2/2)</i> .....	169
Abbildung 6-14: Aggregierte Aufgaben-Funktionsmatrix .....	172
Abbildung 6-15: <i>acatech Industrie 4.0 Maturity Index</i> .....	175
Abbildung 6-16: Morphologischen Kastens zur Beschreibung der Reifegradstufen des <i>acatech Industrie 4.0 Maturity Index</i> .....	184
Abbildung 6-17: Darstellung der Reifegradstufen des <i>acatech Industrie 4.0 Maturity Index</i> .....	185
Abbildung 6-18: Ausprägung der Aufgaben und Merkmale des Informationsmanagements für die Stufe <i>Sichtbarkeit</i> .....	187
Abbildung 6-19: Ausprägung der Aufgaben und Merkmale des Informationsmanagements für die Stufe <i>Transparenz</i> .....	189
Abbildung 6-20: Ausprägung der Aufgaben und Merkmale des Informationsmanagements für die Stufe <i>Prognosefähigkeit</i> .....	190
Abbildung 6-21: Ausprägung der Aufgaben und Merkmale des Informationsmanagements für die Stufe <i>Adaptierbarkeit</i> .....	192
Abbildung 6-22: Vorliegende Ausprägungen der Aufgaben und Merkmale des Informationsmanagements .....	194
Abbildung 6-23: Reifegrad-Kennwert-Matrix für die Aufgabe der wertschöpfenden Tätigkeiten.....	194
Abbildung 6-24: Reifegrad-Kennwert-Matrix der <i>Arbeitsplanung</i> .....	195
Abbildung 6-25: Reifegrad-Kennwert-Matrix der Unternehmensfunktion <i>Entwicklung und Konstruktion</i> .....	196
Abbildung 6-26: Reifegrad-Kennwert-Matrix der <i>Fertigung und Montage</i> .....	197
Abbildung 6-27: Reifegrad-Kennwert-Matrix der <i>Instandhaltung (1/2)</i> .....	198
Abbildung 6-28: Reifegrad-Kennwert-Matrix der <i>Instandhaltung (2/2)</i> .....	199

Abbildung 6-29: Reifegrad-Kennwert-Matrix der <i>Produktionslogistik</i> .....	200
Abbildung 6-30: Reifegrad-Kennwert-Matrix der <i>Produktionsplanung und -steuerung (1/2)</i> .....	201
Abbildung 6-31: Reifegrad-Kennwert-Matrix der <i>Produktionsplanung und -steuerung (2/2)</i> .....	203
Abbildung 6-32: Reifegrad-Kennwert-Matrix der <i>Qualitätssicherung (1/2)</i> .....	204
Abbildung 6-33: Reifegrad-Kennwert-Matrix der <i>Qualitätssicherung (2/2)</i> .....	206
Abbildung 6-34: Zusammenfassung der Reifegrad-Kennwert-Matrix auf Ebene der Aufgabengruppe.....	208
Abbildung 6-35: Bewertete Reifegrad-Kennwert-Matrix auf Ebene der Aufgabengruppen.....	209
Abbildung 6-36: Schematisches Vorgehen zum Aufbau der Einflussmatrix.....	211
Abbildung 6-37: Einflussmatrix der Wirkungszusammenhänge zwischen MES-Funktionsklassen und Unternehmenszielen.....	212
Abbildung 6-38: Einflussmatrix der Wirkungszusammenhänge zwischen MES-Funktionsklassen und Unternehmenszielen.....	213
Abbildung 7-1: Vorgehensschritte des Problemlösungszyklus.....	222
Abbildung 7-2: Vorgehensmodell zur reifegradbasierten Implementierung von ME-Systemen.....	225
Abbildung 7-3: Beispielhafte Ermittlung des Status quo in der Unternehmensfunktion <i>Fertigung und Montage</i> .....	227
Abbildung 7-4: Ermittlung des Potenzials auf Ebene der Unternehmensfunktionen mithilfe der Reifegrad-Kennwert-Matrizen.....	228
Abbildung 7-5: Beispielhafte Durchführung des paarweisen Vergleiches mit Anpassung der Gewichtung.....	229
Abbildung 7-6: Ableitung der gewichteten Zielunterstützung einer Unternehmensfunktion.....	230
Abbildung 7-7: Vorgehen zur Identifikation der relevanten Funktionen für die Einführung eines MES.....	232
Abbildung 7-8: Vorgehen zur Gewichtung der Funktionsklassen und -module für die Ableitung der Reihenfolge.....	233
Abbildung 7-9: Vorgehen zur Bestimmung der reifegradbasierten Reihenfolge für die Implementierung eines MES.....	234
Abbildung 8-1: Auswertung der durch MES-Lösungen angebotenen MES-Funktionen.....	240

---

Abbildung 8-2:	Ergebnis der Situationsanalyse beim Anwendungsunternehmen in der Reifegrad-Kennwert-Matrix .....	248
Abbildung 8-3:	Ermittlung des Potenzials einer MES-Lösung bei dem Anwendungsunternehmen.....	250
Abbildung 8-4:	Ausgefüllter paarweiser Vergleich im Rahmen der Zielvalidierung .....	251
Abbildung 8-5:	Reihenfolge der Funktionsmodule im Rahmen der Einzelfallstudie bei dem Anwendungsunternehmen .....	252
Abbildung 8-6:	Lösungsalternativen für das Anwendungsunternehmen .....	252



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Übersicht der Akronyme sowie Aufgaben von CAx-Systemen .....	23
Tabelle 3-1:	Erfüllung der Kriterien.....	55
Tabelle 9-1:	Gegenüberstellung der Funktionen der Dissertationsschrift und der Trovarit AG (1/7).....	289
Tabelle 9-2:	Gegenüberstellung der Funktionen der Dissertationsschrift und der Trovarit AG (2/7).....	290
Tabelle 9-3:	Gegenüberstellung der Funktionen der Dissertationsschrift und der Trovarit AG (3/7).....	291
Tabelle 9-4:	Gegenüberstellung der Funktionen der Dissertationsschrift und der Trovarit AG (4/7).....	292
Tabelle 9-5:	Gegenüberstellung der Funktionen der Dissertationsschrift und der Trovarit AG (5/7).....	293
Tabelle 9-6:	Gegenüberstellung der Funktionen der Dissertationsschrift und der Trovarit AG (6/7).....	294
Tabelle 9-7:	Gegenüberstellung der Funktionen der Dissertationsschrift und der Trovarit AG (7/7).....	295



## Abkürzungsverzeichnis

ANP	Analytischer Netzwerkprozess
APS	Advanced Planning and Scheduling
ATP	Available-to-Promise
APQP	Advanced Product Quality Planning
BDE	Betriebsdatenerfassung
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAID	Computer Aided Industrial Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CA(P)P	Computer Aided (Process) Planning
CAQ	Computer Aided Quality Assurance
CAX	Computer Aided everything
CCMI	Capability-Maturity-Model-Integration
CRM	Customer-Relationship-Management
CTP	Capable-to-Promise
DNC	Direct Numerical Control
DREAMY	Digital Readiness Assessment Maturity Model
E-BOM	Engineering Bill of Material (dt. Konstruktionsstücklisten)
ERP	Enterprise-Resource-Planning
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoP	Internet of Production
IPS	Instandhaltungsplanungssysteme
ISA	International Society of Automation
ISO	International Organization of Standardization
M-BOM	Manufacturing Bill of Material (deutsch: Fertigungsstücklisten)
MDE	Maschinendatenerfassung

MES	Manufacturing-Execution-System
MESA	Manufacturing Enterprise Association
MOM	Manufacturing-Operations-Management
MOM/CMM	Manufacturing Operations Management Capability Maturity Model
NC	Numerical Control
OEE	Overall-Equipment-Effectiveness
PLM	Product-Lifecycle-Management
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
RAMI 4.0	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0
ROI	Return on Investment
SCM	Supply-Chain-Management
SIMMI	System Integration Maturity Model Industry 4.0
SOAMM	Service-Oriented Architecture Maturity Model
SPC	Statistische Prozessregelung (engl. Statistical Process Control)
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
WMS	Warehouse-Management-System
VDI	Verband Deutscher Ingenieure e. V.
ZVEI	Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

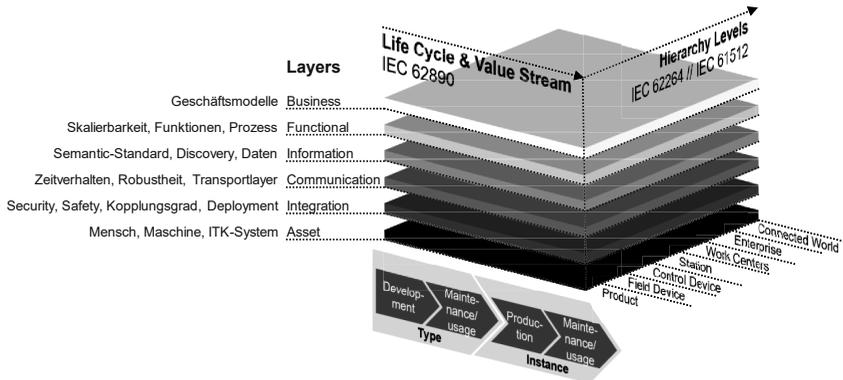
Unternehmen, unabhängig von ihrer Größe, stehen schon seit Jahren vor der Herausforderung, den hohen und stetig steigenden Anforderungen ihrer Kundenmärkte gerecht zu werden. Kunden fordern immer häufiger individuelle und auch nachhaltige Produkte mit kurzen Lieferzeiten bei einer hohen Qualität. Die externen Anforderungen werden unternehmensintern zu Herausforderungen insbesondere in der Entwicklung und Produktion, da die Kundenanforderungen zu einer steigenden Variantenzahl mit kurzen Entwicklungszyklen führen. Diese müssen bei einer gleichzeitigen Steigerung der Leistungsfähigkeit und Flexibilität der Produktionsprozesse realisiert werden. (s. SODER 2017, S. 3; SCHMITZ 2018, S. 1; HÖLLTHALER ET AL. 2018, S. 148) Durch die steigende Individualisierung sinken die Größen der Aufträge und Lose in der Fertigung, sodass die Komplexität der Planung und Steuerung der Fertigung und Montage ansteigt. (s. KUNATH U. WINKLER 2019, S. 269)

Nach der Zielversion der „Industrie 4.0“ ist die Digitalisierung des Unternehmens ein geeigneter Befähiger zur Bewältigung der externen und internen Herausforderungen. Der Begriff „Industrie 4.0“ wurde im Jahr 2011 als Bezeichnung für die Vernetzung der analogen mit der digitalen Welt durch Informations- und Kommunikationstechnologien eingeführt. (s. SCHUH ET AL. 2017a, S. 10) Dabei steht „die Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus“ (PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 (HRSG.) 2015, S. 8) im Fokus. Die Basis für die Organisation und Steuerung stellen dabei echtzeitnah verfügbare Informationen aus der gesamten Wertschöpfungskette dar. Daneben wird die Fähigkeit zur Verarbeitung der Informationen mit dem Ziel der Gestaltung der Wertschöpfung als Grundlage gesehen. Ziel ist die Bewältigung der Dynamik der Märkte durch echtzeitfähige, selbst organisierende und lernende Unternehmen in Wertschöpfungsnetzwerke nach unternehmensspezifischen Zielkriterien. (s. PLATTFORM INDUSTRIE 4.0 (HRSG.) 2015, S. 8; SCHUH ET AL. 2017a, S. 12; HARLAND 2019, S. 3)

Zur Erreichung des Zielzustandes des selbst organisierenden, wandlungsfähigen und lernenden Unternehmens bedarf es nach SCHMITZ UND WETZCHEWALD einer Anpassung der heutigen Entscheidungsprozesse, welche vornehmlich auf Erfahrungswissen beruhen und ohne Einbindung externer und interner Anspruchsgruppen gestaltet sind. Ein Grund für lange Entscheidungsprozesse und häufige Schleifen in diesen ist die schlechte Verfügbarkeit von Informationen, welche erst im Laufe der Durchführung gesucht und bewertet werden müssen. Dadurch entstehende Latenzen führen zu Produktivitätsverlusten und einer Erhöhung der Kosten. (s. SCHMITZ 2018, S. 1; WETZCHEWALD 2020, S. 1–2)

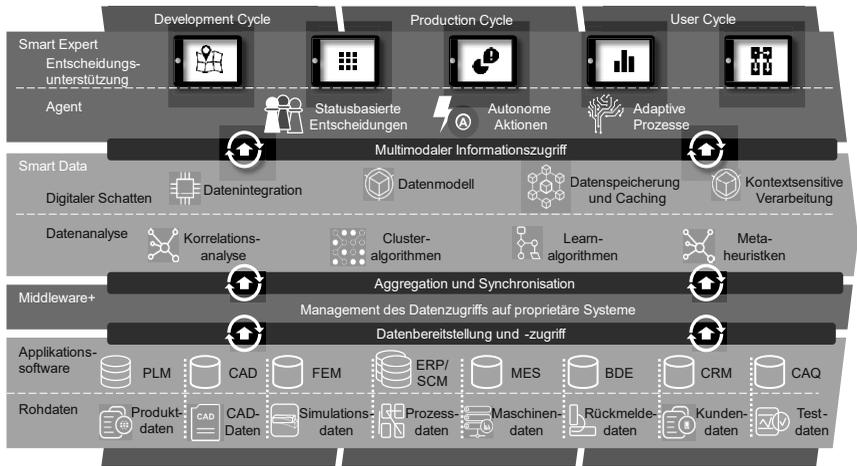
In der Wissenschaft existieren verschiedene Referenzmodelle zur Umsetzung der Zielvision von Industrie 4.0. Der Bundesverband Informationswirtschaft,

Telekommunikation und neue Medien (Bitkom), der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) und der Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) haben sich in der Plattform Industrie 4.0 zusammengeschlossen und haben das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (kurz: RAMI 4.0) zur Beschreibung einer Architektur für ein digital vernetztes Unternehmen entwickelt. Hierzu wurde ein schichtenbasiertes Modell entwickelt, welches den Lebenszyklus sowie den Wertschöpfungsprozess verschiedener Objekte abdeckt. Die abgedeckten Objekte sind in Hierarchieebenen strukturiert (s. Abbildung 1-1). (s. HANKEL U. REXROTH 2015, S. 1)



**Abbildung 1-1: Referenzmodell RAMI 4.0 (eigene Darstellung i. A. a. DORST U. SCHWANDT 2017, S. 20)**

Neben dem RAMI 4.0 existiert auch das Referenzmodell des Internet of Production (kurz: IoP), welches im Rahmen der interdisziplinären deutschen Exzellenzinitiative in Aachen entwickelt und ausgestaltet wird. Das IoP stellt eine Referenzarchitektur zur Gestaltung einer domänengreifenden Kollaboration entlang des Produktlebenszyklus dar, welche durch die semantische Verknüpfung domänenspezifischer Daten Unternehmen zu besserer Kollaboration und agilen Entscheidungsprozessen verhilft. (s. GLEIM ET AL. 2020, S. 3243)



**Abbildung 1-2: Referenzarchitektur des Internet of Production (eigene Darstellung i. A. a. SCHUH ET AL. 2017b, S. 121)**

Die in Abbildung 1-2 dargestellte Referenzarchitektur des IoP strukturiert die Infrastruktur für ein lernendes Unternehmen horizontal entlang der drei Fokusbereiche *Development Cycle*, *Production Cycle* und *User Cycle*. Vertikal ist das IoP in Schichten der Applikationssoftware, der Middleware+, Smart Data und digitaler Smart Experts strukturiert. In der untersten Schicht der Software werden Informationssysteme beschrieben, welche domänenspezifische Daten für die übergeordneten Schichten bereitstellen. Durch die Middleware+ werden die Daten unterschiedlicher Systeme für system- und domänenübergreifende Analysen gefiltert und verknüpft. Dieser Vorgang ist heute ohne große Aufwände für die Schaffung von Schnittstellen und die Verknüpfung der Daten nicht möglich. Die Daten werden der übergeordneten Smart-Data-Schicht bereitgestellt, in der ein digitaler Schatten als echtzeitfähiges Abbild des Betrachtungsbereiches durch die verknüpften Daten aufgebaut wird. Mit verschiedenen Verfahren der Datenanalyse und -auswertung werden Informationen für die digitalen Assistenzsysteme der übergeordneten Ebene erhoben. Die Informationen können in nutzerzentrierten Entscheidungsunterstützungssapplikationen menschlichen Anwendenden oder digitalen Agenten bereitgestellt werden. Beide Anspruchsgruppen leiten auf Basis der bereitgestellten Informationen der Smart-Data-Schicht Entscheidungen ab. (s. PENNEKAMP ET AL. 2019, S. 36; SCHUH ET AL. 2020b, S. 469; BRAUNER ET AL. 2020, S. 4)

Für Unternehmen stellt die Umsetzung beider Referenzmodelle eine Herausforderung dar, da diese bisher noch nicht in ihrem vollen Umfang in der Praxis implementiert wurden, sondern bisher nur einzelne Usecases vorgestellt und im Rahmen von Forschungs- oder Pilotprojekten realisiert wurden (vgl. HANKEL U. REXROTH 2015; PENNEKAMP ET AL. 2019; GLEIM ET AL. 2020). Um Unternehmen ganzheitlich digital zu

transformieren, reicht eine Betrachtung rein (informations-)technologischer Aspekte der Unternehmensprozesse – wie in den Referenzmodellen angedeutet – nicht aus. Zur Umsetzung echtzeitfähiger, selbststeuernder und -lernender Unternehmen bedarf es auch einer Anpassung der Ressourcen, der Unternehmensorganisation und der Kultur an sich wandelnde Prozesse. Ressourcen umfassen dabei Mitarbeiter und ihre Qualifizierung, Maschinen und Anlagen sowie deren Ausstattung mit Sensorik und Technologie. Die Unternehmensorganisation enthält sowohl die strategische Anpassung, die Arbeitsbedingungen und -regelungen, welche vom Unternehmen vorgegeben werden. Die Unternehmenskultur beinhaltet Aspekte der Mitarbeiterführung sowie den Umgang von Mitarbeitern untereinander. Hierzu zählt man den Wissensaustausch, die abteilungs- und prozessübergreifende Zusammenarbeit sowie das Innovationsverständnis. (s. CAROLIS ET AL. 2017a, S. 32; SCHUH ET AL. 2020a, S. 23)

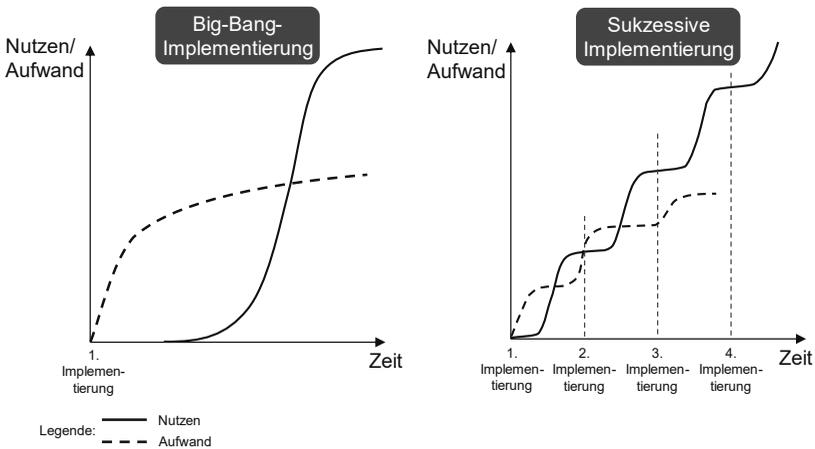
Zur Unterstützung der Vision von Industrie 4.0 in der Dimension der Informationstechnologie stellen Manufacturing-Execution-Systeme (kurz: MES) ein mögliches Informationssystem dar. Mit integrierten Funktionen der echtzeitnahen Datenerfassung, -verarbeitung sowie der nutzerzentrierten Informationsbereitstellung unterstützt es bei der Realisierung der Ziele des Internet of Production und von Industrie 4.0 im Production-Cycle schon heute. Insbesondere für Unternehmen mit begrenztem Budget stellen die marktreifen und schon praxiserprobten Lösungen auf dem MES-Markt eine gute, praktikable und risikoarme Möglichkeit zur Befähigung von Industrie 4.0 dar. (s. JURCZAK 2019; WETZCHEWALD 2020, S. 164; 2020, S. 179; KLETTI U. DEISENROTH 2019, S. 20; OBERMAIER U. KIRSCH 2017, S. 192; ENGSTLER 2009, S. 46) Mit der alleinigen Installation und Implementierung des MES würden Unternehmen jedoch nicht Industrie 4.0 umsetzen. Hierzu müssen vor, mit oder spätestens nach der Implementierung auch die weiteren Dimensionen zur erfolgreichen digitalen Transformation umgesetzt werden. Dies bedeutet Anpassungen an den Arbeitsabläufen und Qualifikationen der Mitarbeiter\*innen, der Organisationsstruktur und -kultur sowie weitere technologische Anpassungen an Anlagen, Maschinen und Schnittstellen zu Informationssystemen. (s. SCHOLTEN 2009, S. 84–85; KLETTI U. SCHUMACHER 2014, S. 32; WIENDAHL U. KLUTH 2017, S. 5; VDI-RICHTLINIE 5600-2, S. 5–6)

Unternehmen, die sich für die Einführung eines MES entschieden haben, stehen mit der Einführung vor verschiedenen Herausforderungen. Einerseits bieten ME-Systeme einen großen Funktionsumfang, der so ausgewählt werden muss, dass dieser sich in die bestehende IT-Systemlandschaft integriert und bestehende Systeme um Funktionen erweitert, welche dem Unternehmen einen Nutzen stiften. (s. WETZCHEWALD U. LÜTKEHOFF 2017, S. 1–2; KLETTI 2007, S. 99) Auf der anderen Seite ist das Wissen über den Nutzen der Systeme bezogen auf die eingeführten Funktionen kaum bekannt (s. LIEBRECHT ET AL. 2017, S. 224). Dem bekannten, aber schwer messbaren Nutzen für Unternehmen stehen hohe interne und externe Aufwände einer Implementierung entgegen (s. MEHLER-BICHER ET AL. 2019, S. 119–120). Zur besseren Stückelung und Verteilung der mit der Implementierung verbundenen Kosten besteht bei MES durch den modularen Aufbau die Möglichkeit der sukzessiven Implementierung. Dies

bedeutet, dass Funktionsmodule einer MES-Lösung nacheinander und zeitlich versetzt im Unternehmen eingeführt werden können. (s. FISCHER ET AL. 2019, S. 298)

Die sukzessive Implementierung zeichnet sich durch die schrittweise Einführung eines Informationssystems aus, bei der funktional abgegrenzte Teile des Systems im Unternehmen eingeführt werden. Gegenüber der Einführung des gesamten Systems im gesamten Einführungsbereich bietet das schrittweise Vorgehen den Vorteil des sukzessiven Lernens aus Erfahrungen sowohl bei den im betroffenen Bereich eingebundenen Mitarbeiter\*innen als auch bei der Projektorganisation des Einführungsteams. Durch die sukzessive Einführung von MES-Funktionsmodulen werden weniger Fachabteilungen eingebunden, der Betreuungsaufwand für die Projektorganisation sinkt und geschulte und erfahrene Mitarbeiter\*innen können Kolleg\*innen in anderen Bereichen später mit Erfahrungen zur Seite stehen. Mit steigender Anzahl an Implementierungsschritten steigen die Zahl temporärer Schnittstellen und deren Betreuungsaufwand. (s. HANSMANN ET AL. 2012, S. 280–281; SCHMIDT U. BÄR 2014, S. 113–114; DANIEL 2001, S. 151)

Der sukzessiven Implementierung steht die Einführung des Gesamtsystems in den gesamten Betrachtungsbereich, meist im gesamten Unternehmen, gegenüber. Dieser Ansatz wird auch als Big-Bang-Strategie bezeichnet. Verringerten Reibungsverlusten und einem schnellen realisierbaren Nutzen stehen größere Risiken bei der Implementierung entgegen. Die Risiken bestehen in der Beherrschung der Wechselwirkungen zwischen den von der Einführung betroffenen Fachbereichen und Prozessen untereinander sowie zwischen diesen und dem einzuführenden System. Zudem besteht bei diesem Vorgehen keine Erprobungsphase mit einem tatsächlichen Live-Betrieb, sodass der Projektorganisation kein Erfahrungswissen zur Verfügung steht. Die genannten Risiken stellen die Projektorganisation vor die Aufgabe eines straffen und anspruchsvollen Projektmanagements zum Handling der Risiken. (s. HANSMANN ET AL. 2012, S. 280–281; SCHMIDT U. BÄR 2014, S. 113) In Abbildung 1-3 sind sowohl der Aufwands- als auch der Nutzenverlauf der oben beschriebenen Implementierungsstrategien beschrieben. Dabei stellen diese Strategien Extremformen dar, bei denen durch die Gestaltung der Implementierungsstrategie Mischformen entstehen können (s. Kap. 2.3.1).



**Abbildung 1-3: Aufwand-Nutzenverläufe verschiedener Implementierungsstrategien (eigene Darstellung i. A. a. BORNHÄUSER 2009, S. 168)**

Für Unternehmen, welche wenig Erfahrung mit der Einführung von IT-Systemen haben, bietet sich aufgrund des sukzessiven Lernens und der verringerten Projektrisiken im Vergleich zur Big-Bang-Einführung die sukzessive Einführung von Manufacturing-Execution-Systemen an (s. DANIEL 2001, S. 151; FISCHER ET AL. 2019, S. 298). Für die sukzessive Implementierung ist die Planung der Implementierungsschritte entscheidend. Dabei müssen sowohl die zu implementierenden Inhalte (MES-Funktionsmodule) als auch die Implementierungsorte (Unternehmensfunktionen) festgelegt werden. (s. REIß 1993, S. 554; DANIEL 2001, S. 7) Hierbei stehen Unternehmen jedoch vor der Aufgabe, festzulegen, welche Bereiche im Unternehmen am stärksten von den ersten Implementierungsschritten, bezogen auf den Nutzen, profitieren. Aktuell stehen Unternehmen hier vor der Herausforderung, den Nutzen sowie das Potenzial in Abhängigkeit der Ausgangssituation unternehmensspezifisch zu bestimmen. (s. KESTEN ET AL. 2006, S. 5; HÄNSCH 2015, S. 945; PALLER 2017) Dabei stellt die genaue Bewertung der Ausgangssituation eines Unternehmens im Kontext der Implementierung ein zentrales Element zur Aussprache von Handlungsempfehlungen dar (s. DANIEL 2001, S. 7). Zur Ableitung einer idealen Reihenfolge von einführbaren MES-Funktionsmodulen bedarf es einer Möglichkeit der Bestimmung der unternehmensspezifischen Ausgangssituation in Bezug zu den von der Einführung betroffenen Unternehmensfunktionen im Produktionssystem.

Für die Bestimmung und Bewertung des individuellen Entwicklungsstandes von Unternehmen in Bezug zu Industrie 4.0 haben sich Industrie-4.0-Reifegradmodelle als geeignetes Werkzeug herausgestellt (s. MITTAL ET AL. 2018; FELCH ET AL. 2019). Reifegradmodelle unterstützen Unternehmen in der Ausarbeitung und Umsetzung von strategischen Initiativen durch die Möglichkeit der Standortermittlung sowie durch das Aufzeigen von Entwicklungspfaden. (s. VDI-RICHTLINIE 4000-1, S. 8; SCHUMACHER ET AL.