

# 3D Printing

Recht, Wirtschaft und Technik  
des industriellen 3D-Drucks

Herausgegeben und mitbearbeitet von

**Dr. Andreas Leupold, LL.M.**

Rechtsanwalt, München

und

**Silke Glossner, LL.M.**

Richterin am LG München I

Bearbeitet von

*Dr.-Ing. Fazel Ansari*, Wien; *Dr. Matthias Bleckmann*, Erding; *Stefanie Brickwede*, Berlin; *Michael Bruch*, München; *Dr. Alexander Cuntz*, Genf; *Dr. Helge Daubert*, Berlin; *Arvid Eirich*, Berlin; *Prof. Dr. Ulrich M. Gassner*, Mag. rer. publ., M. Jur. (Oxon.), Augsburg; *Prof. Dr.-Ing. Andreas Gebhardt*, Aachen; *Silke Glossner, LL.M.*, München; *Karin Griggel*, München; *Prof. Dr. Lambert Grosskopf, LL.M.*, Bremen; *Dr. Jens Holtmannspötter*, München; *Dipl. Ing. Ulrich Jahnke*, Paderborn; *Friedemann Kammler*, Osnabrück; *Dr.-Ing. Eric Klemp*, Clausthal; *PD Dr. Peter Kreuz*, Augsburg; *Dr. Andreas Leupold, LL.M.*, München; *Markus Lingl*, München; *Prof. Dr. Klaus-J. Melullis*, Karlsruhe; *Prof. Dr. Carsten Momsen*, Hannover; *Markus Rebhan*, Erding; *Prof. Dr. Guido Ritter*, Münster; *Peter Sander*, Hamburg; *Dipl. jur. Laura Iva Savic*, Berlin; *Dr. Elke Schwager*, München; *Dr.-Ing. Christian Seidel*, Augsburg, München; *Prof. Dr. Ulrich Seidenberg*, Siegen; *Prof. Dr. Oliver Thomas*, Osnabrück; *Andreas Varwig*, Osnabrück; *Ricarda Weber*, Münster; *Jürgen Weichert*, München; *Prof. Dr. rer. pol. Heiko Wenzel-Schinzer*, Merseburg; *Prof. Dr. Andreas Wiebe LL.M.*, Göttingen; *Terry Wohlers*, Fort Collins, CO, USA

2017



Zitiervorschlag:  
*Bearbeiter*, in: Leupold/Glossner, 3D Printing, Teil ... Kapitel ... Rn. ...

**beck-shop.de**  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

[www.beck.de](http://www.beck.de)

ISBN 978 3 406 70751 3

© 2017 Verlag C.H.Beck oHG  
Wilhelmstraße 9, 80801 München

Druck: Kösel GmbH & Co. KG  
Am Buchweg 1, 87452 Altusried-Krugzell

Satz: Fotosatz H. Buck, Kumhausen  
Zweikirchener Str. 7, 84036 Kumhausen

Umschlaggestaltung: Druckerei C.H.Beck Nördlingen

Gedruckt auf säurefreiem, alterungsbeständigem Papier  
(hergestellt aus chlorfrei gebleichtem Zellstoff)

## Inhaltsübersicht

Vorwort/Foreword .....	V
Prolog .....	VII
Zum Werk .....	IX
Inhaltsverzeichnis .....	XVII
Autorenübersicht .....	XLIII
Autorenverzeichnis .....	XLV
Abkürzungsverzeichnis .....	LXI

### Teil 1. Technische Grundlagen

Kapitel 1. Additive Fertigungsverfahren .....	1
Chapter 1. Additive Manufacturing Processes: Abstract .....	2
Kapitel 2. Materialien (Werkstoffe) für den industriellen 3D-Druck .....	32
Chapter 2. Materials for industrial 3D Printing: Abstract .....	33

### Teil 2. Wirtschaftliche Aspekte

Kapitel 1. Ökonomische Potenziale des industriellen 3D-Drucks für Produktion und Innovation .....	53
Chapter 1. The Economic Potentials of Industrial 3D Printing for Production and Innovation: Abstract .....	53
Kapitel 2. Veränderung betrieblicher Prozesse durch 3D-Druck .....	76
Chapter 2. How 3D Printing Changes Operational Processes: Abstract .....	76

### Teil 3. Praxisbeispiele

Kapitel 1. Nutzung additiver Fertigungsverfahren in der Luftfahrt .....	101
Chapter 1. Additive Manufacturing in Aviation: Abstract .....	101
Kapitel 2. Nutzung additiver Fertigungsverfahren bei der Deutschen Bahn .	110
Chapter 2. Additive Manufacturing at Deutsche Bahn (German Railway): Abstract .....	110
Kapitel 3. Additive Fertigung für Ersatzteile – Anforderungen an die Werk- stoffe .....	122
Chapter 3. Additive Manufacturing for Spare Parts – Material Requirements: Abstract .....	122

### Teil 4. Logistik in der additiven Fertigung

Die digitale Supply Chain: Auswirkungen des industriellen 3D-Drucks auf die Logistik .....	147
The Digital Supply Chain: The Impact of 3D Printing on Logistics: Abstract .	147

### Teil 5. Qualitätsmanagement

Qualitätsmanagement in der additiven Fertigung – Herausforderungen und Handlungsempfehlungen . . . . .	159
Quality Management in Additive Manufacturing – Challenges and Recommendations for Action: Abstract . . . . .	159

### Teil 6. Fälschungssichere Produktion: Kennzeichnung zur Rückverfolgbarkeit von additiv gefertigten Bauteilen

Forgery-Proof Production: Product Marking to Ensure Traceability of Additively Manufactured Parts: Abstract . . . . .	216
---	-----

### Teil 7. Arbeitssicherheit

Arbeitssicherheit in der additiven Fertigung . . . . .	259
Occupational Safety in Additive Manufacturing: Abstract . . . . .	259

### Teil 8. Rechtliche Aspekte

Kapitel 1. Datensicherheit und Schutz von Geschäftsgeheimnissen im industriellen 3D-Druck . . . . .	269
Chapter 1. Data Security and the Protection of Business Secrets in Industrial 3D Printing: Abstract . . . . .	269
Kapitel 2. Eigentum an Produktionsdaten . . . . .	314
Chapter 2. Ownership of Manufacturing Data: Abstract . . . . .	314
Kapitel 3. Verträge und Vertragsgestaltung für die additive Fertigung . . . . .	326
Chapter 3. Contracts and Contract Design for Additive Manufacturing: Abstract . . . . .	327
Kapitel 4. Urheberrechtsschutz, Markenschutz, Designschutz und ergänzender wettbewerbsrechtlicher Leistungsschutz . . . . .	357
Chapter 4. Copyright, Trademark and Design Protection, Supplementary Protection of Related Rights under Competition Law: Abstract . . . . .	358
Kapitel 5. Patentschutz und industrieller 3D-Druck . . . . .	415
Chapter 5. Patent protection and Industrial 3D Printing: Abstract . . . . .	415
Kapitel 6. Deliktische Haftung von Dienstleistern, Plattformbetreibern und FabLabs . . . . .	452
Chapter 6. Liability of Service Providers, Platform Operators and FabLabs: Abstract . . . . .	453
Kapitel 7. Produktsicherheit und Produkthaftung im industriellen 3D-Druck . . . . .	492
Chapter 7. Product Safety and Product Liability in Industrial 3D Printing: Abstract . . . . .	493
Kapitel 8. Rechtsdurchsetzung und Prozessführung im industriellen 3D-Druck . . . . .	530
Chapter 8. Enforcement of Rights and Litigation in Industrial 3D Printing: Abstract . . . . .	531

Kapitel 9. Risikomanagement und neue Fragen beim Versicherungsschutz  
in der additiven Fertigung. . . . . 580  
Chapter 9. Risk Management and new Questions on Insurance Protection  
in Additive Manufacturing: Abstract . . . . . 581  
Kapitel 10. Technische Normen für den 3D-Druck und ihre rechtliche Be-  
deutung . . . . . 621  
Chapter 10. Technical Standards for 3D Printing and their Legal Significan-  
ce: Abstract. . . . . 621  
Kapitel 11. 3D-Druck aus strafrechtlicher Sicht . . . . . 638  
Chapter 11. 3D Printing from the Perspective of Criminal Law: Abstract . . . . 639

**Teil 9. Branchenspezifische Fragen des 3D-Drucks**

Kapitel 1. Regulierung der additiven Fertigung in der Medizin . . . . . 665  
Chapter 1. Regulating Additive Manufacturing in Medicine: Abstract . . . . 666  
Kapitel 2. 3D-Druck von Lebensmitteln Betrachtung des Status Quo  
und Diskussion von Zukunftsaussichten . . . . . 707  
Chapter 2. 3D Printing of Food. Examination of the Status Quo and  
Discussion of Future Perspectives: Abstract . . . . . 708  
  
Glossar . . . . . 753  
Sachverzeichnis. . . . . 761



# 3D Printing

Recht, Wirtschaft und Technik  
des industriellen 3D-Drucks

Herausgegeben und mitbearbeitet von

**Dr. Andreas Leupold, LL.M.**

Rechtsanwalt, München

und

**Silke Glossner, LL.M.**

Richterin am LG München I

Bearbeitet von

*Dr.-Ing. Fazel Ansari*, Wien; *Dr. Matthias Bleckmann*, Erding; *Stefanie Brickwede*, Berlin; *Michael Bruch*, München; *Dr. Alexander Cuntz*, Genf; *Dr. Helge Dauchert*, Berlin; *Arvid Eirich*, Berlin; *Prof. Dr. Ulrich M. Gassner*, Mag. rer. publ., M. Jur. (Oxon.), Augsburg; *Prof. Dr.-Ing. Andreas Gebhardt*, Aachen; *Silke Glossner, LL.M.*, München; *Karin Griggel*, München; *Prof. Dr. Lambert Grosskopf, LL.M.*, Bremen; *Dr. Jens Holtmannspötter*, München; *Dipl. Ing. Ulrich Jahnke*, Paderborn; *Friedemann Kammler*, Osnabrück; *Dr.-Ing. Eric Klemp*, Clausthal; *PD Dr. Peter Kreutz*, Augsburg; *Dr. Andreas Leupold, LL.M.*, München; *Markus Lingl*, München; *Prof. Dr. Klaus-J. Melullis*, Karlsruhe; *Prof. Dr. Carsten Momsen*, Hannover; *Markus Rebhan*, Erding; *Prof. Dr. Guido Ritter*, Münster; *Peter Sander*, Hamburg; *Dipl. jur. Laura Iva Savic*, Berlin; *Dr. Elke Schwager*, München; *Dr.-Ing. Christian Seidel*, Augsburg, München; *Prof. Dr. Ulrich Seidenberg*, Siegen; *Prof. Dr. Oliver Thomas*, Osnabrück; *Andreas Varwig*, Osnabrück; *Ricarda Weber*, Münster; *Jürgen Weichert*, München; *Prof. Dr. rer. pol. Heiko Wenzel-Schinzer*, Merseburg; *Prof. Dr. Andreas Wiebe LL.M.*, Göttingen; *Terry Wohlers*, Fort Collins, CO, USA

2017



C.H. BECK

## Teil 5. Qualitätsmanagement

### Qualitätsmanagement in der additiven Fertigung – Herausforderungen und Handlungsempfehlungen

#### Übersicht

	Rn.
<b>Quality Management in Additive Manufacturing – Challenges and Recommendations for Action: Abstract</b> .....	1
<b>A. Grundlagen des Qualitätsmanagements</b> .....	1
I. Begriffliche Grundlagen: Qualität, Qualitätsmanagement .....	1
II. Bedeutung von Qualität für die Formalziele des Unternehmens .....	9
III. Modelle und Methoden des Qualitätsmanagements .....	14
1. Potenzialbezogene Modelle und Methoden .....	15
a) Gestaltung des Qualitätsmanagementsystems .....	16
b) Betriebsmittelbezogenes Qualitätsmanagement im industriellen 3D-Druck .....	29
c) Mitarbeiterbezogenes Qualitätsmanagement .....	35
d) Materialbezogenes Qualitätsmanagement .....	45
2. Prozessbezogene Modelle und Methoden .....	54
3. Produktbezogene Modelle und Methoden .....	61
a) Instrumente des Managements der Entwurfsqualität .....	62
b) Instrumente des Managements der Ausführungsqualität .....	74
<b>B. Identifizierung und Klassifizierung qualitätskritischer Aspekte der additiven Fertigung</b> .....	76
I. Spezifische technologische und nicht-technologische Heraus- forderungen der additiven Fertigung mit Auswirkungen auf die Qualität (Literaturüberblick) .....	76
II. Klassifizierung qualitätsrelevanter Aspekte in der additiven Fertigung .....	86
<b>C. Handhabung qualitätskritischer Aspekte der additiven Fertigung durch Anwendung eines Intelligenten Qualitätsmanagement-Prozesses (IQMP)</b> ..	88
<b>D. Erörterung der technologischen und nicht-technologischen Heraus- forderungen durch den Trend zu Industrie 4.0 in der additiven Fertigung</b> ...	96
<b>E. Schlussfolgerung und Ausblick</b> .....	99

#### Quality Management in Additive Manufacturing – Challenges and Recommendations for Action: Abstract

*Additive manufacturing (AM), colloquially known as 3D printing and rapid manufacturing, is being promoted as the enabling technology which allows quick fabricating and producing of customized products as well as complex and integrated functional design in a one-step process with less demands on assembly works,*

*Seidenberg/Ansari*

based on 3-dimensional models. While the state-of-the-art literature mainly tends to discuss and elaborate technological advancements of AM, the market and customer acceptance of AM is strongly tailored to meet quality standards. Hence, the primary objective of this chapter is to examine and reconsider the concept of quality management (QM) in AM, in which the focus is placed on potential-, process- and product-related quality critical aspects (i.e. inputs, throughputs and outputs of AM). The secondary objective is to foresee quality control challenges in the era of Industry 4.0, based on the premise that an AM system is a distinction of cyber-physical production systems (CPPS), which is deployed in an Industry 4.0 environment through integration of CPPS, Internet of Things (IoT), Internet of Services (IoS), and smart materials in a smart factory and which ultimately and ideally produces smart products. For these purposes, the fundamental aspects of QM have been reviewed, and furthermore, quality critical aspects of QM and related challenges in AM are identified. Finally, the model of Intelligent Quality Management Process (IQMP) is presented as a knowledge-based feedback system that enhances handling quality critical aspects of AM using various human, structural and relational knowledge assets and information channels.

### A. Grundlagen des Qualitätsmanagements

#### I. Begriffliche Grundlagen: Qualität, Qualitätsmanagement

1 Der Inhalt des Begriffs „Qualität“, der auf die lateinischen Wörter „qualis“ („wie beschaffen?“) und „qualitas“ („Beschaffenheit“) zurückgeht, wird sehr unterschiedlich aufgefasst. Weder in den einschlägigen Wissenschaftsdisziplinen noch unter den Marktteilnehmern (Anbieter und Kunde) hat sich ein einheitliches Verständnis durchgesetzt, was u.a. zu Missverständnissen und Streitigkeiten bis hin zu gerichtlichen Auseinandersetzungen führen kann. Nach Garvin lassen sich mit dem transzendenten, dem produkt-, dem kunden-, dem herstellungs- und dem wertorientierten Qualitätsbegriff grundsätzlich fünf verschiedene Sichtweisen unterscheiden, die in Tab. 1 dargestellt sind.<sup>1</sup>

Qualitätsbegriff nach Garvin	Kurz-Charakteristik	Konsequenzen für die Anwendung (Vorzüge/Nachteile)
Transzendenter Qualitäts-Begriff	Philosophischer Ansatz, der auf absoluten und überzeitlichen Maßstäben wie Einzigartigkeit und Vollkommenheit basiert; Anhänger dieser Auffassung betonen, dass eine präzise Definition von Qualität nicht möglich und auch nicht erforderlich sei.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– fehlende Praktikabilität</li> <li>– fehlende Objektivierbarkeit von Qualitätsurteilen</li> <li>– Konzentration auf Insider-Konventionen</li> <li>– unbrauchbar für das Qualitätsmanagement</li> </ul>

<sup>1</sup> Vgl. Garvin, Sloan Management Review, 1984, S.25 ff.; Garvin, Managing Quality, 1988, S.40 ff.

Qualitätsbegriff nach Garvin	Kurz-Charakteristik	Konsequenzen für die Anwendung (Vorzüge/Nachteile)
Produkt-orientierter Qualitäts-Begriff	Objektivistischer Ansatz: Qualität reflektiert die Anwesenheit bzw. Abwesenheit messbarer Produktmerkmale und ist damit als eine inhärente Eigenschaft des Produkts anzusehen. Qualitätsmerkmale ergeben sich aus quantitativen Unterschieden hinsichtlich der Merkmalsausprägungen: Ein additiv hergestelltes Bauteil mit einer niedrigeren Schichtdicke hat wegen des verminderten Treppenstufeneffekts eine höhere Qualität als eines mit einer höheren Schichtdicke.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Qualität ist eine präzise und messbare Variable</li> <li>– Qualitäts-Unterschiede sind Quantitäts-Unterschiede: Ist z.B. die Haltbarkeit doppelt so hoch, folgt daraus eine entsprechend höhere Qualität.</li> <li>– Höhere Qualität verursacht höhere Kosten.</li> <li>– Die Qualität eines bestimmten Objekts ist für jeden Beobachter gleich hoch.</li> <li>– Ästhetische Merkmale (Form- und Farbgebung) von Produkten können mit diesem Konzept nicht erfasst werden.</li> <li>– Problem der Aggregation/ Gewichtung von Merkmalen mit dem Ziel einer zusammenfassenden Qualitätsbewertung</li> </ul>
Kunden-orientierter Qualitäts-Begriff	Subjektivistischer Ansatz: „Qualität entsteht im Auge des Betrachters.“ Solche Produkte, die die Bedürfnisse der Kunden am besten befriedigen, besitzen die höchste Qualität.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Absatzmarktfokussierte, externe Sicht</li> <li>– Qualitätsunterschiede spiegeln sich in Absatzzahlen und Produktlebenszyklen wider.</li> <li>– Ist ein Produkt, das von Kunden bevorzugt wird, auch besser i.S. höherer Qualität?</li> <li>– Stark variierende individuelle Kundenpräferenzen führen zu einem Aggregationsproblem beim Hersteller (Kundensegmentierung oder individualisierte Produkte?).</li> </ul>
Herstellungs-orientierter Qualitäts-Begriff	Qualität wird als Übereinstimmung mit technischen Normen, Standards, Regeln, Spezifikationen usw. definiert. Jede Abweichung (Nichtkonformität) bedeutet eine Qualitätsverschlechterung. Garvin stellt einen Zusammenhang mit dieser Auffassung und dem Ziel der Kostenreduktion her.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Unternehmensintern fokussierte Sicht, insbes. auf die Prozesse gerichtet, Marktaspekte vernachlässigt</li> <li>– Wie werden die Anforderungen festgelegt?</li> <li>– Qualitätssteigerungen führen zu Kostenreduzierungen infolge Vermeidung von Ausschuss, Fehlersuche und Nacharbeit.</li> </ul>

Qualitätsbegriff nach Garvin	Kurz-Charakteristik	Konsequenzen für die Anwendung (Vorzüge/Nachteile)
Wertorientierter Qualitäts-Begriff	Einbeziehung monetärer Größen: Die Leistung oder der Nutzen eines Produkts wird auf seinen Preis bezogen. Je günstiger das „Preis-Leistungs-Verhältnis“, desto größer ist die Qualität.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Der Preis ist kein inhärentes Merkmal eines Objekts, sondern diesem zugeordnet, sodass ein und dasselbe Objekt mehrere Marktpreise aufweisen kann (Preisdifferenzierung).</li> <li>- Preise und Preis-/Leistungsrelationen sind geeignet, den Wert, nicht aber die Qualität von Produkten abzubilden.</li> <li>- Hohe Kosten und Preise sind kein Nachweis von Konformität mit Anforderungen.</li> <li>- Nicht jedes Objekt wird am Markt verkauft (interne Kunden!) und besitzt daher auch einen Marktpreis.</li> <li>- Der Preis besitzt Relevanz nur zum Zeitpunkt der Zahlung, danach zählen nur noch die Produktmerkmale. („Qualität bleibt bestehen, wenn der Kaufpreis längst vergessen ist.“ Henry Royce zugeschrieben)</li> </ul>

Tabelle 1: Qualitätsbegriffe nach Garvin.

- 2 Die Frage, welches Qualitätsverständnis denn nun das „richtige“ sei, ist falsch gestellt. Es hängt vom jeweiligen Verwendungskontext ab, welche Auffassung von Qualität zweckmäßig ist. Beispielsweise kann während des Entstehungszyklus eines Produkts eine Schwerpunktverlagerung opportun oder auch erforderlich sein: Zur Definition der kundenbezogenen Anforderungen ist der kundenorientierte Ansatz unabdingbar, während bei der Umsetzung der Kundenanforderungen in Produktmerkmale der produktorientierte Ansatz hilfreich ist. Für die Gestaltung des Produktionsprozesses bietet sich der herstellungsorientierte Ansatz an. Solange sich die handelnden Personen bewusst machen, dass unterschiedliche Qualitätsauffassungen existieren, und die eigene nicht als allein gültige verabsolutiert wird, dürften sich dysfunktionale Wirkungen durch das „Nacheinander“ oder „Nebeneinander“ dieser Sichtweisen in Grenzen halten.
- 3 Die internationale Norm DIN EN ISO 9000:2015 definiert den Begriff Qualität als „Grad, indem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“. <sup>2</sup> Zu dieser Definition seien folgende Erläuterungen gegeben: <sup>3</sup>
- Das Adjektiv „inhärent“ soll klarstellen, dass die Merkmale **nicht als dem betreffenden Objekt zugeordnet**, wie etwa der Preis eines Produkts, sondern als diesem innewohnend aufgefasst werden. Merkmale bzw. Merkmalsausprägungen können objektiv messbar oder (lediglich) subjektiv beurteilbar sein.
  - Qualität ist eine **mehrdimensionale Größe** (Satz von Merkmalen). Selbst einfache Massenprodukte wie Trinkwasser oder elektrischer Strom weisen mehr als ein qualitätsbestimmendes Merkmal auf. Nicht alle Merkmale eines Objekts sind

<sup>2</sup> DIN EN ISO 9000, S. 39.

<sup>3</sup> Vgl. Blohm/Beer/Seidenberg/Silber, Produktionswirtschaft, 5. Auflage 2016, S. 224 f.

indes für ein Qualitätsurteil relevant, <sup>4</sup> sodass ein offener oder versteckter Dissens zwischen Anbieter und Nachfrager über die Auswahl der Merkmale Konfliktpotenzial birgt.

- Qualität bzw. eine Aussage über die Qualität in einem konkreten Fall bezieht sich stets auf (An-) Forderungen, ist also nichts Absolutes. Da der Grad der Übereinstimmung zwischen vorhandenen und geforderten Merkmalsausprägungen die Qualität bestimmt, ist Qualität keine Eigenschaft des betreffenden Objekts an sich, sondern eine **Relation zwischen dem Objekt und den gestellten Anforderungen**. (Vgl. Abb. 1.)

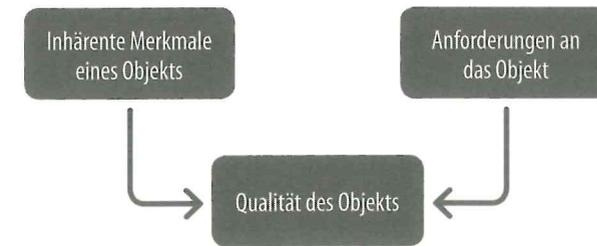


Abbildung 1: Qualität als Erfüllung von Anforderungen.

- Da Anforderungen hinsichtlich einzelner Merkmale oder hinsichtlich der Gesamtheit der interessierenden Merkmale mehr oder weniger gut erfüllt sein können (Grad der Übereinstimmung), ist Qualität regelmäßig keine bivalente Eigenschaft (mit den Ausprägungen „vorhanden“ bzw. „nicht vorhanden“), sondern eine stetige Eigenschaft. So mag die Bezeichnung „Qualitätsprodukt“ zu werblichen Zwecken gerechtfertigt sein, über die Produktqualität sagt sie gleichwohl nichts aus.
  - Die Merkmalerfüllung kann sich auf verschiedenartige Objekte beziehen. Hier werden die drei Bestandteile **Input (Potenziale), Throughput (Prozesse) und Output (Produkte)** des produktionswirtschaftlichen Grundmodells <sup>5</sup> unterschieden. Die Qualität der Prozesse ist Voraussetzung für die Qualität der Produkte, und Prozessqualität ist nur erreichbar, wenn die Potenziale (Personal, Betriebsmittel, Werkstoffe) den Prozessanforderungen entsprechen. <sup>6</sup>
- Mit Bezug auf Produkte können Entwurfs- (Konzept-, Design-) Qualität einerseits <sup>5</sup> und Ausführungs- (Fertigungs-) Qualität andererseits unterschieden werden. (Vgl. Tab. 2.) Je besser die Konstruktion oder allgemein die Konzeption eines Produkts den Markt- respektive Kundenanforderungen entspricht, desto höher ist dessen **Entwurfsqualität**. Soll beispielsweise ein additiv hergestelltes Bauteil bestimmte mechanische Festigkeitsanforderungen erfüllen, muss es – etwa durch seine Materialstärke, Formgebung usw. – konstruktiv auf diese Anforderungen ausgelegt sein. Damit reflektiert die Entwurfsqualität vor allem den kundenbezogenen Qualitätsbe-

<sup>4</sup> Vgl. Dyckhoff/Müser, in: Gössinger/Zäpfel (Hrsg.), Management integrativer Leistungserstellung, 2014, S. 46.

<sup>5</sup> Vgl. z.B. Blohm/Beer/Seidenberg/Silber, Produktionswirtschaft, 5. Auflage 2016, S. 27.

<sup>6</sup> Vgl. bereits das aus den drei Stufen „Structure – Process – Outcome“ bestehende Modell von Donabedian, Explorations in Quality Assessment and Monitoring, Vol. I: The Definition of Quality and Approaches to its Assessment, Ann Arbor, Michigan 1980, S. 79 ff., und dessen Interpretation bei Zollondz, Grundlagen Qualitätsmanagement, 3. Auflage 2011, S. 170 f.

griff nach Garvin (s.o.). Dagegen wird die **Ausführungsqualität** durch das Ausmaß bestimmt, in dem die Herstellung des Produkts, d.h. seine konkrete Realisation, die Anforderungen des Entwurfs erfüllt. Die Ausführungsqualität ist umso höher, je größer der Grad der Übereinstimmung mit den Spezifikationen ist, z.B. bezüglich der Einhaltung von Materialstärken, Toleranzen usw. Damit reflektiert die Ausführungsqualität vor allem den herstellungsbezogenen Qualitätsbegriff nach Garvin (s.o.).

Qualitätsausprägung	Definition des Soll	Ist (Erfüllung des Soll)	Abweichungen zwischen Soll und Ist	Wirkungen von Abweichungen
<b>Entwurfsqualität</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kundenbedürfnisse, -wünsche und -erwartungen (z.B. durch Marktforschung erhoben)</li> <li>– gesetzliche Vorgaben</li> <li>– technische Normen</li> </ul>	Produktentwurf, -spezifikationen, Pflichtenheft  Effektivität: „Die richtigen Produkte herstellen!“	<ul style="list-style-type: none"> <li>– nicht-marktkonformes Produkt</li> <li>– Under- oder Overengineering</li> <li>– Konstruktionsfehler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– erschwerter Marktzugang, eingeschränkte Wettbewerbsfähigkeit, Nachfragerückgang bei etablierten Produkten</li> <li>– Überhöhte Kosten (Overengineering)</li> <li>– Produkthafungsrisiken, Serienschäden</li> </ul>
<b>Ausführungsqualität</b>	Produktentwurf, -spezifikationen, Pflichtenheft <ul style="list-style-type: none"> <li>– gesetzliche Vorgaben</li> <li>– technische Normen</li> </ul>	Realisierung des Produkts  Effizienz: „Die Produkte richtig herstellen!“	Abweichung > Toleranz => Fabrikationsfehler	Fehler(folge-)kosten, Gewährleistungsfälle, Produkthafungsrisiken, Kundenabwanderung, Image-schäden, ggf. Beeinträchtigung des Neukundengeschäfts

Tabelle 2: Entwurfs- und Ausführungsqualität

(Quelle: Blohm/Beer/Seidenberg/Silber, Produktionswirtschaft, 5. Auflage 2016, S. 226).

6 Wenngleich sich die Entwurfsqualität eines Produkts am Ende der Produktentwicklung und seine Ausführungsqualität zum Lieferzeitpunkt zunächst als fixiert betrachten lassen (**statische Qualitätssicht**), können sich sowohl die Entwurfs- als auch die Ausführungsqualität im Zeitablauf ändern (**dynamische Sichtweise**). So sinkt die Entwurfsqualität aufgrund der technologischen Entwicklung oder unter dem Einfluss von Modetrends, da sich das Anforderungsniveau ständig erhöht. An Ausführungsqualität erleidet das Produkt dadurch Einbußen, dass sich sein tatsächlicher Zustand infolge von Gebrauchs- und/oder Zeitverschleiß mehr und mehr vom Entwurfszustand entfernt. Im Fall der Entwurfsqualität sind es die sich dynamisch entwickelnden Sollvorstellungen, die die Erosion der Qualität bewirken, im Fall der Ausführungsqualität der degenerierende Ist-Zustand und die daraus resultierende verschlechterte Anforderungserfüllung. (Vgl. nochmals Tab. 1 und 2.)

Unter **Qualitätsmanagement (QM)** lässt sich die Gesamtheit der dispositiven, d.h. nicht-ausführenden<sup>7</sup>, qualitätsbezogenen Tätigkeiten im Unternehmen verstehen.<sup>8</sup> So ist die Qualitätskontrolle im laufenden Prozess, beispielsweise die Überwachung der Maßhaltigkeit eines Produkts, kein Bestandteil des QM, wohl aber die Festlegung der Sollwerte und Toleranzen. Beim QM handelt es sich um eine Querschnittsfunktion, die sämtliche anderen funktionalen Teilbereiche des Unternehmens, wie Einkauf, Produktion, Absatz etc., überlagert. Dem QM ist die **Qualitätspolitik** übergeordnet, die ein Element der Unternehmenspolitik und -kultur darstellt und für die die Geschäftsführung zuständig ist. Die Qualitätspolitik beinhaltet die strategischen Vorgaben für das QM.

Die internationale Norm DIN EN ISO 9000:2015 gliedert die Teilfunktionen des QM in Qualitätsplanung, -sicherung, -steuerung und -verbesserung. Bei der **Qualitätsplanung** handelt es sich um den Teil des QM, „der auf das Festlegen der Qualitätsziele [...] und der notwendigen Ausführungsprozesse [...], sowie der zugehörigen Ressourcen zum Erreichen der Qualitätsziele gerichtet ist.“<sup>9</sup> So werden im Rahmen der Qualitätsplanung die Anforderungen an Potenziale, Prozesse und Produkte festgelegt, die Qualitätsmerkmale ausgewählt und gewichtet, Sollwerte und Toleranzbereiche definiert sowie Prozesse beurteilt. Die **Qualitätssicherung** (früher: -darlegung) ist auf das Erzeugen von Vertrauen bei Kunden gerichtet, wozu die Dokumentation qualitätsrelevanter Daten (z.B. der Abläufe und Prüfmethode) und das Gewährleisten der Rückverfolgbarkeit einzelner Serien und Produkte gehört. Die **Qualitätssteuerung** (besser: -lenkung oder -regelung) zielt auf die Erfüllung der Qualitätsanforderungen. Dies beinhaltet die Einhaltung von Spezifikationen und Standards, das Management von Qualitätsprüfungen im laufenden Prozess sowie das Einleiten von Korrekturmaßnahmen und die Beseitigung von Fehlerursachen. Bei der **Qualitätsverbesserung** handelt es sich um die dynamische Komponente des QM, sie ist „auf die Erhöhung der Eignung zur Erfüllung der Qualitätsanforderungen“ (DIN EN ISO 9000, S. 32) gerichtet. Hierzu zählen die Verbesserung der Qualitätseignung und die Anpassung des QM an veränderte Rahmenbedingungen.

## II. Bedeutung von Qualität für die Formalziele des Unternehmens

9 In der Betriebswirtschaftslehre wird zwischen Sach- und Formalzielen unterschieden.<sup>10</sup> Formalziele beziehen sich auf den wirtschaftlichen Erfolg eines Unternehmens und werden durch Zielgrößen wie Cash-Flow, Gewinn, Rentabilität, Unternehmenswert, Kapitalwert etc. repräsentiert. Demgegenüber stellen Sachziele dar, mit welchen Mitteln, d.h. etwa durch die Herstellung welcher Produkte in welchen Mengen, die Formalziele erreicht werden sollen. Somit stehen Formal- und Sachziele in einem Zweck-/Mittel-Verhältnis insofern, als die Formalziele den Instrumentalcharakter besitzenden Sachzielen übergeordnet sind. Insofern sind Qualitätsziele in einem Unternehmen nicht Selbstzweck, sondern stets Sachziele. Allerdings können aus Formalzielen keine Sachziele abgeleitet werden. Soll eine Maschine für die additive Fertigung beschafft werden, sind als Sachziele u.a. das Fertigungsverfahren, der

<sup>7</sup> Dispositive Aufgaben sind Leitungs- und Führungsaufgaben, während ausführende, objektbezogene Aufgaben den Weisungen des Managements (im institutionalen Sinn) unterliegen.

<sup>8</sup> Vgl. Blohm/Beer/Seidenberg/Silber, Produktionswirtschaft, 5. Auflage 2016, S. 224.

<sup>9</sup> DIN EN ISO 9000, S. 31, Hervorhebungen des Originals nicht übernommen.

<sup>10</sup> Vgl. z.B. Thommen/Achleitner, Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 7. Auflage 2012, S. 110.

einzusetzende Werkstoff, die Mengenleistung sowie Unter- und Obergrenzen der Werkstückabmessungen zu bestimmen, während das Formalziel in der Erreichung eines Mindestkapitalwerts der Investition während der vorgesehenen Nutzungsdauer oder eines Höchstwerts der Amortisationszeit bestehen kann.

- 10 Das Maß der Zielerreichung im Qualitätsbereich spiegelt sich in den **Kosten**. Nach traditioneller Auffassung setzen sich Qualitätskosten aus Fehlerverhütungs-, Prüf- und Fehlerkosten zusammen.<sup>11</sup> Fehlerverhütungskosten werden durch vorbeugende Maßnahmen zur Verhinderung der Fehlerentstehung verursacht, beispielsweise durch die Qualifizierung von Personal oder den Einsatz eines homogeneren Rohstoffs. Prüfkosten entstehen durch Maßnahmen zur Identifizierung von Fehlern (Kontrollen) und Fehlerkosten fallen durch Maßnahmen zur Fehlerbehebung (Beseitigung von Ausschuss, Nacharbeit etc.) an. Während die Fehlerverhütungskosten mit steigendem Qualitätsniveau tendenziell zunehmen, gehen Prüf- und Fehlerkosten in Abhängigkeit vom Qualitätsniveau zurück. So soll sich nach diesem älteren Modell beim Minimum der Summe aller drei Kostenkomponenten die „optimale Qualität“ einstellen. Neuere Konzepte qualitätsbezogener Kosten stellen die **Kosten der Übereinstimmung** (Konformitätskosten) den **Kosten der Abweichung** (Kosten der Nichtkonformität, Fehlleistungskosten) gegenüber. Die Summe beider Kostenkomponenten hat ihr Minimum bei Abweichungskosten von Null.<sup>12</sup>
- 11 Die **Demingsche Reaktionskette** (Abb. 2) demonstriert, dass Qualitätsverbesserungen – von einem dadurch bewirkten Rückgang der Nonkonformitätskosten ausgehend – nicht nur die Unternehmensziele positiv beeinflussen, sondern durch die Sicherung von Arbeitsplätzen auch die Ziele von Stakeholdern (Arbeitnehmern und Staat) unterstützen.

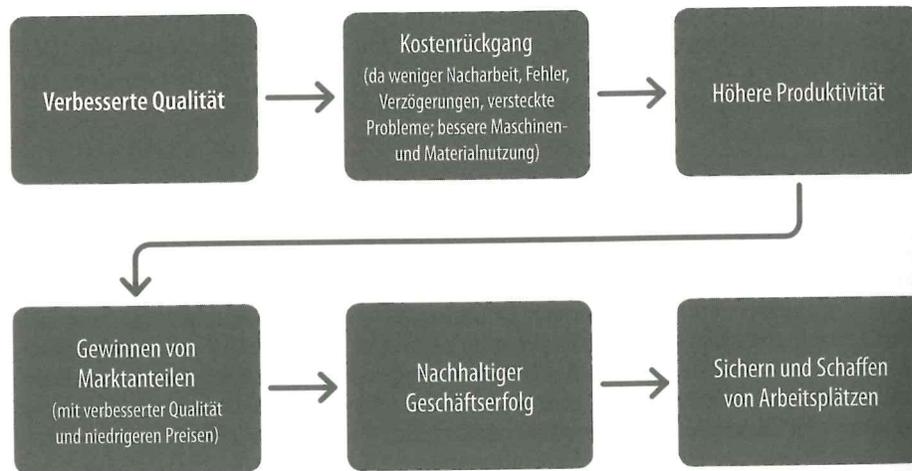


Abbildung 2: Demingsche Reaktionskette  
(Quelle: Deming, *Out of the Crisis*, Cambridge, Mass. 2000, S. 3, frei übersetzt).

<sup>11</sup> Vgl. etwa Schmitt/Pfeifer, *Qualitätsmanagement*, 5. Auflage 2015, S. 328 ff.

<sup>12</sup> Vgl. Schmitt/Pfeifer, *Qualitätsmanagement*, 5. Auflage 2015, S. 332.

Es existieren empirische Belege dafür, dass die **Produktqualität** positiv mit der **Formalzielgröße Return on Investment (ROI)**<sup>13</sup> korreliert ist.<sup>14</sup> Im Zuge des PIMS-Programms (Profit Impact of Market Strategies), einer umfangreichen empirischen Studie mit mehreren Tausend „businesses“, wurden mehr als 30 Unternehmens- und Marktvariablen, darunter auch die Produktqualität, identifiziert, die einen deutlichen Einfluss auf Formalzielgrößen wie den ROI und den Cash-flow aufweisen.

Zur Erläuterung der Ursache-Wirkungs-Beziehungen beginnen Buzzell/Gale mit den Markt- bzw. Kundenanforderungen an Produkte. Je besser es gelingt, diese Anforderungen im Produkt zu realisieren, desto größer ist die vom Kunden wahrnehmbare Qualität. Hierbei handelt es sich um die oben dargestellte Entwurfsqualität. Buzzell/Gale sprechen von „relativer Qualität“<sup>15</sup> im Verhältnis zu Wettbewerbsprodukten. Der mit der höheren Qualität verbundene höhere Wert des Produkts für den Kunden ermöglicht Absatz- und/oder Preissteigerungen, was den Umsatz und c. p. den Gewinn und damit den ROI steigen lässt. Mit einem ausgeweiteten Absatzvolumen können darüber hinaus Stückkosten senkende Nebeneffekte wie *economies of scale*<sup>16</sup> oder Erfahrungskurvenvorteile<sup>17</sup> verbunden sein. Eine zweite, parallele Ursache-Wirkungs-Kette setzt bei der Ausführungsqualität an: Eine bessere Erfüllung der Produkt- und Prozessspezifikationen reduziert die Nonkonformitätskosten entsprechend der Demingschen Reaktionskette, was sich ceteris paribus wiederum in einer Gewinn- und ROI-Steigerung niederschlägt.

### III. Modelle und Methoden des Qualitätsmanagements

Zur systematischen Darstellung der Modelle und Methoden des QM wird im Folgenden auf die bereits erwähnten drei Bestandteile Potenziale, Prozesse und Produkte des produktionswirtschaftlichen Grundmodells zurückgegriffen.

1. **Potenzialbezogene Modelle und Methoden.** Unter „Potenzialen“ sollen hier verstanden werden: 1. das QM-System als immaterielle Infrastruktur des QM, 2. die Betriebsmittel (Maschinen, Werk- und Messzeuge, IT-Ausstattung etc.), 3. die Mitarbeiter und 4. das eingesetzte Material (Roh- und Hilfsstoffe, Teile etc.).

a) **Gestaltung des Qualitätsmanagementsystems.** Unter einem Qualitätsmanagementsystem (QM-System) wird die Gesamtheit aller qualitätsbezogenen aufbau- und ablauforganisatorischen Regelungen verstanden. Es dient der Festlegung von Zielen, Verantwortlichkeiten und Ressourcen sowie der Gestaltung und Lenkung von Prozessen (einschließlich derer an den Schnittstellen zu Lieferanten und Kunden).

<sup>13</sup> Der ROI ist definiert als Verhältnis von Gewinn (vor Steuern und vor Fremdkapitalzinsen) und Gesamtkapital (Eigenkapital + langfristige Verbindlichkeiten) und bildet damit die Gesamttrentabilität ab.

<sup>14</sup> Vgl. Buzzell/Gale, *Das PIMS-Programm*, 1989, S. 94.

<sup>15</sup> Buzzell/Gale, *Das PIMS-Programm*, 1989, S. 7.

<sup>16</sup> Mit *economies of scale* oder Skalenerträgen werden Betriebsgrößenvorteile bezeichnet, die etwa dadurch entstehen, dass die Gesamtkosten langsamer als die Ausbringungsmenge steigen.

<sup>17</sup> Eine Erfahrungskurve bildet den Zusammenhang zwischen der Kostenentwicklung eines Produkts und der kumulierten Produktionsmenge ab. Es lässt sich beobachten, dass die inflationsbereinigten Produktionskosten pro Ausbringungsmengeneinheit mit jeder Verdopplung der kumulierten Ausbringungsmenge um einen konstanten Prozentsatz zurückgehen.

Dem QM-System des internationalen Normenwerks DIN EN ISO 9000 ff. liegen die folgenden sieben **Managementgrundsätze** zugrunde:<sup>18</sup>

1. **Kundenorientierung:** Ausgangspunkt des Qualitätsmanagements sind die zu erfüllenden Kundenanforderungen, wobei anzustreben ist, die Kundenerwartungen zu übertreffen.
  2. **Führung:** Es ist Aufgabe der Führungskräfte, Sachziele und Strukturen des Unternehmens in Übereinstimmung zu bringen.
  3. **Engagement von Personen:** Sämtliche Personen auf allen Ebenen sind zu respektieren und einzubeziehen. Deren Anerkennung, Qualifizierung und Förderung von Kompetenz unterstützen das Erreichen der Qualitätsziele.
  4. **Prozessorientierter Ansatz:** Das QM-System besteht aus miteinander verknüpften Prozessen, wobei das Verständnis, wie Prozessergebnisse durch dieses System erzeugt werden, es ermöglicht, das System und seine Leistung zu optimieren.
  5. **Verbesserung:** Fortwährende Verbesserung ist eine Voraussetzung, um in einem dynamischen Umfeld das gegenwärtige Leistungsniveau aufrecht zu erhalten, auf Herausforderungen zu reagieren und um neue Chancen wahrzunehmen.
  6. **Faktengestützter Ansatz zur Entscheidungsfindung:** Entscheidungen sollen auf der Grundlage von Daten und Informationen getroffen werden, wobei Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge und mögliche unbeabsichtigte Nebenwirkungen zu berücksichtigen sind.
  7. **Beziehungsmanagement:** Die Beziehungen mit „relevanten interessierten Parteien“, z.B. Lieferanten, Kunden und auch Stakeholdern, sind zu pflegen, um die eigene Leistung zu optimieren.
- 17 Die Normenreihe DIN EN ISO 9000 ff. bezieht sich auf die Implementierung und Dokumentation eines QM-Systems, nicht auf die Qualität von Produkten. Im Rahmen einer **Zertifizierung**<sup>19</sup> wird auf der Basis eines externen Qualitätsaudits festgestellt, ob das unternehmensindividuell gestaltete QM-System die abstrakt definierten Forderungen gemäß DIN EN ISO 9001 erfüllt. Die oberen beiden Ebenen der **Anforderungsstruktur** nach DIN EN ISO 9001 sind im Folgenden wiedergegeben:<sup>20</sup>
1. Kontext der Organisation
    - a) Verstehen der Organisation und ihres Kontextes
    - b) Verstehen der Erfordernisse und Erwartungen interessierter Parteien
    - c) Festlegen des Anwendungsbereichs des QM-Systems
    - d) QM-System und seine Prozesse
  2. Führung
    - a) Führung und Verpflichtung
    - b) Politik
    - c) Rollen, Verantwortlichkeiten und Befugnisse in der Organisation

<sup>18</sup> Vgl. DIN EN ISO 9000, S. 13 ff.

<sup>19</sup> Bei der Zertifizierung eines QM-Systems handelt es sich um ein formales Verfahren zum Nachweis der Konformität mit Standards (beispielsweise entsprechend DIN EN ISO 9001) durch eine neutrale, autorisierte Zertifizierungsstelle, wie z.B. DEKRA Certification GmbH, DQS GmbH (Deutsche Gesellschaft zur Zertifizierung von Managementsystemen), TÜV CERT (TÜV Zertifizierungsgemeinschaft e.V.). Die Zertifizierungsgesellschaften müssen durch die Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) akkreditiert sein, d.h. ebenfalls in einem formalen Verfahren den Nachweis der Fähigkeit erbracht und die Berechtigung erworben haben, Zertifizierungen durchzuführen („Prüfung der Prüfer“).

<sup>20</sup> Vgl. DIN EN ISO 9001, S. 18 ff.

3. Planung
  - a) Maßnahmen zum Umgang mit Risiken und Chancen
  - b) Qualitätsziele und Planung zu deren Erreichung
  - c) Planung von Änderungen
4. Unterstützung
  - a) Ressourcen
  - b) Kompetenz
  - c) Bewusstsein
  - d) Kommunikation
  - e) Dokumentierte Information
5. Betrieb
  - a) Betriebliche Planung und Steuerung
  - b) Anforderungen an Produkte und Dienstleistungen
  - c) Entwicklung von Produkten und Dienstleistungen
  - d) Steuerung von extern bereitgestellten Prozessen, Produkten und Dienstleistungen
  - e) Produktion und Dienstleistungserbringung
  - f) Freigabe von Produkten und Dienstleistungen
  - g) Steuerung nichtkonformer Ergebnisse
6. Bewertung der Leistung
  - a) Überwachung, Messung, Analyse und Bewertung
  - b) Internes Audit
  - c) Managementbewertung
7. Verbesserung
  - a) Allgemeines
  - b) Nichtkonformität und Korrekturmaßnahmen
  - c) Fortlaufende Verbesserung

Exemplarisch für die Anforderung 5.7 (Steuerung nichtkonformer Ergebnisse) **18** sei die **Anforderungsdetaillierung** der Norm dargestellt. Erfüllen Produkte (z.B. Bauteile) aus additiver Fertigung die technischen Spezifikationen, etwa aufgrund von Materialmängeln, eines Software- oder Justierfehlers nicht, muss sichergestellt sein, dass solche Produkte gekennzeichnet und „gesteuert“ werden, damit sie nicht ausgeliefert und verwendet werden können.<sup>21</sup> In Abhängigkeit von Art, Ausmaß und potenziellen Folgen der Nichtkonformität sind geeignete Maßnahmen, wie Nacharbeit, Aussonderung, Sperrung des Produkts, Information des Kunden, Vereinbarung einer Sonderfreigabe etc., zu ergreifen. Im Fall der Korrektur nichtkonformer Produkte muss die Konformität verifiziert werden. Darüber hinaus sind in jedem Fall zu dokumentieren: die Nichtkonformität (z.B. fehlende Maßhaltigkeit mit den entsprechenden Parameterwerten), die eingeleiteten Maßnahmen, gegebenenfalls erhaltene Sonderfreigaben sowie die zuständige Stelle, der die Entscheidung über die Maßnahme(n) obliegt.<sup>22</sup>

Neben der branchenneutralen DIN EN ISO 9001 existieren weitere, insbesondere **branchenspezifische** Grundlagen, in denen Anforderungen an QM-Systeme festgelegt sind. Zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang das vom Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA) herausgegebene Regelwerk VDA 6.1 und die Tech-

<sup>21</sup> Vgl. DIN EN ISO 9001, S. 43.

<sup>22</sup> Vgl. DIN EN ISO 9001, S. 43.

nische Spezifikation ISO/TS 16949 (Automobilindustrie) sowie das HACCP-Konzept (Hazard Analysis Critical Control Points) der Lebensmittelindustrie. Während VDA 6.1 und ISO/TS 16949 auf der DIN EN ISO 9001 basieren, hat das HACCP-Konzept keinen direkten Bezug zur ISO 9000-Normenreihe.<sup>23</sup> Die Bedeutung branchenspezifischer Anforderungen nimmt für die additive Fertigung in dem Maße zu, wie die Hersteller von Komponenten, die mit additiven Verfahren erzeugt werden, Elemente der unterschiedlichsten Wertschöpfungsketten werden.

20 Die Übereinstimmung des zu zertifizierenden QM-Systems mit den Anforderungen wird in einem Audit nachgewiesen. Die DIN EN ISO 9000 definiert den Begriff Audit folgendermaßen: „systematischer, unabhängiger und dokumentierter Prozess zum Erlangen von *objektiven Nachweisen* und zu deren objektiver Auswertung, um zu bestimmen, inwieweit *Auditkriterien* erfüllt sind“<sup>24</sup> Leider ist diese Definition hinsichtlich der erwähnten „Auditkriterien“ zirkulär, insgesamt inhaltlich nicht sehr aussagekräftig und auch stilistisch wenig gelungen. Bei einem Audit handelt es sich um eine besondere Form der Prüfung, die erstens nicht der routinemäßigen Qualitätslenkung im laufenden Betrieb dient und zweitens von Personen durchgeführt wird, die unabhängig von dem überwachten Bereich sind.<sup>25</sup> Einen Leitfaden zur Auditierung von Managementsystemen bietet die internationale Norm DIN EN ISO 19011; diese „enthält keine Anforderungen, sondern gibt Anleitungen zum Leiten und Lenken eines Auditprogramms, zum Planen und Durchführen eines Audits des Managementsystems sowie zur Kompetenz und Bewertung eines Auditors sowie eines Auditteams.“<sup>26</sup>

21 Bei einem Zertifizierungsaudit nach DIN EN ISO 9001 handelt es sich um ein Systemaudit und damit um die aufwändigste und umfassendste Auditart, wobei nach dem zu auditierenden Objekt **System-, Verfahrens- und Produktaudits** unterschieden werden. Während Systemaudits die Anforderungserfüllung des gesamten QM-Systems untersuchen, befassen sich Verfahrensaudits mit der Qualitätsfähigkeit der Prozesse sowie der Zweckmäßigkeit von Arbeitsunterlagen, Betriebs- und Prüfmitteln usw. Im Rahmen von Produktaudits werden Stichproben (geringen Umfangs) von End- und/oder Zwischenprodukten auf Einhaltung der Spezifikationen untersucht, wobei es sich jedoch nicht um eine reguläre Qualitätskontrolle handelt. Anlass sind zumeist wiederkehrende Qualitätsprobleme mit den betreffenden Produkten, sodass ein außerplanmäßiges Produktaudit für erforderlich gehalten wird. Wird das QM-System eines Unternehmens oder Unternehmensteils erstmalig zertifiziert, findet ein **Erstaudit** statt. Zur Aufrechterhaltung des Zertifikats sind **Folgeaudits** erforderlich. Nach einem Jahr und nach Ablauf eines weiteren Jahres ist jeweils ein **Überwachungsaudit** vorgesehen, das sicherstellen soll, dass das zertifizierte QM-System aufrechterhalten wird und dass gegebenenfalls notwendige Korrekturmaßnahmen realisiert werden. Nach Ablauf von insgesamt drei Jahren nach der Erteilung des Zertifikats steht mit einem **Wiederholungsaudit** erneut eine umfassende Prüfung des QM-Systems an, wenn das Zertifikat für weitere drei Jahre gültig bleiben soll. Die Audits im Rahmen der Zertifizierung nach der **branchenneutralen** Norm DIN EN ISO 9001 sind ausschließlich **externe Audits** (Third-Party-Audits).

<sup>23</sup> Vgl. Zollondz, Grundlagen Qualitätsmanagement, 3. Auflage 2011, S. 385 ff.

<sup>24</sup> DIN EN ISO 9000, S. 59, Hervorhebungen im Original.

<sup>25</sup> Vgl. Herrmann, in: Pfeifer/Schmitt/Masing (Hrsg.), Handbuch Qualitätsmanagement, 6. Auflage 2014, S. 340.

<sup>26</sup> DIN EN ISO 19011, S. 5.

Abb. 3 charakterisiert in einer morphologischen Darstellung die Eigenschaften des Zertifizierungsaudits nach DIN EN ISO 9001 (zutreffende Ausprägungen jeweils grau hervorgehoben).

Merkmale	Merkmalsausprägungen			
Anlass	planmäßiges Audit		außerplanmäßiges Audit	
Vorrangiges Ziel	Zertifizierung	Lieferantenbeurteilung	Verbesserung des QM-Systems	Sonstige Ziele
Untersuchungsgegenstand	Produktaudit		Verfahrensaudit	Systemaudit
Status bzgl. der Anzahl durchgeführter Audits	Erstaudit		Folgeaudit	
Zugrunde liegende Anforderungen	branchenübergreifend, z. B. DIN EN ISO 9001		branchenspezifisch, z. B. HACCP (Lebensmittelindustrie)	unternehmensspezifisch
Herkunft der Auditoren	aus dem auditierten Unternehmen → internes Audit (First-Party-Audit)		Unternehmensexterne → externes Audit	
			Kunde (Second-Party-Audit)	Zertifizierer, Berater usw. (Third-Party-Audit)
Auditauftraggeber/ Adressat des Auditberichts	Leitung des auditierten Unternehmens		Leitung eines anderen Unternehmens (z. B. Kunde bei einem Second-Party-Audit)	

Abbildung 3: Einordnung des Zertifizierungsaudits nach DIN EN ISO 9001 in eine „Audit-Morphologie“.

Neben der Zertifizierung von QM-Systemen, die in vielen Bereichen zu einer Selbstverständlichkeit geworden ist, können sich Unternehmen, die an der ständigen Verbesserung ihres QM-Systems arbeiten, um qualitätsbezogene **Auszeichnungen (Quality Awards)** bewerben. Zu den bekanntesten gehören der Deming Prize (Japan), der Malcolm Baldrige National Quality Award (USA), der EFQM Excellence Award (Europa) und der Ludwig-Erhard-Preis (Deutschland). Wegen seiner Bedeutung für die Weiterentwicklung von QM-Systemen sei der dem EFQM Excellence Award zugrundeliegende **EFQM-Excellence-Ansatz** im Folgenden kurz vorgestellt.<sup>27</sup> Der Ansatz der European Foundation for Quality Management besteht aus drei Kompo-

<sup>27</sup> Vgl. EFQM (Hrsg.), The EFQM Excellence Model (<http://www.efqm.org/the-efqm-excellence-model>); Sommerhoff, Das EFQM Excellence Modell 2013, hrsg. von der Deutschen Gesellschaft für Qualität (DGQ), o. O. 2013; Schmitt/Pfeifer, Qualitätsmanagement, 5. Auflage 2015, S. 54 ff.

zenten: den sog. acht Grundkonzepten der Excellence, dem EFQM-Kriterienmodell sowie dem mit RADAR bezeichneten Konzept der Reifegradbewertung.

23 Die acht „Grundkonzepte der Excellence“ sind als Aufgaben bzw. Funktionen formuliert und besitzen insofern appellierenden Charakter:

1. Dauerhaft herausragende Ergebnisse erzielen.
2. Nutzen für Kunden schaffen.
3. Mit Vision, Inspiration und Integrität führen.
4. Veränderungen aktiv managen.
5. Durch Mitarbeiterinnen/Mitarbeiter erfolgreich sein.
6. Kreativität und Innovation fördern.
7. Die Fähigkeiten der Organisation entwickeln.
8. Nachhaltig die Zukunft gestalten.

Diese acht Prinzipien weisen eine gewisse Ähnlichkeit mit den oben erläuterten sieben Managementgrundsätzen (insbesondere mit den Grundsätzen 1–5) der Norm DIN EN ISO 9000 auf.

24 Das EFQM-Kriterienmodell verwendet neun allgemein gehaltene Haupt-Bewertungskriterien, von denen fünf zur Kategorie „Befähiger“ und vier zur Kategorie „Ergebnisse“ zählen. (Vgl. Abb. 4.) Die Befähiger-Kriterien werden durch insgesamt 24, die Ergebnis-Kriterien durch acht Teilkriterien konkretisiert.

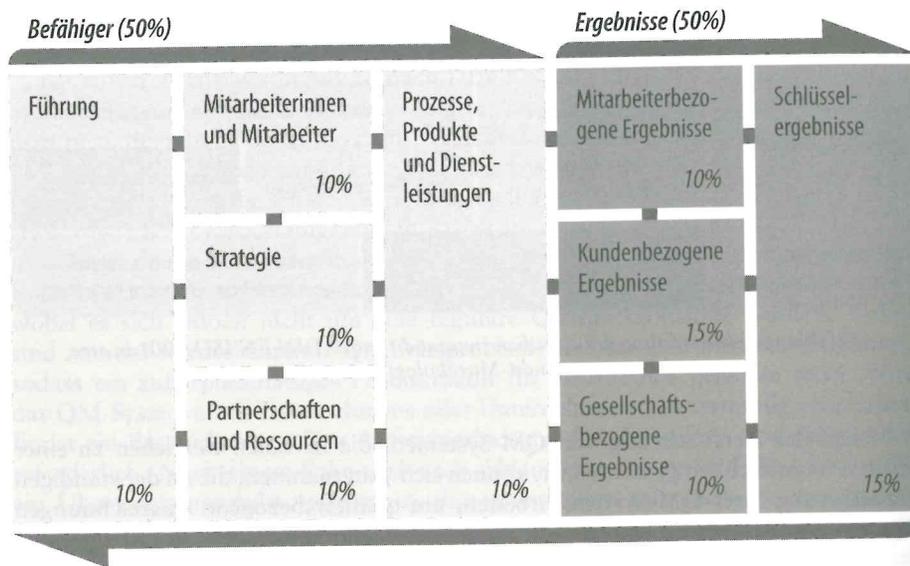


Abbildung 4: EFQM-Bewertungsmodell (Hauptkriterien und ihre Gewichtung) (Quelle: Malorny/Dicenta, in: Pfeifer/Schmitt (Hrsg.), Masing – Handbuch Qualitätsmanagement, 6. Aufl., München 2014, S. 373).

25 Das Akronym RADAR basiert auf den Begriffen Results (Ergebnisse), Approach (Vorgehensweise), Deployment (Umsetzung), Assessment and Refinement (Bewertung und Verbesserung). Die RADAR-Logik stellt eine Abwandlung des bekannten PDCA-Zyklus dar. (Vgl. Abb. 5.)

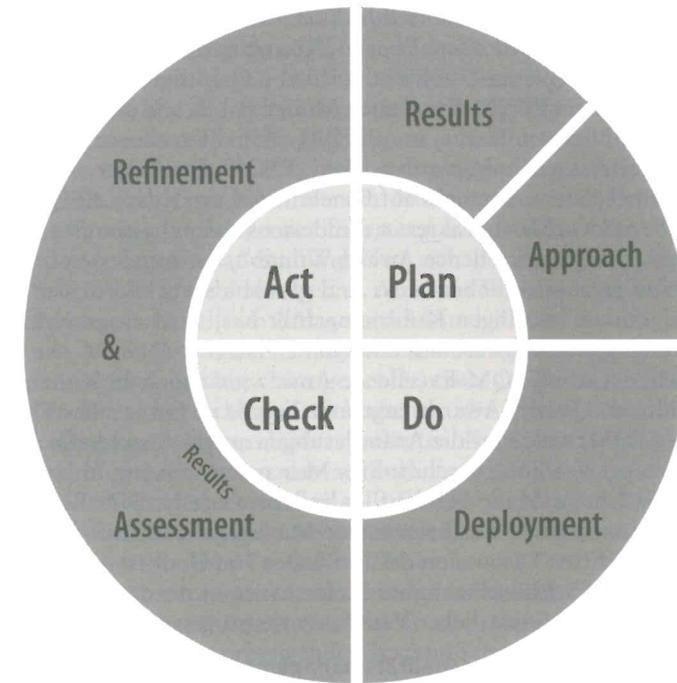


Abbildung 5: RADAR-Logik und PDCA-Zyklus (Quelle: Sommerhoff, Das EFQM Excellence Modell 2013, hrsg. von der Deutschen Gesellschaft für Qualität (DGQ), o.O. 2013, S. 4).

Im PDCA-Zyklus steht P für Plan (Zielsetzung/Planen von Verbesserungsmaßnahmen), D für Do (Ausführen des Plans), C für Check (Überprüfen, inwieweit die gewünschten Verbesserungen erreicht worden sind) und A für Act (Sichern/Erhalten des Erreichten und korrigierende Eingriffe zur weiteren Verbesserung).<sup>28</sup> Zu Bewertungszwecken wurden zwei „RADAR-Matrizen“, eine für die Befähiger- und eine für die Ergebnis-Kriterien, entwickelt.<sup>29</sup> Beide Matrizen enthalten Bewertungsattribute und Erläuterungen dazu. Für jedes Teilkriterium wird ein prozentualer Erfüllungsgrad bestimmt und die Einzelbewertungen werden unter Berücksichtigung von Gewichtungen zu einer Gesamtbewertung (in Punktwerten) aggregiert. Auf diese Weise lässt sich durch Selbst- und/oder Fremdbewertung der Reifegrad des Unternehmens hinsichtlich der Gestaltung und Lenkung seines QM-Systems – und darüber hinaus seiner gesamten Performance – bestimmen.<sup>30</sup>

Der EFQM-Excellence-Ansatz unterscheidet drei Ebenen von Reifegraden, die auch für die Bewerbung um den EFQM Excellence Award von Bedeutung sind.<sup>31</sup>

<sup>28</sup> Vgl. Deming, Out of the Crisis, Cambridge, Mass. 2000, S. 88; Kamiske/Brauer, Qualitätsmanagement von A bis Z, 7. Auflage 2011, S. 279.

<sup>29</sup> Siehe Sommerhoff, Das EFQM Excellence Modell 2013, hrsg. von der Deutschen Gesellschaft für Qualität (DGQ), o. O. 2013, S. 4 bzw. 5.

<sup>30</sup> Auch die Normenreihe DIN EN ISO 9000ff. arbeitet mit einem Reifegradansatz. (Vgl. das Modell mit fünf Reifegraden bei DIN EN ISO 9004, insbes. S. 57 ff.)

<sup>31</sup> Malorny/Dicenta, in: Pfeifer/Schmitt/Masing (Hrsg.), Handbuch Qualitätsmanagement, 6. Auflage 2014, S. 372.

Die unterste Ebene bildet „Committed to Excellence“ mit zwei Stufen (ohne bzw. mit einem Stern). Die nächsthöhere Ebene („Recognised for Excellence“) ist in drei Stufen (3, 4 bzw. 5 Sterne) unterteilt und wird von Organisationen erreicht, die bereits Erfahrung mit dem EFQM-Excellence-Modell haben und sich weiter verbessern möchten. Auf der höchsten Ebene, im „EFQM Global Excellence Award Programme“, gibt es drei Auszeichnungsstufen: den „EFQM Excellence Award Finalist“ (hohe Performance, aber noch nicht auf Benchmark-Level), den „EFQM Excellence Prize Winner“ (mit Vorbildcharakter in mindestens einem bestimmten Gebiet) und schließlich den „EFQM Excellence Award Winner“, der mindestens einen EFQM Excellence Prize gewonnen haben muss und global als Vorbild dienen kann. Jede Organisation, die die jeweiligen Kriterien erfüllt hat, wird ausgezeichnet; es gibt keinen Verdrängungswettbewerb um bestimmte Plätze.

28 Es zeigt sich, dass der EFQM-Excellence-Ansatz (und auch die Konzepte, die den anderen erwähnten Quality Awards zugrunde liegen) im Sinne eines **Total Quality Management (TQM)** weit über die Anforderungen an ein ausschließlich auf Qualitätsaspekte im engeren Sinne beschränktes Managementsystem hinausgehen. Dies gilt in abgeschwächtem Maße bereits für die Normenreihe DIN EN ISO 9000 ff. QM kann daher zunehmend mit Performance-Management identifiziert werden, was nach der oben geführten Diskussion des Einflusses von Qualität auf die Formalziele nicht überrascht. Als Schlüssel zu hoher Performance ist die dauerhafte organisatorische Verankerung kontinuierlicher Verbesserungsprozesse anzusehen.

29 **b) Betriebsmittelbezogenes Qualitätsmanagement im industriellen 3D-Druck.** Sämtliche Aufgaben der Anlagenwirtschaft im Lebenszyklus<sup>32</sup> eines Betriebsmittels und damit auch eines 3D-Druckers besitzen einen mehr oder weniger starken Qualitätsbezug. Besonders ausgeprägt ist dieser in den Phasen Anlagenbedarfsplanung und -projektierung, Anlagenutzung, Anlageninstandhaltung und Anlagenverbesserung.

30 Im Rahmen der **Anlagenbedarfsplanung und -projektierung** soll sichergestellt werden, dass die Anforderungen (z.B. hinsichtlich Werkstoff, Werkstückabmessungen, Oberflächenbeschaffenheit, mechanischer Eigenschaften, Toleranzen etc.), die an das zu beschaffende Betriebsmittel zu stellen sind, explizit festgestellt werden, und eine möglichst große Übereinstimmung der tatsächlichen Eigenschaften mit dem Anforderungsprofil gegeben ist. In diesem Zusammenhang ist zunächst zu klären, ob ein nicht-additives Verfahren aus technisch-wirtschaftlichen Gründen zur Erfüllung dieser Anforderungen möglicherweise besser geeignet ist. Anschließend ist die Produktionsaufgabe qualitativ (Direct Manufacturing, Rapid Prototyping oder Rapid Tooling)<sup>33</sup> und quantitativ (Einzel- oder Serienfertigung) zu spezifizieren. Darüber hinaus ist das additive Fertigungsverfahren (Laser-Sintern, Laser-Strahlschmelzen etc.) festzulegen sowie die ablauforganisatorische und logistische Integration der Anlage in die bestehende Anlagenumgebung zu planen (insbesondere Berücksichtigung von Pre- und Post-Prozessen). Versäumnisse und Fehler in dieser frühen Phase des Anlagenlebenszyklus lassen sich während der Nutzung kaum noch korrigieren.

<sup>32</sup> Vgl. hierzu Blohm/Beer/Seidenberg/Silber, Produktionswirtschaft, 5. Auflage 2016, S. 159 ff., und die dort angegebene Literatur.

<sup>33</sup> Mit Direct Manufacturing (auch Rapid Manufacturing) wird die additive Herstellung von Endprodukten, mit Rapid Prototyping die additive Herstellung von Prototypen und Versuchsteilen bezeichnet. (Vgl. VDI 3405, S. 4.) Rapid Tooling bedeutet die „Anwendung der additiven Methoden und Verfahren auf den Bau von Endprodukten, die als Werkzeuge, Formen oder Formeinsätze verwendet werden.“ (VDI 3405, S. 4).

Die **Anlagennutzung** stellt die im Sinne der Sach- und Formalziele der Produktion 31 wichtigste Phase des Lebenszyklus dar. Wie andere technische Systeme unterliegen auch additive Fertigungsanlagen im Laufe ihrer Nutzungsdauer Alterungs- und Verschleißprozessen, die die Funktionalität beeinträchtigen können.<sup>34</sup> Dies gilt insbesondere für mechanische Komponenten, wie Beschichter, und die Energieversorgungssysteme. So nimmt bei den laserbasierten Verfahren die vom Laser emittierte Strahlungsleistung mit zunehmender Nutzungsdauer ab.<sup>35</sup> Mit präventiven Maßnahmen (Wartung, vorbeugender Teileaustausch) und korrektiven Maßnahmen (Reparatur) der **Anlageninstandhaltung** lässt sich die Funktionsfähigkeit der Betriebsmittel erhalten bzw. wiederherstellen. Auf diese Weise wechseln sich Nutzungs- und Instandhaltungsintervalle im Anlagenzyklus in der Regel mehrfach ab. Darüber hinaus können Maßnahmen der **Anlagenverbesserung** angezeigt sein. Diese sind auf die Modernisierung der Maschine gerichtet, etwa um durch die Beseitigung von Schwachstellen Wirtschaftlichkeits-, Sicherheits- oder Umweltschutzziele besser zu erfüllen oder die quantitative und/oder qualitative Kapazität zu erhöhen. Während mit Instandhaltungsmaßnahmen das anfänglich vorhandene Leistungsvermögen erhalten oder wiederhergestellt werden soll (Effizienzaspekt), zielt die Anlagenverbesserung auf eine Anhebung des Leistungsvermögens (Effektivitätsaspekt).<sup>36</sup>

Mit Hilfe des Ansatzes **Total Productive Maintenance (TPM)**, auch als „Total Productive Management“ interpretiert, wird eine ganzheitliche Optimierung von Produktion und Instandhaltung angestrebt. Das Konzept weist folgende Merkmale auf: 32

- Umfassendes System der vorbeugenden Instandhaltung
- Mitarbeiterzentrierter Ansatz, insbesondere durch Einbindung der Maschinenbediener, denen
- die Verantwortung für den einwandfreien Zustand „ihrer“ Produktionsanlage übertragen wird,
- die Ausführung regelmäßiger Wartungs- und einfacher Instandsetzungsaufgaben obliegt.
- Systematische kontinuierliche Verbesserung

Das **Hauptziel** des TPM-Ansatzes besteht in einer Erhöhung der Gesamtanlagen- 33 effizienz (OEE<sup>37</sup>), die als mathematisches Produkt der drei Kennzahlen Verfügbarkeitsrate, Leistungsindex und Qualitätsrate definiert ist.<sup>38</sup> Der Ansatzpunkt bzw. das Mittel zur Erreichung des Ziels wird in der Beseitigung der sog. **Sechs Großen Verlustquellen** gesehen:<sup>39</sup>

- Maschinenausfälle
- Zeitverluste durch Rüsten und Einstellen
- Leerlauf und kurzzeitige Stillstände
- verringerte Bearbeitungsgeschwindigkeit
- Fehler im Produktionsprozess (mit den Folgen Ausschuss und/oder Nacharbeit)
- Anlaufverluste (reduzierter Output bis zum Erreichen des Normalbetriebs)

<sup>34</sup> Vgl. Eschey, Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung, 2013, S. 38.

<sup>35</sup> Vgl. Eschey, Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung, 2013, S. 38.

<sup>36</sup> Vgl. Blohm/Beer/Seidenberg/Silber, Produktionswirtschaft, 5. Auflage 2016, S. 160.

<sup>37</sup> OEE = Overall Equipment Effectiveness.

<sup>38</sup> Vgl. etwa Schmitt/Pfeifer, Qualitätsmanagement, 5. Auflage 2015, S. 577 f.

<sup>39</sup> Vgl. Brunner/Wagner, Taschenbuch Qualitätsmanagement, 4. Auflage 2008, S. 290.

34 TPM soll durch das sog. 5-Säulen-Konzept realisiert werden, das sich wie folgt charakterisieren lässt:<sup>40</sup>

1. **Beseitigung von Schwerpunktproblemen:**

Erkennen von Schwachstellen (s. die Sechs Großen Verlustquellen) und Optimierung der Anlagenutzung.

2. **Autonome Instandhaltung:**

Eigenständige Durchführung von Wartungs-, Inspektions- und kleineren Instandsetzungsmaßnahmen durch die Maschinenbediener.

3. **Geplantes Instandhaltungsprogramm:**

Schnelle Entdeckung und Beseitigung von Abweichungen an den Anlagen auf Basis eines Programms zur prozessbezogenen Instandhaltung (verantwortlich: zentrale Instandhaltungsabteilung).

4. **Schulung und Training:**

Qualifizierung der Maschinenbediener.

5. **Instandhaltungsprävention:**

Vorbeugende Maßnahmen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch Optimierung der technischen Lebensdauer und der Instandhaltungsintervalle, zur Vermeidung unnötiger Instandhaltungsmaßnahmen und um die Zuverlässigkeit zu erhöhen.

Wenngleich das TPM-Konzept schwerpunktmäßig auf den Betriebsmitteleinsatz gerichtet ist, stellt es mit seinen personalbezogenen Maßnahmen eine Brücke zwischen den betriebsmittel- und den mitarbeiterzentrierten Aspekten des QM dar.

35 **c) Mitarbeiterbezogenes Qualitätsmanagement.** Ähnlich den anlagenwirtschaftlichen Managementaufgaben im Anlagenlebenszyklus besitzen auch die **Teilfunktionen<sup>41</sup> des Personalmanagements** einen unterschiedlich stark ausgeprägten Qualitätsbezug. Eine sich rasch entwickelnde Technologie wie die additive Fertigung verlangt ein Personalmanagement, das sicherstellt, dass die Qualifikationsanforderungen an Bauteil-Konstrukteure und Maschinenbediener erfüllt werden können. Die Anforderungen – etwa spezifische CAD-Kenntnisse – sind im Rahmen der qualitativen **Personalbedarfsplanung** zu ermitteln. Bei der **Personalauswahl** gilt es denjenigen Bewerber zu identifizieren, der die Anforderungen am besten erfüllt. Während der Phase der **Personaleinführung und -einarbeitung** muss sich der neue Mitarbeiter unter Anleitung seines Vorgesetzten oder erfahrener Kollegen stellenspezifisches Wissen aneignen. Trotz weitgehend standardisierter und dokumentierter Prozesse ist dies ohne „Trial and Error“ nicht möglich.

36 Nach Abschluss der Integration eines neuen Mitarbeiters ist in der Phase **Personaleinsatz und -erhaltung** sicherzustellen, dass die erwartete Leistung nachhaltig erbracht wird, indem durch materielle (Entgelt) und immaterielle Anreize im Sinne der Unternehmensziele erwünschtes Verhalten „belohnt“ wird. Zu den immateriellen Anreizen zählen motivationssteigernde Maßnahmen, wie

- die Übertragung größerer Verantwortung auf ausführende Mitarbeiter, etwa durch die Selbstprüfung von Werkstücken,
- die Wertschätzung der Mitarbeiter durch Einbindung in ständige Verbesserungsprozesse,
- das Einräumen von Freiräumen und Befugnissen.

<sup>40</sup> Vgl. Kamiske/Brauer, Qualitätsmanagement von A bis Z, 7. Auflage 2011, S. 305 f.

<sup>41</sup> Vgl. hierzu etwa Nicolai, Personalmanagement, 4. Auflage 2016, S. 5 f.

Damit ist die Qualität der Führung angesprochen, die das Qualitätsbewusstsein und -verhalten der Mitarbeiter beeinflusst, welches sich wiederum auf die Prozessqualität auswirkt und auf diese Weise die Produktqualität befördert oder beeinträchtigt (Wirkungskette des Personalmanagements). In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Haltung der Führungskräfte zu Nichtkonformitäten/Fehlern von Bedeutung. Idealtypisch werden in Tab. 3 zwei Fehlerkulturen (Typ A und Typ B) unterschieden, die durch typische Aussagen charakterisiert sind.

Fehlerkultur Typ A	Fehlerkultur Typ B
„Fehler sind normal; da kann man nichts machen.“	„Jeder vermeidbare Fehler ist ein Fehler zu viel.“
„Um Fehler kümmern wir uns dann, wenn einer auftritt.“	„Der beste Fehler ist der, der gar nicht erst auftritt.“
„Bei einem Fehler ist die Suche nach dem Schuldigen wichtig.“	„Bei einem Fehler steht die Suche nach den Ursachen im Vordergrund.“
„Die Auseinandersetzung mit Fehlern sorgt für Ärger und Kosten.“	„Aus Fehlern kann man lernen.“
„Nicht Fehler sind das Problem, sondern dass Fehler ‘an die große Glocke gehängt’ werden.“	„Nur aus entdeckten Fehlern kann man lernen, nicht aus vertuschten.“
„Ein Produktfehler wird durch Nacharbeit beseitigt.“	„Ein Produktfehler ist ein Symptom, die Krankheit ist zu beseitigen.“
„Ist die Fehlerquote zu hoch, sind die Kontrollen zu intensivieren.“	„Ist die Fehlerquote zu hoch, sind die Ursachen zu ermitteln und zu beseitigen.“
„Die wirksamste Fehlerverhütung besteht darin, dass sich ausführende Mitarbeiter auf ihre Arbeit konzentrieren.“	„Zur Fehlerverhütung gehört, dass ausführende Mitarbeiter auf Ereignisse und Entwicklungen hinweisen, die zu Fehlern führen können.“
„Kundenbeschwerden enthalten nichts, was wir nicht selbst schon wissen.“	„Kundenbeschwerden sind eine wertvolle Informationsquelle.“

Tabelle 3: Fehlerkulturen.

Vermutlich herrscht in der Praxis großenteils die Fehlerkultur vom Typ A vor, während Typ B eher mit den Anforderungen der Normenreihe DIN EN ISO 9000 ff., den Standards der Quality Awards und auch mit dem Ideal des TQM-Ansatzes kompatibel ist.

Die **Personalbeurteilung** gibt dem Mitarbeiter ein Feedback über seinen Leistungsstand und sein Verhalten. Sie dient zugleich als Basis für Maßnahmen der **Personalentwicklung**, die auf die Erfüllung zukünftiger Anforderungen und gegebenenfalls die Beseitigung gegenwärtiger Qualifikationsdefizite gerichtet sind. Die technologische Entwicklung im Bereich der additiven Fertigung erfordert entsprechende Maßnahmen der Weiterqualifizierung.

40 Ein Instrument, die Initiative und Kreativität der (ausführenden) Mitarbeiter zu aktivieren und ihr arbeitsplatzbezogenes Expertenwissen für ständige Verbesserungen zu nutzen, sind **Qualitätszirkel**.<sup>42</sup> Dieses seit den 1950er Jahren zunächst in Japan eingesetzte Kleingruppenkonzept weist folgende Merkmale auf: Ca. 4 bis 12 Teilnehmer aus demselben Arbeitsbereich treffen sich zu regelmäßigen Sitzungen während der Arbeitszeit, um Qualitäts- und andere Performanceprobleme zu identifizieren und gemeinsam eine Lösung vorzuschlagen. Die Teilnahme an Qualitätszirkeln ist freiwillig. Ein Moderator, z.B. Vorarbeiter oder Meister, leitet die Sitzungen, bildet die Mitglieder in speziellen Arbeitstechniken aus, dokumentiert die Ergebnisse und präsentiert diese dem Management. Die Arbeitstechniken wurden eigens für die Qualitätszirkelarbeit ausgewählt bzw. entwickelt.<sup>43</sup> Hierzu gehören zum einen die Fehlererfassungswerkzeuge **Fehlersammelliste** (statistische Urliste, mit der die Anzahl der Fehler in den einzelnen Fehlerkategorien erfasst wird), das **Histogramm** (zur grafischen Darstellung der Häufigkeitsverteilung der Fehler) sowie die **Qualitätsregelkarte** (zur grafischen Abbildung der stochastisch streuenden Ausprägungen eines qualitätsrelevanten Produktmerkmals). Zum anderen gehören hierzu folgende Fehleranalysewerkzeuge: das **Pareto-Diagramm** (zur grafischen Darstellung kumulierter Häufigkeiten), das **Streudiagramm** (zur grafischen Darstellung möglicher Korrelationen zwischen zwei Größen), das **Brainstorming** (eine einfache Kreativitätstechnik zur Problemanalyse und Lösungsfindung) sowie das **Ursache-Wirkungs-Diagramm**.

41 Das **Ursache-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa-Diagramm)** ist ein einfach zu handhabendes, heuristisches Hilfsmittel zur Analyse von Qualitätsproblemen, das sich auch unabhängig vom Qualitätszirkelkonzept einsetzen lässt. Es **unterstützt** die **Ursachenanalyse** als Voraussetzung für die Erarbeitung von Lösungsvorschlägen und soll u.a. verhindern, dass ein vorschnell gefasstes Urteil über einen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang als einzig mögliche Erklärungshypothese angesehen wird. Grundüberlegung ist, dass sich Fehlerursachen im Wesentlichen auf die vier Faktoren **Mensch, Maschine, Material** und **Methode** zurückführen lassen (mitunter um die „Mitwelt“, d.h. Umfeldeinflüsse, erweitert zu den „5 M“). In Abhängigkeit vom jeweiligen Einzelfall kann auch eine andere Gliederung der Hauptfaktoren zweckmäßig sein. In jedem Fall ist eine angemessene tiefe Aufgliederung der Hauptursachen in potenzielle Einzelursachen vorzunehmen. Die grafische Darstellung der Ursachenhierarchie ergibt ein typisches Fischgrätenmuster (vgl. Abb. 6). Abb. 6 gibt ein allgemeines, d.h. nicht auf einen konkreten Anwendungsfall angepasstes, Ursache-Wirkungs-Diagramm für SLS (Selektives Lasersintern)-Prozesse wieder, das allerdings den menschlichen Faktor als potenzielle Problemursache ausblendet.

42 Ausgehend von der Problembeschreibung gehen die Anwender des Ishikawa-Diagramms entgegen der Pfeilrichtung vor, wobei sich folgende **Vorgehensschritte** unterscheiden lassen:<sup>44</sup>

1. Symptom-/Problemdefinition (Beschreibung der Wirkung des Problems),
2. Feststellung der Hauptursachen des Problems,
3. Sammlung möglicher Einzelursachen,

<sup>42</sup> Vgl. z.B. *Kamiske/Brauer*, Qualitätsmanagement von A bis Z, 7. Auflage 2011, S. 236 ff.

<sup>43</sup> Auch bekannt unter den Bezeichnungen „Elementare Werkzeuge der Qualitätssicherung“, „Sieben Qualitätswerkzeuge“ oder „Q7“. (Vgl. *Kamiske/Brauer*, Qualitätsmanagement von A bis Z, 7. Auflage 2011, S. 218 ff.)

<sup>44</sup> Vgl. *Kamiske/Brauer*, Qualitätsmanagement von A bis Z, 7. Auflage 2011, S. 232 f.

4. Auswahl und nähere Untersuchung der wahrscheinlichsten Einzelursache(n) in einer Gruppendiskussion,
5. Überprüfung der wahrscheinlichsten Einzelursache(n),
6. Erarbeitung und Realisierung einer Lösung.

Sowohl das Normenwerk DIN EN ISO 9000 ff. als auch der EFQM-Excellence- resp. TQM-Ansatz beinhalten als konstitutives Element einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP). Im japanischen Management stellen ständige Verbesserungen eine mit **Kaizen** bezeichnete traditionelle Denkhaltung<sup>45</sup> dar, die durch folgende Merkmale charakterisiert ist:

- **Prozessorientierung** (keine einzelfallbezogene Problemlösungsmethodik, die nur bei Bedarf eingesetzt wird): Es gibt kein finales Ziel; angestrebt wird lediglich ein sich am jeweiligen Status quo ante orientierendes „Zwischenziel“ nach dem anderen.
- **Vorgehen in kleinen Schritten**: Fortschritte sind evolutionär und inkremental, keine Innovationen im Sinne eines „großen Wurfs“.<sup>46</sup>
- **Offenes Ende**: Der Kaizen-Prozess ist grundsätzlich niemals abgeschlossen, besitzt daher auch keinen Projektcharakter.

Kaizen kann als Anwendung des PDCA-Zyklus (vgl. Abb. 5) und dieser wiederum als Regelkreis im kybernetischen Sinn interpretiert werden. Dabei entspricht das Planen (Plan) dem Festlegen der Führungsgröße, das Ausführen (Do) dem Erzeugen der Regelgröße in der Regelstrecke, das Überprüfen (Check) dem Vergleich von Führungs- und Regelgröße durch den Regler und das Erhalten/Korrigieren (Act) dem Bilden einer Stellgröße (vgl. Abb. 7).<sup>47</sup>

Ein wirkungsvolles Instrument von Kaizen stellen Qualitätszirkel dar, wobei das entsprechende Vorgehen an einem **Beispiel** erläutert sei. In einer Gruppe aus mehreren Maschinen der additiven Fertigung wurde mit Hilfe einer Fehlersammelliste und der Pareto-Analyse zunächst diejenige Anlage mit der größten Fehlerhäufigkeit identifiziert. Anschließend erfolgte in analoger Weise die Identifikation der häufigsten Fehlerart mit dem Ergebnis, dass die mit dieser Maschine erzeugten Teile einen zu großen Verzug aufwiesen. Als Problemursache konnte mittels des Ursache-Wirkungs-Diagramms eine ungleichmäßige Temperaturverteilung im Bauteil während des Fertigungsprozesses ermittelt werden, die auf wechselnde Umgebungsbedingungen zurückzuführen war, welche letztlich durch eine systematische Unachtsamkeit des Maschinenbedieners hervorgerufen wurden. In einer Brainstorming-Sitzung des Qualitätszirkels wurde eine Abhilfemaßnahme gefunden, deren nachhaltige Wirksamkeit durch Poka Yoke gesichert wurde. Unter Poka Yoke wird ein Prinzip

<sup>45</sup> Vgl. hierzu *Imai, Kaizen*, 2. Auflage 2002, S. 21.

<sup>46</sup> Zu einer vertieften Diskussion des inkrementalen Charakters von *Kaizen* vgl. *Seidenberg*, Ausprägungen und Einsatzbedingungen inkrementaler Managementansätze, Diskussionspapier Universität Siegen 2012, S. 19 ff.

<sup>47</sup> Bezogen auf die Anwendung im Unternehmen stellt die **Führungsgröße** in einem Regelkreis die Zielsetzung (Vorgabe, Soll- oder Referenzgröße) dar, die dem **Regler** als verantwortlich Handelndem (oder einem Team oder auch einem Computer) vorgegeben ist. Die **Regelgröße** besteht aus einer Ist-Information über den im Gleichgewicht zu haltenden Bereich (die **Regelstrecke**) und liefert auf diese Weise das Feedback. Der Regler vergleicht die Regel- mit der Führungsgröße und ergreift im Falle nicht tolerierbarer Abweichungen geeignete Gegenmaßnahmen, die als **Stellgröße** bezeichnet werden. Die Notwendigkeit für das fortgesetzte Durchlaufen dieses Regelkreisprozesses ergibt sich aus den – in Abb. 7 nicht dargestellten – Störungen, die an der Regelstrecke angreifen und letztlich die Abweichungen zwischen Regel- und Führungsgröße verursachen.

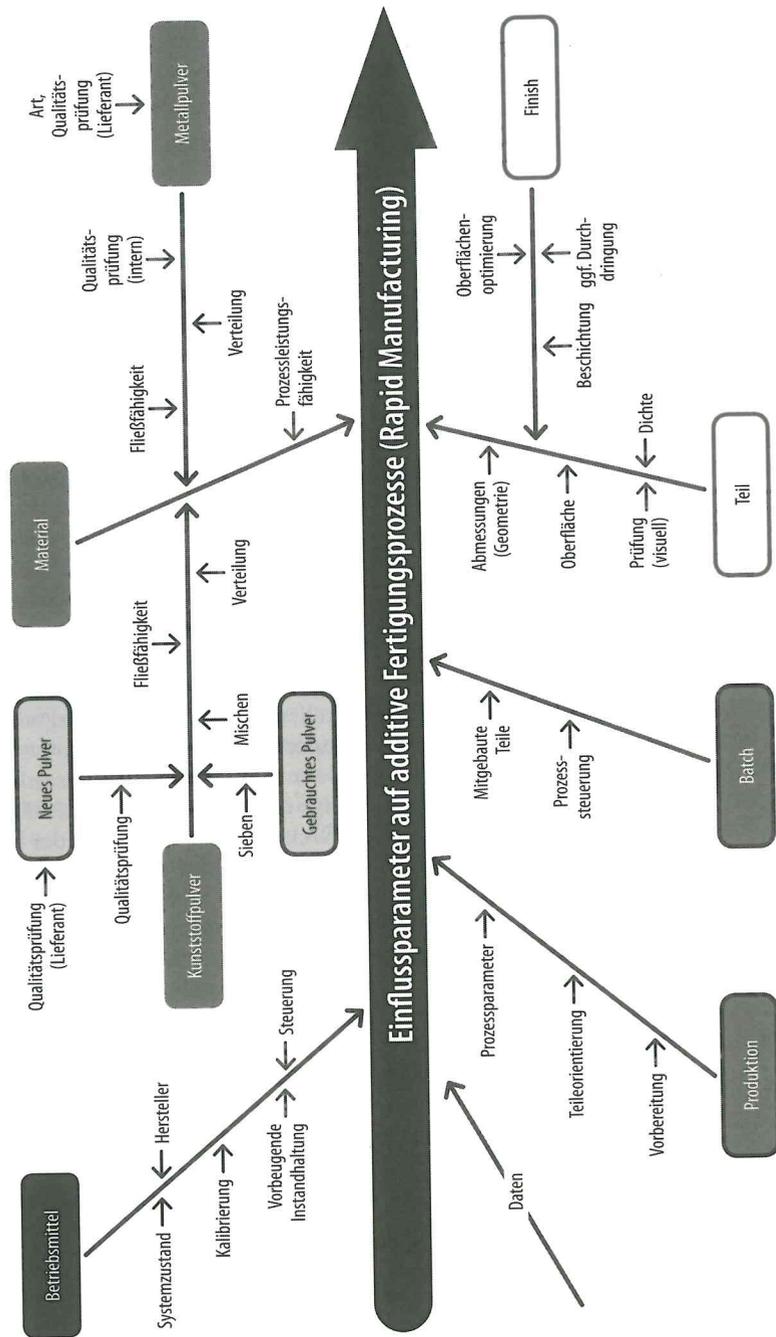


Abbildung 6: Allgemeines Ursache-Wirkungs-Diagramm für SLS-Prozesse (Quelle: Schmid/Levy, Quality Management and Estimation of Quality Costs for Additive Manufacturing with SLS, Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference 2012, ETH Zürich 2014, S.1, aus dem Englischen übersetzt).

Seidenberg/Ansari

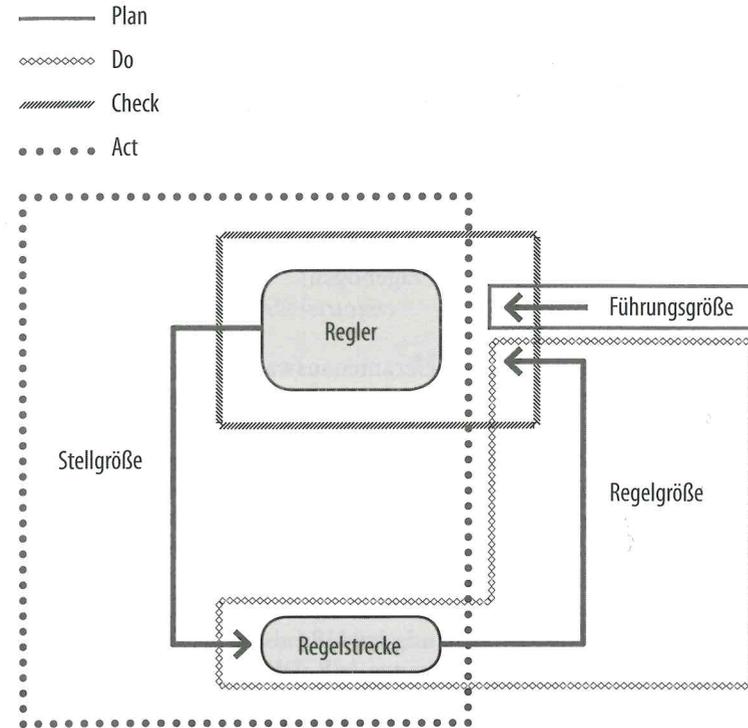


Abbildung 7: Entsprechungen von Regelkreis und PDCA-Zyklus (Quelle: Seidenberg, Ausprägungen und Einsatzbedingungen inkrementaler Managementansätze, Diskussionspapier Universität Siegen 2012, S.22).

verstanden, das durch technische Vorkehrungen oder organisatorische Maßnahmen unbeabsichtigte menschliche Fehler, wie Auslassen, Übersehen, Vertauschen, Vergessen, Verwechseln etc., verhindern bzw. so frühzeitig aufdecken soll, ehe ein Fehler am Produkt entsteht.<sup>48</sup> Beispielsweise könnte eine Poka-Yoka-Maßnahme darin bestehen, dass die Behälter für bereits gesiebten verwendeten Pulverwerkstoff einerseits und noch nicht gesiebten andererseits verschiedenfarbig gekennzeichnet werden, um ein Verwechseln von beiden Pulvern weitgehend auszuschließen. Die Wirksamkeit der implementierten Maßnahme wird in einem Vorher-Nachher-Vergleich nachgehalten und durch Standardisierung des verbesserten Ablaufs ist sicherzustellen, dass ein Rückfall in den Status quo ante ausgeschlossen ist.

**d) Materialbezogenes Qualitätsmanagement.** Da die Eigenschaften des Werkstoffs einen erheblichen Einfluss auf die Produktqualität haben können, ist es oberstes Sachziel des QM im Materialbereich, die Beschaffung von Werkstoffen sicherzustellen, die den Spezifikationen aufgrund der Betriebsmitteleigenschaften sowie der Prozess- und Produkthanforderungen entsprechen. Die hierzu einsetzbaren Instrumente können gegliedert werden in solche, die sich 1. im Vorfeld von Beschaffungs-Transaktionen, 2. im unmittelbaren Zusammenhang mit einer Be-

<sup>48</sup> Vgl. etwa Schmitt/Pfeifer, Qualitätsmanagement, 5. Auflage 2015, S.579f.

Seidenberg/Ansari

schaffungs-Transaktion und 3. im Anschluss an abgeschlossene Beschaffungs-Transaktionen einsetzen lassen.

- 46 Im Vorfeld von Beschaffungs-Transaktionen, d.h. bevor eine Geschäftsbeziehung mit dem Lieferanten besteht, ist der Informationsstand des Abnehmers niedrig und sein Risiko einer Fehlentscheidung besonders hoch. Nach zunehmender Aussagekraft der erhältlichen Informationen geordnet, kommen die nachstehend aufgeführten Instrumente infrage:
- Lieferantenbesuch (erste Inaugenscheinnahme der Räumlichkeiten, Betriebsmitteleinrichtung etc. des Lieferanten)
  - Selbstauskunft des Lieferanten (etwa per Fragebogen)
  - Erstmusterprüfungen
  - Auditierung von Lieferanten
  - Nutzwertanalyse (zur multikriteriellen Lieferantenauswahl)
  - Qualitätsmanagementvereinbarungen (auch als Qualitätssicherungsvereinbarungen bezeichnet)
- 47 Bei einer Qualitätsmanagementvereinbarung handelt es sich um ein Vertragswerk, mit dem sich der Lieferant gegenüber seinem Abnehmer verpflichtet, im Einzelnen spezifizierte Anforderungen an sein QM-System zu erfüllen. Der Zweck besteht darin, „Spielregeln“ für qualitätsbezogene Maßnahmen zu vereinbaren, Anforderungen eindeutig zu definieren und Aktivitäten zu koordinieren (Bsp.: Welcher Partner führt Qualitätsprüfungen durch?) Typische Vertragsinhalte sind:<sup>49</sup>
- Sachlicher Geltungsbereich (z.B. Abgrenzung bzgl. Produkten/Produktgruppen)
  - Zugrundeliegendes QM-System des Lieferanten (z.B. DIN EN ISO 9001)
  - Informations-, Dokumentations- und Nachweiskontrolle
  - Festlegung des Umfangs von Wareneingangsprüfungen beim Abnehmer (unter Berücksichtigung von § 377 HGB)
  - Benennung von Ansprechpartnern
  - Zeitlicher Geltungsbereich
- 48 Ein im unmittelbaren Zusammenhang mit einer Beschaffungs-Transaktion einsetzbares Instrument ist die Wareneingangsprüfung, das einzige der hier vorgestellten Instrumente, das unmittelbar an den Eigenschaften des Werkstoffs ansetzt, während die übrigen eine indirekte Aussage (via Lieferanten-Eigenschaften) ermöglichen. Die Wareneingangsprüfung kann als 100 %-Prüfung, d.h. als Prüfung der gesamten Menge der Lieferung, oder als Stichprobenprüfung<sup>50</sup> (Abnahmeprüfung lediglich einer Teilmenge mittels Prüfplan) durchgeführt werden. Das Ergebnis einer Abnahmeprüfung besteht in der Feststellung, ob die Lieferung angenommen oder abgelehnt wird. Der Prüfplan enthält den Stichprobenumfang sowie die quantifizierten Bedingungen für die Annahme bzw. Zurückweisung der Lieferung. Statistisch gesehen handelt es sich bei der Wareneingangsprüfung um einen Hypothesentest mit den Hypothesen  $H_0$  „Das Los genügt den Anforderungen“ und  $H_1$  „Das Los genügt den Anforderungen nicht“.
- 49 Die VDI-Richtlinie 3405 empfiehlt beispielsweise für das Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen die Prüfung folgender Materialparameter: Rieselfähigkeit, Schütt- und Stopfdichte, Partikelgrößenverteilung, Viskositätszahl, Aufschmelz- und

<sup>49</sup> Vgl. Kroonder, in: Pfeifer/Schmitt/Masing (Hrsg.), Handbuch Qualitätsmanagement, 6. Auflage 2014, S. 593 ff.

<sup>50</sup> Zu Einzelheiten vgl. etwa Kamiske/Brauer, Qualitätsmanagement von A bis Z, 7. Auflage 2011, S. 290 ff.

Kristallisationsverhalten sowie eine thermogravimetrische Messung des Masseverlustes und eine Messung der Massen-Volumen-Rate.<sup>51</sup>

Instrumente, die im Anschluss an abgeschlossene Beschaffungs-Transaktionen eingesetzt werden können, sind:

- Auditierung von Lieferanten
- Lieferantenbewertung
- Qualitätsmanagementvereinbarungen für zukünftige Transaktionen

Mögliche Bewertungskriterien der Lieferantenbewertung sind: (Vgl. Wagner, 51 S. 573)

- Qualitätskennzahlen
- Anzahl/Anteil Falschliefereien
- Reklamationsfälle
- Preisveränderungen
- Mengenabweichungen
- Terminabweichungen

Die Konsequenzen<sup>52</sup> bei guten Bewertungen können u.a. von Anerkennungsschreiben und Lieferantenauszeichnungen über eine Erhöhung der Lieferquote bis zu einer intensiven Lieferantenintegration reichen. Bei einem schlechten Bewertungsergebnis sollte der Abnehmer zunächst das Gespräch mit dem Lieferanten suchen; er kann auch eine Zielvereinbarung mit dem Lieferanten abschließen oder diesen bei Verbesserungsmaßnahmen unterstützen (Lieferantenentwicklung). Als Ultima Ratio bleibt nur der Abbruch der Geschäftsbeziehung.

Die Qualität des Werkstoffs ist nicht nur zum Zeitpunkt der Lieferung von Bedeutung, sondern muss bis zum Zeitpunkt der Verarbeitung gewährleistet werden. „Durch Lagerung und Wiederverwendung des Ausgangsmaterials aber auch durch Variationen in den Werkstoffchargen können hier deutliche Schwankungen auftreten.“<sup>53</sup>

**2. Prozessbezogene Modelle und Methoden.** Auf der Prozessebene können sehr unterschiedliche Objekte Gegenstand des QM sein: der Bauprozess, d.h. Produktionsprozess i.e. S., der pulverförmigen Werkstoff in Produkte umwandelt (Mikrosicht), der gesamte Wertschöpfungsprozess auf Unternehmensebene, der Funktionen wie Beschaffung und Lagerung beinhaltet, oder unternehmensübergreifende Wertschöpfungsprozesse (Makrosicht). Auch Qualitätsprüfungen und Messvorgänge, Kaizen- und QM-Aktivitäten selbst, die ausnahmslos indirekt zur Wertschöpfung beitragen, besitzen Prozesscharakter. Gemeinsam ist allen Prozessen, dass sie unter Zeitverbrauch Input in Output transformieren und dass die Prozesslenkung (-regelung) aus überwachenden und steuernden Komponenten besteht.

Am Beispiel des Laser-Sinterns von Kunststoffen werden im Folgenden spezielle prozessbezogene QM-Aspekte der Mikroebene dargestellt. Zur Prozessüberwachung stehen zwei Ansätze zur Verfügung.<sup>54</sup> Zum einen lässt sich die Prozessqualität indirekt aus den Eigenschaften von Rückstellmustern bewerten, wobei lediglich jeweils eine Momentaufnahme erfolgt und auch die Gefahr besteht, dass die Eigenschaften

<sup>51</sup> Vgl. VDI 3405, Bl. 1, S. 7 ff.

<sup>52</sup> Vgl. Wagner, in: Pfeifer/Schmitt/Masing (Hrsg.), Handbuch Qualitätsmanagement, 6. Auflage 2014, S. 575 f.

<sup>53</sup> VDI 3405, S. 35.

<sup>54</sup> Vgl. hierzu VDI 3405, Bl. 1, S. 9 ff.

des Rückstellmusters von denen des Bauteils abweichen<sup>55</sup> können. „Beim zweiten Ansatz wird eine Auswahl der Vielzahl systemtechnischer Parameter und der sich dadurch einstellenden Prozessbedingungen einer direkten Überwachung unterzogen.“<sup>56</sup> Mit geringer Eingriffstiefe und geringem Aufwand werden in festgelegten Intervallen (z.B. halbjährlich oder jährlich) Betriebsmittelzustand und -einstellungen überprüft. Hierbei handelt es sich allerdings weniger um eine prozess- als um eine betriebsmittelorientierte Vorgehensweise. Mit größerer Eingriffstiefe und erheblich höherem Aufwand lassen sich Prozessparameter bzw. -bedingungen zu Beginn oder am Ende jedes Bauprozesses (Jobs) überwachen. Die größte Eingriffstiefe und der höchste Aufwand sind mit der Überwachung jeder Materialschicht während des Bauprozesses verbunden.<sup>57</sup> „Erst dieses Vorgehen erlaubt einen direkten Rückschluss von den Prozessparametern/-bedingungen auf die Qualität der Bauteile und orientiert sich am Konzept der umfassenden ‚Rückverfolgbarkeit‘...“<sup>58</sup> Analog zur statistischen Qualitätskontrolle mit Qualitätsregelkarten empfiehlt die VDI-Richtlinie 3405 Bl. 1 in diesem Zusammenhang, ein zweistufiges Toleranzband (mit einer Warn- und einer Prozessabbruch-Zone) einzusetzen.<sup>59</sup>

#### Exkurs: Statistische Qualitätsregelung und Qualitätsregelkarte<sup>60</sup>

Bei der insbesondere in der industriellen Massen- und Großserienproduktion eingesetzten statistischen Qualitätskontrolle (Prozesskontrolle – SPC) handelt es sich um einen Regelkreisprozess. Qualitätsbeeinflussende Produkt- und/oder Prozessparameter, die in detaillierten Prüfvorschriften festgelegt sind, werden – möglichst automatisch – erfasst. Ergibt der Vergleich mit entsprechenden Sollwerten Abweichungen, die ein tolerables Maß überschreiten, sind Maßnahmen einzuleiten (z.B. eine Neujustierung), um die Qualität des Produktionsprozesses durch Angleichung der Ist- an die Vorgabewerte zu wahren.

Wichtige Eigenschaften von Produktionsprozessen sind deren Stabilität und Fähigkeit. Ein Prozess wird als **stabil** (beherrscht) bezeichnet, wenn sich seine Parameter im Zeitablauf nur in zulässigen Grenzen ändern. Für einen der Normalverteilung unterliegenden Prozess bedeutet dies, dass sich Mittelwert und Streuungsmaß (Standardabweichung) jeweils in einer definierten Bandbreite bewegen müssen. Ein Prozess ist **fähig**, wenn die Messwerte des relevanten Parameters mit einer festzulegenden Wahrscheinlichkeit innerhalb der Toleranzgrenzen schwanken.<sup>61</sup> Die Prozessfähigkeit (process capability) eines beherrschten Prozesses lässt sich mit Hilfe des Prozessfähigkeitsindex  $c_p$  quantifizieren. Der  $c_p$ -Wert setzt die Toleranz zur Prozessstreuung ins Verhältnis, wobei für letztere üblicherweise das Sechsfache der Standardabweichung herangezogen wird. Aus der Definition des Prozessfähigkeitskennwertes ist ersichtlich, dass ein Unternehmen grundsätzlich **zwei Optionen** hat, **die Prozessfähigkeit zu steigern**: Es kann seine **Anforderungen an den Prozess reduzieren**, d.h. die Toleranz vergrößern, soweit dies aus technischen Gründen oder aufgrund der Wettbewerbsverhältnisse möglich ist. Oder es **verbessert den Prozess**, indem es die Streuung des bzw. der qualitätsrelevanten Parameter verkleinert, beispielsweise durch die Investition geeigneterer Maschinen oder die Qualifizierung der Mitarbeiter.

Große Bedeutung im Rahmen der statistischen Qualitätsregelung kommt der **Qualitätsregelkarte** als grafischem Darstellungsmittel zu. Dem Produktionsprozess werden in definierten Zeitabstän-

<sup>55</sup> Vgl. Hartmann/Hausotte/Drummer/Wudy, RTJournal – Forum für Rapid Technologie, 2012.

<sup>56</sup> VDI 3405, Bl. 1, S. 11.

<sup>57</sup> Das von Hartmann u.a. vorgestellte inkrementelle In-Line-Messsystem für SLM-Anlagen zur additiven Fertigung von Kunststoffteilen arbeitet mit mindestens drei Messungen bei jedem Schichtaufbau. (Vgl. Hartmann/Hausotte/Drummer/Wudy, RTJournal – Forum für Rapid Technologie, 2012.)

<sup>58</sup> VDI 3405, Bl. 1, S. 11.

<sup>59</sup> Vgl. VDI 3405, Bl. 1, S. 12.

<sup>60</sup> Gekürzt übernommen aus Blohm/Beer/Seidenberg/Silber, Produktionswirtschaft, 5. Auflage 2016, S. 228 f.

<sup>61</sup> Vgl. etwa Schmitt/Pfeifer, Qualitätsmanagement, 5. Auflage 2015, S. 222 ff.

den Stichproben entnommen. Die Einzelwerte des zu prüfenden Qualitätsmerkmals werden direkt oder in weiter verarbeiteter Form (z.B. als Mittelwert, Median usw.) in ein spezielles Formblatt (die Regelkarte) eingetragen oder – bei automatischer Messung und IT-gestützter Messdatenverarbeitung – auf einem Bildschirm dargestellt. In der Qualitätsregelkarte sind in einem definierten Abstand (i.d.R. das Zweifache der Standardabweichung) vom Mittel- bzw. Sollwert eine untere und obere Warngrenze und in größerem Abstand (i.d.R. das Dreifache der Standardabweichung) eine untere und obere Eingriffsgrenze eingezeichnet. Bezüglich der Lage der Messwerte sind drei Fälle zu unterscheiden:

1. Streuen die Messwerte zufallsbedingt innerhalb der Warngrenzen, so befindet sich der „Prozess unter statistischer Kontrolle“, und es besteht kein Handlungsbedarf („grüner Bereich“).
2. Werte zwischen den Warn- und Eingriffsgrenzen überschreiten die Toleranz zwar noch nicht, jedoch ist erhöhte Aufmerksamkeit geboten („gelber Bereich“). Je nach Tendenz in der Entwicklung der Werte kann ein korrigierender Eingriff zweckmäßig sein.
3. Parameterwerte jenseits der Eingriffsgrenze signalisieren, dass die Produktion nicht mehr „unter statistischer Kontrolle“ und daher sofortiges Handeln erforderlich ist („roter Bereich“).

Folgende Kenngrößen, die wichtige Prozesszustände und -bedingungen abbilden, 56 kommen für die kontinuierliche Überwachung jeder Materialschicht in Betracht:<sup>62</sup>

- Prozesstemperaturen
  - Temperaturverteilung auf der Baufeldoberfläche
  - Temperaturverteilung am Baubehälter
  - Temperatur der Vorratsbehälter
  - Temperaturen wichtiger elektrischer Elemente
- Umgebungsbedingungen
  - Raumtemperatur
  - Luftfeuchtigkeit
  - Inertisierung der Prozesskammer/Restsauerstoffgehalt
- Laserleistung
  - Optische Laserleistung kontinuierlich während der Bearbeitung (Soll-/Ist-Vergleich)
  - Positionierung des Laserfokus im Baufeld (bei Mehrkopfanlagen)
  - Scangeschwindigkeit
  - Scanabstand
- Prozesszeiten
  - Vorwärmzeit der Anlage
  - Auftragszeit der Schicht
  - Vorheizzeit der Schicht
  - Bearbeitungszeit der Schicht mit dem Laser
  - Abkühlzeit der Bauteile
  - Datum/Uhrzeit
- Qualitäts- und Funktionskontrolle
  - Qualität des Schichtauftrags
  - Schichtdicke (Achsenkontrolle in x, y, z)
  - Qualität der digitalen Daten zur Schichterstellung (vor Job)
  - Schmelzbild (thermisch oder optisch mittels Kamerasystem)

Welche Kenngrößen einbezogen werden sollen, ist situationsspezifisch festzulegen 57 und hängt von der geforderten und realisierbaren Reproduzierbarkeit des Prozesses und der Produkteigenschaften ab.<sup>63</sup>

<sup>62</sup> VDI 3405, Bl. 1, S. 13.

<sup>63</sup> Vgl. VDI 3405, S. 35.

- 58 Unter der Bezeichnung EOSTATE MeltPool Monitoring bietet die EOS GmbH, München, eine automatisierte Echtzeit-Prozessüberwachung und -analyse für das Direkte Metall-Laser-Sintern (DMLS) an.<sup>64</sup> Während des Bauprozesses – pro Schmelzpunkt, pro Schicht und pro Bauteil – überwacht das Online-Monitoring-Tool das Schmelzbad, indem die Lichtemissionen des Schmelzbades mithilfe von Sensoren erfasst und softwaremäßig ausgewertet werden. Die Software bietet u.a. eine Prozess-Visualisierung und -Bewertung in Echtzeit, die Darstellung von Daten in 2D- oder 3D-Abbildungen und ermöglicht die Analyse von Auffälligkeiten. Auf diese Weise lassen sich Rückschlüsse auf die Bauteil-Qualität ziehen. Hierfür können entsprechende Parameter frei vorgeben werden. EOSTATE MeltPool ermöglicht darüber hinaus eine vollständige Rückverfolgbarkeit der Bauteile.
- 59 Auf der Makroebene der Prozesse ergeben sich infolge der technologischen Besonderheiten der additiven Fertigung Veränderungen der Wertschöpfungskette, die für das QM sowohl Chancen als auch Herausforderungen beinhalten können. Die Supply Chain verkürzt sich gegenüber herkömmlichen Fertigungskonzepten, weil die Handelsstufe entfällt oder der Endverbraucher sein Produkt sogar selbst ausdrückt.<sup>65</sup> Print-on-Demand-Lösungen, etwa für Ersatzteile, machen Fertigungswarenlager überflüssig. Mit den entfallenden Aktivitäten nimmt die Komplexität der Wertschöpfungskette ab und das QM vereinfacht sich tendenziell. Andererseits verlagert sich der Herstellungsprozess in Richtung Ende der Wertschöpfungskette an den Point of Sale oder direkt zum Endverbraucher. Dies führt zu einer Dezentralisierung der Herstellung, was das QM vor neue Herausforderungen stellt: An allen Produktionsorten sind die für eine hohe Ausführungsqualität erforderlichen Bedingungen hinsichtlich der Potenziale (Maschinenzustand und Personalqualifikation) und Prozesse (einschließlich Umfeldfaktoren) zu schaffen und aufrechtzuerhalten. Das setzt reproduzierbare und standardisierte Prozesse voraus, die einen hohen technologischen Reifegrad aufweisen müssen. Davon sind aber die additiven Verfahren zum Teil noch weit entfernt.<sup>66</sup> Mit der Dezentralisation einhergehend werden sich die Wertschöpfungsketten auch insofern ändern, als zunehmend Daten statt Materialien transportiert werden.<sup>67</sup> Aspekten wie Datensicherheit, -integrität etc. kommt damit eine steigende Bedeutung zu.
- 60 Denkbar ist, dass Produzenten am Ort des Abnehmers Anlagen für die additive Fertigung aufstellen und unterhalten und die Abnehmer bei Bedarf selbst produzieren, ähnlich der rechtlichen und wirtschaftlichen Situation bei einem Konsignationslager.<sup>68</sup> Dieser Fall und der der Produktion durch den Endverbraucher implizieren ein hohes Maß an Kundenintegration<sup>69</sup>, die stets besondere QM-Probleme mit sich

<sup>64</sup> Vgl. zum Folgenden EOS GmbH: EOSTATE MeltPool Monitoring – Automatisierte, intelligente Echtzeit-Prozessüberwachung für das Direkte Metall-Laser-Sintern (DMLS), <https://www.eos.info/de/software/eostate-meltpool-monitoring> (4.3.2017).

<sup>65</sup> Vgl. Leupold/Glossner, 3D-Druck, Additive Fertigung und Rapid Manufacturing, 2016, S. 47.

<sup>66</sup> Vgl. Wegner/Witt, RTejournal – Forum für Rapid Technologie, 2013.

<sup>67</sup> Vgl. Leupold/Glossner, 3D-Druck, Additive Fertigung und Rapid Manufacturing, 2016, S. 47.

<sup>68</sup> Beim Konsignationslager handelt es sich um ein Lager, das der Lieferant in räumlicher Nähe des Abnehmers unterhält und aus dem dieser Ware nach Bedarf entnehmen kann. Der Eigentumsübergang erfolgt zum Zeitpunkt der Entnahme. (Vgl. beispielsweise Pfohl, Logistiksysteme, 8. Auflage 2010, S. 177.)

<sup>69</sup> Mit Kundenintegration wird der Sachverhalt bezeichnet, dass der Kunde an der Leistungserstellung mitwirkt, sodass Nachfrager und Anbieter eine Leistung kooperativ erstellen. (Vgl. beispielsweise Blohm/Beer/Seidenberg/Silber, Produktionswirtschaft, 5. Auflage 2016, S. 36 f.)

bringt. So hängt die Qualität der integrativ zu erbringenden Leistung mehr oder minder vom Abnehmer ab, ohne dass der Anbieter die Kontrolle über die abnehmerseitigen Einflussfaktoren hat.

3. **Produktbezogene Modelle und Methoden.** Zur Darstellung des am Produkt ansetzenden QM wird im Folgenden auf die Unterscheidung von Entwurfs- und Ausführungsqualität zurückgegriffen.

a) **Instrumente des Managements der Entwurfsqualität.** In zunehmendem Maße werden additive Fertigungsverfahren auch zur Herstellung von Produkten für den Endverbraucher eingesetzt. Damit entsteht die Notwendigkeit, die „Stimme des Kunden“ in technische Produktmerkmale zu übersetzen. Verlangt der Kunde beispielsweise eine „glatte“ Oberfläche, so ist diese Kundenanforderung im Hinblick auf die technischen Produkteigenschaften, den Bauprozess und das CAD-Programm zu interpretieren, zu konkretisieren und technisch zu operationalisieren. Die technische Umsetzung der Kundenanforderung „glatte Oberfläche“ wird etwa die Schichtstärke und das Reduzieren auf dem Bauteil anhaftender Pulverpartikel in den Blick nehmen müssen. Unterstützung hierbei bietet das Quality Function Deployment (QFD), eine Methodik, die von fachlich heterogen zusammengesetzten Projekt-Teams getragen wird.<sup>70</sup> Die Teilschritte eines vollständigen QFD-Prozesses bestehen aus:

1. Produktplanung einschließlich Identifikation der Kundenanforderungen: Festlegung der Produktmerkmale,
2. Komponentenplanung (Baugruppen, Einzelteile),
3. Prozessplanung (einschl. Prüfprozessen),
4. Produktionsplanung.

Die einzelnen Schritte sind in der Weise miteinander verknüpft, dass das Ergebnis des jeweils vorhergehenden Schritts den Input des folgenden bildet. Schritt 2 ist für additiv gefertigte Produkte nicht von Bedeutung, da sich diese nicht aus Komponenten zusammensetzen.

Das sog. House of Quality (vgl. Abb. 8) ist das zentrale Arbeits- und Beschreibungsmittel der Methodik.

Der Ablauf des QFD-Prozesses innerhalb des Teilschrittes 1 (s.o. Produktplanung) sei anhand von Abb. 8 skizziert; die im Folgenden verwendete Nummerierung bezieht sich ebenfalls auf Abb. 8. (1) Zunächst werden die Kundenanforderungen erhoben und aufgelistet und (2) sodann gewichtet. (3) Die Kundenanforderungen (Zwecke) müssen in technische Qualitätsmerkmale (Mittel) überführt werden. (4) In der Korrelationsmatrix ist die Intensität (z.B. in den Ausprägungen „stark“, „mittel“, „schwach“) der wechselseitigen Beziehungen zwischen den Kundenanforderungen und den technischen Qualitätsmerkmalen abzubilden. (5) Ein Vergleich des eigenen Produkts mit Wettbewerberprodukten erfolgt aus Kundensicht. (6) Für jedes technische Qualitätsmerkmal wird eine Zielgröße angegeben, deren Ausprägung objektiv bestimmbar ist (z.B. Schichtdicke in mm). (7) Die Beziehungsmatrix dient dazu, die wechselseitigen Beziehungen zwischen den Qualitätsmerkmalen offen zu legen. Wie sich die Verbesserung von Merkmal A auf Merkmal B auswirkt, d.h. welche Zielbeziehungen zwischen den Merkmalen bestehen, wird etwa durch die Kategorien

<sup>70</sup> Vgl. zum Folgenden die Darstellungen bei Boutellier/Biedermann, in: Pfeifer/Schmitt/Masing (Hrsg.), Handbuch Qualitätsmanagement, 6. Auflage 2014, S. 444 ff.; Kamiske/Brauer, Qualitätsmanagement von A bis Z, 7. Auflage 2011, S. 241 ff.; Schmitt/Pfeifer, Qualitätsmanagement, 5. Auflage 2015, S. 585 ff. und Zollondz, Grundlagen Qualitätsmanagement, 3. Auflage 2011, S. 135 ff.

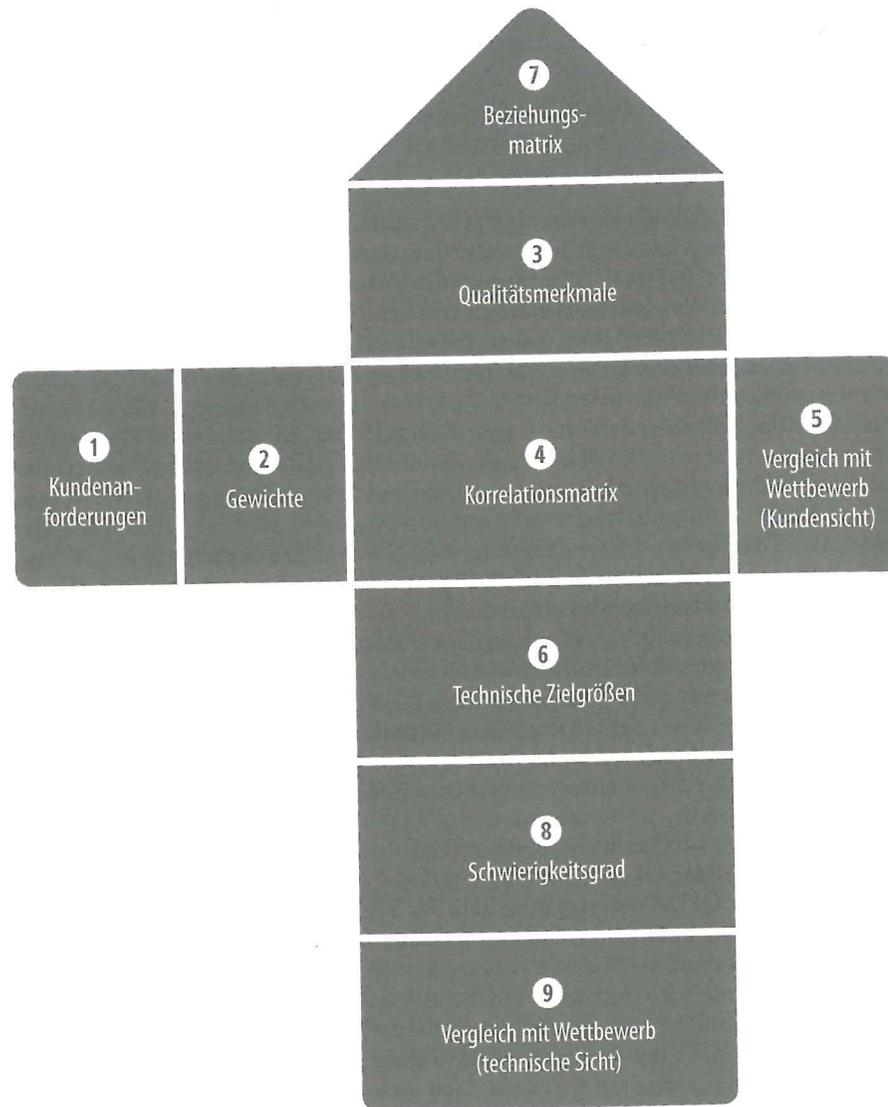


Abbildung 8: Schema des House of Quality.

„stark positiv“, „positiv“, „neutral“, „negativ“ und „stark negativ“ abgebildet. (8) Der Schwierigkeitsgrad der technischen Umsetzung wird beurteilt. (9) Schließlich enthält das House of Quality einen Vergleich mit Wettbewerbsprodukten aus technischer Sicht.

66 Mit der Anwendung von QFD werden folgende **Vorzüge** verbunden:

- Verbesserung der Entwurfsqualität durch
  - explizite Berücksichtigung der Kundenerwartungen
  - rechtzeitiges Aufdecken von Under- und Overengineering

Seidenberg/Ansari

- den Vergleich mit Produkten des Wettbewerbs
- die Auseinandersetzung mit unterschiedlichen Sichtweisen der Mitglieder im QFD-Team
- Positiver Einfluss auf die Ausführungsqualität durch Schaffen von Transparenz sowie Präzisierung hinsichtlich der Prozessanforderungen
- Frühzeitiges Erkennen von Änderungsnotwendigkeiten im Produktentwurf, daraus resultierend Kosteneinsparung entsprechend der sog. Zehnerregel<sup>71</sup>
- Vermeidung von Schnittstellenproblemen durch funktionsübergreifende Teamorganisation
- Größere Transparenz im Produktentwicklungsprozess

Diesen Vorteilen steht an Nachteilen der hohe Aufwand durch die Anwendung von QFD im Produktentwicklungsprozess gegenüber. Darüber hinaus lassen sich Erfolge erst mit verhältnismäßig großer Zeitverzögerung nachweisen. Die Gefahr des Scheiterns besteht insbesondere bei zu formalistischem, nicht an die spezifischen Gegebenheiten des Unternehmens angepasstem Einsatz. 67

Da Produkte aus additiven Fertigungsverfahren häufig in sicherheitskritischen Bereichen (Luft- und Raumfahrt, Medizin etc.) eingesetzt werden und infolge kleiner Stückzahlen und innovativer Technologien langjährige Erfahrungswerte hinsichtlich der Produktverwendung fehlen, kommt einer frühzeitigen, d.h. bereits in der Entwicklungsphase durchzuführenden, Abschätzung der mit dem Produkt potenziell verbundenen Qualitäts- und Sicherheitsrisiken eine große Bedeutung zu. Eine formalisierte Methode mit dem Ziel, mögliche Fehler sowie deren Wahrscheinlichkeiten und Folgen bereits im Entwicklungsprozess von Produkten und Verfahren zu erfassen und geeignete Maßnahmen zur Fehlervermeidung zu ergreifen, stellt die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse<sup>72</sup> (FMEA) dar.<sup>73</sup> Die Arbeit wird wie beim QFD in interdisziplinären Teams unter Anleitung durch einen erfahrenen Moderator durchgeführt. 68

Unterschieden werden die Produkt- und die Prozess-FMEA. Erstere dient dazu, potenzielle Fehler des Produktentwurfs zu identifizieren, deren Ursachen festzustellen und mögliche Fehlerfolgen aufzuzeigen. „Diese werden hinsichtlich ihrer Schwere bewertet, und es werden geeignete Abstellmaßnahmen abgeleitet.“<sup>74</sup> Die Prozess-FMEA stellt eine Fortsetzung der Fehlermöglichkeitsanalyse in Bezug auf den weiteren Verlauf des Produkterstellungsprozesses dar. Ziel ist, sicherzustellen, dass der Produktentwurf durch den Herstellungsprozess realisiert werden kann. Es ist zu prüfen, ob die vorgesehenen Prozessparameter geeignet sind, den Produktentwurf fehlerfrei und reproduzierbar umzusetzen. 69

Vereinfacht dargestellt erfolgt der **Ablauf** einer FMEA in folgenden Schritten: 70

1. Auswahl des Untersuchungsobjekts (Priorisierung hinsichtlich des Schadenspotenzials) und organisatorische Vorbereitung: Bestimmung des Verantwortlichen, Festlegung der Teamzusammensetzung, Aufstellen eines Terminplans

<sup>71</sup> Die Zehnerregel sagt aus, „dass ein Fehler mit jeder Phase, in der er später in Bezug auf seinen Entstehungszeitpunkt entdeckt und beseitigt wird, in seinen Kosten verursachenden Auswirkungen um den Faktor 10 zunimmt.“ (Schmitt/Pfeifer, Qualitätsmanagement, 5. Auflage 2015, S. 3)

<sup>72</sup> Bezeichnung nach DIN EN 60812: „Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse“.

<sup>73</sup> Vgl. zum Folgenden die Darstellungen der DIN EN 60812, bei Kamiske/Brauer, Qualitätsmanagement von A bis Z, 7. Auflage 2011, S. 64 ff. und Schmitt/Pfeifer, Qualitätsmanagement, 5. Auflage 2015, S. 559 ff.

<sup>74</sup> Schmitt/Pfeifer, Qualitätsmanagement, 5. Auflage 2015, S. 560.

Seidenberg/Ansari

2. Beschreibung und Strukturierung des Untersuchungsobjekts unter Beachtung eines problemadäquaten Detaillierungsgrades
3. Durchführung der Risikoanalyse:
- Erfassen der potenziellen Fehler
  - Erfassen und Bewerten der potenziellen Fehlerfolgen
  - Erfassen und Bewerten der potenziellen Fehlerursachen
  - Ermitteln der Risikoprioritätszahl  $RPZ = A \cdot B \cdot E$  mit A als Risikozahl für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Fehlers, B als Risikozahl für die Bedeutung des Fehlers (Auswirkungen auf den Kunden) und E als Risikozahl für die Entdeckung des Fehlers vor Auslieferung an den Kunden,  $1 \leq A \leq 10$ ,  $1 \leq B \leq 10$ ,  $1 \leq E \leq 10$ , d.h.  $1 \leq RPZ \leq 1.000$ , Nutzung eines speziellen Formulars
4. Auswertung der Analyseergebnisse, Bestimmung, Bewertung und Festlegung von Maßnahmen zur Risikoreduzierung
- 71 Folgende **positive Wirkungen** der FMEA können erwartet werden:<sup>75</sup>
- Verbesserung der Entwurfsqualität und damit Erhöhung der Kundenzufriedenheit durch
    - das Identifizieren kritischer Komponenten und potenzieller Schwachstellen von Produkt und Prozess
    - das frühzeitige Erkennen und Lokalisieren möglicher Fehler
  - Abschätzen und Quantifizieren von Risiken
  - Arbeit im Team und Dokumentation der FMEA-Ergebnisse, dadurch Anwendung und Weitergabe von Know-how
  - Verkürzung der Entwicklungszeiten, Senkung der Entwicklungs- sowie der Fehler(folge)kosten (s. Zehnerregel, Fn. 71)
  - Verringerung der Zahl der Änderungen nach Produktionsstart (s. Zehnerregel, Fn. 72)
- 72 Mit der Anwendung der FMEA können jedoch auch **Hindernisse und Probleme** verbunden sein:
- Erheblicher Aufwand; Gründe:
    - Bereichsübergreifendes Arbeiten mit hohem Koordinationsbedarf,
    - Notwendigkeit der ständigen Fortschreibung der FMEA-Ergebnisse.
  - Schwierigkeit bei der Festlegung des optimalen Zeitpunkts für die Durchführung: Trade-off zwischen möglichst frühem Beginn (s. Zehnerregel) und Beginn erst dann, wenn das Ergebnis der Planung sich soweit stabilisiert, dass die FMEA nicht ständig aktualisiert werden müssen.
  - Subjektivität der Risikozahlen und damit der RPZ.
  - Multiplikative Verknüpfung der Risikozahlen, d.h. große Veränderungen der RPZ aufgrund kleiner Variationen der Risikozahlen.
  - Gefahr, dass die Formularverwendung zu bürokratischer Routine erstarrt.
- 73 Im Konstruktionsprozess sind ferner die verfahrenstypischen Besonderheiten der additiven Fertigung zu berücksichtigen. Entsprechende Hinweise für das Laser-Sintern von Kunststoffen und das Laser-Strahlschmelzen von Metallen gibt die VDI-Richtlinie 3405, Bl. 3.
- 74 **b) Instrumente des Managements der Ausführungsqualität.** Trotz aller vorbereitenden QM-Maßnahmen auf den Ebenen Potenziale, Prozesse und Produktentwurf

<sup>75</sup> Vgl. Kamiske/Brauer, Qualitätsmanagement, 5. Auflage 2015, S. 65.

lässt sich letztlich erst am hergestellten Produkt dessen Konformität mit den Anforderungen prüfen. „Üblich sind dabei je nach Anwendung und Art des Bauteils geometrische Prüfungen von Maß-, Form- und Lagetoleranzen (z.B. taktile Messung) und Werkstoffprüfungen (Härte, Festigkeit etc.).“<sup>76</sup> Falls die Stückzahl ausreichend groß ist, kommt die oben dargestellte Stichprobenprüfung infrage.<sup>77</sup> Für durch Laser-Sintern hergestellte Kunststoffteile wird zur Anwendung der Stichprobenprüfung vorgeschlagen, eine Risikoziffer in Anlehnung an die bei der FMEA verwendete Risikoprioritätszahl (s.o.) zu bilden.<sup>78</sup> Um den Prüfaufwand beim Hersteller wie beim Abnehmer kalkulierbar zu machen, ist der Prüfumfang „im Vorfeld der Herstellung im Lastenheft oder in der Liefervereinbarung zu definieren.“<sup>79</sup>

Detaillierte Hinweise zu Prüfparametern und -verfahren für durch Strahlschmelzen metallischer Werkstoffe hergestellte Produkte liefert die VDI-Richtlinie 3405, Bl. 2. In diesem Bereich spielen metallografische Prüfverfahren zur Bestimmung der Korngröße und des Gehalts nicht-metallischer Einschlüsse eine Rolle, des Weiteren die Bestimmung der Dichte sowie die Ermittlung statischer mechanischer Eigenschaften durch Zugversuch, Härteprüfung und Biegeversuch sowie dynamischer Eigenschaften durch Dauerschwing-, Umlaufbiege- und Kerbschlagbiegeversuche. Von Interesse sind darüber hinaus die Oberflächenrauheit sowie die Maßhaltigkeit, Form- und Lagegenauigkeit. 75

## B. Identifizierung und Klassifizierung qualitätskritischer Aspekte der additiven Fertigung

### I. Spezifische technologische und nicht-technologische Herausforderungen der additiven Fertigung mit Auswirkungen auf die Qualität (Literaturüberblick)

Um die entscheidenden QM-Aspekte der additiven Fertigung zu identifizieren, ist es wichtig, den neuesten Stand der Technik in der additiven Fertigung zu untersuchen. Insbesondere kann ein Einblick in die aktuelle Literatur dazu das Verständnis für die qualitätsrelevanten Aspekte auf strategischer, taktischer und operativer Ebene vertiefen. 76

Bereits im Wohlers-Bericht zum Stand der Technik in 3D-Druck und additiver Fertigung aus dem Jahr 2009 wurden Qualität und Zuverlässigkeit als die „Achillesferse der additiven Fertigung“ beschrieben, was den Einsatz für qualitativ anspruchsvolle Bereiche wie Biomedizin, Lebensmittel, Sport und Raumfahrt beschränkt.<sup>80</sup> Eine ähnliche Sichtweise wurde von einer Reihe von Autoren geäußert, die entweder auf das Fehlen allgemeiner Qualitätssicherungsstandards für Technologien der additiven Fertigung hinwiesen<sup>81, 82</sup> oder sich für die Etablierung von weitgehend etablierten 77

<sup>76</sup> VDI 3405, S. 36.

<sup>77</sup> Vgl. VDI 3405, S. 36, VDI 3405, Bl. 1, S. 20 ff.

<sup>78</sup> Vgl. VDI 3405, Bl. 1, S. 22 f.

<sup>79</sup> VDI 3405, S. 36.

<sup>80</sup> Vgl. Wohlers, Report on 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report, Wohlers Associates, 2009, S. 1.

<sup>81</sup> Vgl. Weller/Kleer/Piller, Economic implications of 3D printing: market structure models in light of additive manufacturing revisited, International Journal of Production Economics, Vol. 164, 2015, S. 43.

<sup>82</sup> Vgl. Berman, 3-D printing: The new industrial revolution, Business horizons, Vol. 55, Issue: 2, 2012, S. 155.

und kostenoptimierten Qualitätssicherungssystemen und -standards aussprachen, z.B. für die Qualitätssicherung bei selektivem Lasersintern (SLS)<sup>83</sup> oder laser- und pulverbettbasierten Technologien der additiven Fertigung<sup>84</sup>. Außerdem untersuchten Mawale et al. die State-of-the-art-Anwendungen in der Produktinnovation und betonen, dass die Überwachung und Sicherung der Prozesse/Prozessqualität als integraler Bestandteil der additiven Fertigung berücksichtigt werden sollten.<sup>85</sup>

- 78 Vayre et al. untersuchten additive Fertigung mit metallischen Werkstoffen wie z.B. Lasersintern, direktes Metall-Lasersintern, SLS, Elektronenstrahlschmelzen und Direct Metal Deposition.<sup>86</sup> Sie überprüften die Leistung dieser Prozesse insbesondere durch die Einführung von drei Qualitätskriterien: 1. Oberflächenqualität, 2. Maßhaltigkeit und 3. Materialeigenschaften und mechanische Eigenschaften. Obwohl sie Qualität, Kosten, Zeit und Umgebungsparameter zur Untersuchung der Leistung der obenstehenden Prozesse herangezogen und diese für fünf Hersteller spezifiziert haben, konnten sie die Parameter nicht in einem weitgehend akzeptierten Qualitätssicherungssystem kombinieren.<sup>87</sup> Außerdem überprüften Wong und Hernandez additive Fertigungsprozesse mit Flüssigkeiten, Feststoffen und Pulvern, und kamen zu dem Schluss, dass für eine Standardisierung der additiven Fertigung in der Fertigungsindustrie das Handling jedes üblicherweise verwendeten Materials zu untersuchen ist, um die Fertigungsgenauigkeit zu verbessern, sodass die Notwendigkeit eines Nachbearbeitungsprozesses entfällt und das höchste Level an Präzision für die Herstellung von Teilen erreicht wird.<sup>88</sup> Um Probleme mit Genauigkeit und Präzision zu beseitigen, machen Vaezi et al. den Vorschlag, mikro-additive 3D-Fertigungstechnologien zu verwenden, die in drei Gruppen gegliedert werden: 1. anpassbare additive Fertigung (z.B. Stereolithografieprozess, SLS-Prozess, dreidimensionaler Druckprozess, Tintenstrahldruckprozesse, Schmelzschichtung und Extrusionsmethoden sowie Laminated Object Manufacturing), 2. 3D-Direct-Writing (z.B. durch chemische Gasphasenabscheidung und mit fokussiertem Ionenstrahl) und 3. Hybridprozesse (z.B. elektrochemischer Herstellungsprozess).<sup>89</sup>

- 79 Guo und Leu überprüfen die Funktionsprinzipien von verschiedenen additiven Fertigungsprozessen im Hinblick auf vier weitgefaste Kategorien: 1. Flüssigkeiten, 2. Filamente/Pasten, 3. Pulver und 4. feste Unterlagen und klassifizieren vier Arten von Materialien, nämlich Polymere, Metalle, Keramik und Verbundstoffe.<sup>90</sup>

<sup>83</sup> Vgl. Schmid/Levy, Quality Management and Estimation of Quality Costs for Additive Manufacturing with SLS, Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference 2012, ETH Zürich 2014, S. 1.

<sup>84</sup> Vgl. Berumen/Bechmann/Lindner/Kruth/Craeghs, Quality control of laser- and powder bed-based Additive Manufacturing (AM) technologies, Laser Assisted Net Shape Engineering 6, Proceedings of the LANE 2010, Part 2, Physics Procedia, Elsevier, Vol. 5, Part B, 2010, S. 617.

<sup>85</sup> Vgl. Mawale/Kuthe/Dahake, Additive layered manufacturing: State-of-the-art applications in product innovation, Concurrent Engineering: Research and Applications, 2016, S. 1.

<sup>86</sup> Vgl. Vayre/Vignat/Villeneuve, Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects, Mechanics & Industry, Vol. 13, No. 2, 2012, S. 8.

<sup>87</sup> Vgl. Vayre/Vignat/Villeneuve, Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects, Mechanics & Industry, Vol. 13, No. 2, 2012, S. 9.

<sup>88</sup> Vgl. Wong/Hernandez, A review of additive manufacturing, ISRN Mechanical Engineering 2012, S. 1.

<sup>89</sup> Vgl. Vaezi/Seitz/Yang, A review on 3D micro-additive manufacturing technologies, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 67, Issue: 5, Springer 2013, S. 1723.

<sup>90</sup> Vgl. Guo/Leu, Additive manufacturing: technology, applications and research needs, Frontiers of Mechanical Engineering, Vol. 8, No. 3, Springer 2013, S. 215.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse untersuchen sie die Anwendung von additiven Fertigungsprozessen in der Raumfahrt, Automobilindustrie, Biomedizin und Energiebranche<sup>91</sup>. Schließlich betonen sie, dass die additive Fertigungstechnologie noch immer als Nischentechnologie gilt, die nur für einen kleinen Teil des Technologiemarkts ausgelegt sei. Sie betonen daher den Bedarf an weiterer Forschung und Entwicklung „hinsichtlich Design, Material, neuartige Verfahren und Maschinen, Prozessmodellierung und -steuerung“<sup>92</sup>. Damit bestimmen Gao et al. die folgenden vier Forschungsbereiche in Bezug auf ein effizientes Design der additiven Fertigung.<sup>93</sup>

1. Geometrisches Design für die additive Fertigung
  - a) Mehrfachdarstellungen von 3D-Modellen
  - b) Geometrische Verarbeitung für die additive Fertigung
  - c) Überprüfung, Reparatur und Verbesserung
  - d) Hochleistungsrechnen (HPC) für die additive Fertigung
  - e) Optimierung für Spezialeffekte
2. Materialdesign für die additive Fertigung
  - a) Synthetische heterogene Materialien mit kontrollierter Struktur
  - b) Technische Materialeigenschaften über kombinatorische Materialverteilung
  - c) Design von Hochleistungs-Strukturmaterialien
  - d) Selbstmontage und programmierbares Material
  - e) Design biologischer und biomimetischer Verbundstoffe
3. Computergestützte Werkzeuge und Schnittstellenentwicklung
  - a) Natural User Interface (NUI) gestützte Formgebung
  - b) Optisches 3D-Scannen
  - c) Plattform für Co-Design und -Erstellung
4. Fertigungswerkzeuge und Prozessentwicklung
  - a) Open-Source-Hardware und -Drucker
  - b) Prozesssimulation und -optimierung für die additive Fertigung
  - c) Berücksichtigung ökologischer Nachhaltigkeit in der additiven Fertigung

Die oben genannten Forschungsgebiete beeinflussen die Einrichtung eines QM 80 für die additive Fertigung hinsichtlich potenzial-, prozess- und produktbezogener qualitätsrelevanter Aspekte, die später erläutert werden (vgl. Tab. 4). Außerdem regen Bikas et al. an, additive Fertigungsprozesse durch die Verwendung von „exakten, verifizierten Modellen, gestützt durch den Einsatz maschinenintegrierter Überwachungssysteme,“ zu verbessern, „um die Modelle mit realen, gemessenen Daten fundieren zu können.“<sup>94</sup> Diese Aussage wird auch von Lewandowski und Seifi getroffen.<sup>95</sup> Zu diesem Zweck argumentieren Guessasma et al., dass eine „Topologie-Optimierung die Besonderheiten der additiven Fertigung bewältigen

<sup>91</sup> Vgl. Guo/Leu, Additive manufacturing: technology, applications and research needs, Frontiers of Mechanical Engineering, Vol. 8, No. 3, Springer 2013, S. 215.

<sup>92</sup> Guo/Leu, Additive manufacturing: technology, applications and research needs, Frontiers of Mechanical Engineering, Vol. 8, No. 3, Springer 2013, S. 237 f.

<sup>93</sup> Vgl. Gao et al., The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering, Computer-Aided Design, Vol. 69, Elsevier, 2015, S. 65 f.

<sup>94</sup> Bikas/Stavropoulos/Chryssolouris, Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 83, Issue: 1, Springer 2016, S. 402.

<sup>95</sup> Vgl. Lewandowski/Seifi, Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties, Annual Review of Materials Research, Vol. 46, Issue: 1, 2016, S. 151 f.

muss.<sup>96</sup> Da dieser Prozess ein komplexes Netzwerk von 3D-Fehlern generiert, müssen numerische Modelle die Fehlerwirkung als implizite Leistungsstörung oder expliziten Fehlereinfluss integrieren.<sup>97</sup> In diesem Zusammenhang schlagen sie ein modifiziertes Schema mit einer fehlersensiblen Topologie-Optimierung der additiven Fertigung vor.<sup>98</sup> Das modifizierte Schema kombiniert, in erster Linie während der Design- und Herstellungsphasen, physikalische Restriktionen (z.B. Steifigkeit, Festigkeit), topologische Restriktionen (z.B. Dichte und Konnektivität), CAD-Modelle (z.B. Schlüsselpunkte) und numerische Modelle (z.B. finite Elemente).<sup>99</sup> Durch experimentelle Erprobung werden geometrische Defekte (auf der Mikro- und Makroebene, im fertigen Zustand) und Leistungsdiskrepanzen (z.B. fehlergelenktes Verhalten) gesammelt und zurückgemeldet, damit diese mit den obengenannten Restriktionen und Modellen verglichen werden können.<sup>100</sup> Der gesamte integrierte und repetitive Ansatz unterstützt eine ordnungsgemäße Validierung und führt letztlich zu einer Optimierung des Designs.<sup>101</sup> Der Einsatz eines solchen Modells könnte für die additiven Metall-Fertigungsprozesse von bedeutendem Vorteil sein, insbesondere für laserbasierte Prozesse und die Elektronenstrahlfertigung hinsichtlich Wärmefeld, Formstabilität und Eigenspannung, was „die Qualität und Sicherheit des Endprodukts wesentlich beeinflusst.“<sup>102</sup>

81 Neben Polymeren, Metallen, Keramik und Verbundstoffen können in der additiven Fertigung auch smarte („intelligente“) Materialien<sup>103</sup> verwendet werden.<sup>104</sup> So können „Komponenten aus der additiven Fertigung ihre Form oder Eigenschaften als Reaktion auf äußere Reize im Laufe der Zeit ändern.“<sup>105</sup> Der intelligente Ansatz kann hier also den dreidimensionalen Druck durch eine neue, vierte Dimension ergänzen, d.h. die strukturelle Neugestaltung im Laufe der Zeit.<sup>106</sup>

<sup>96</sup> *Guessasma et al.*, Challenges of additive manufacturing technologies from an optimisation perspective, *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, Vol. 6, 2015, S. 6.

<sup>97</sup> Vgl. *Guessasma et al.*, Challenges of additive manufacturing technologies from an optimisation perspective, *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, Vol. 6, 2015, S. 6.

<sup>98</sup> Vgl. *Guessasma et al.*, Challenges of additive manufacturing technologies from an optimisation perspective, *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, Vol. 6, 2015, S. 6 f.

<sup>99</sup> Vgl. *Guessasma et al.*, Challenges of additive manufacturing technologies from an optimisation perspective, *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, Vol. 6, 2015, S. 6 f.

<sup>100</sup> Vgl. *Guessasma et al.*, Challenges of additive manufacturing technologies from an optimisation perspective, *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, Vol. 6, 2015, S. 6 f.

<sup>101</sup> Vgl. *Guessasma et al.*, Challenges of additive manufacturing technologies from an optimisation perspective, *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, Vol. 6, 2015, S. 1.

<sup>102</sup> *Bikas/Stavropoulos/Chryssolouris*, Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, Issue: 1, Springer 2016, S. 402.

<sup>103</sup> Vgl. *Höcker* (Hrsg.), *Werkstoffe als Motor für Innovationen*, acatech, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2008, S. 1 f.

<sup>104</sup> Vgl. *Khoo et al.*, 3D Printing of Smart Materials: A Review on Recent Progresses in 4D Printing, *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 10, Issue: 3, Taylor & Francis 2015, S. 103.

<sup>105</sup> *Khoo et al.*, 3D Printing of Smart Materials: A Review on Recent Progresses in 4D Printing, *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 10, Issue: 3, Taylor & Francis 2015, S. 103.

<sup>106</sup> Vgl. *Khoo et al.*, 3D Printing of Smart Materials: A Review on Recent Progresses in 4D Printing, *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 10, Issue: 3, Taylor & Francis 2015, S. 103.

Frazier, der sich den Herausforderungen der additiven Fertigung aus einer nicht-technologischen Perspektive, insbesondere der Wirtschaftlichkeit im Produktlebenszyklus, nähert, erwartet den wirtschaftlichen Erfolg der additiven Metallfertigung bei „kleinen Produktionslosen, bei denen die höheren Kosten für spezifische Rohstoffe der additiven Fertigung durch eine Verminderung der Fixkosten der konventionellen Fertigung ausgeglichen werden.“<sup>107</sup> Er weist außerdem darauf hin, dass „Geschwindigkeit, Vielseitigkeit und Anpassungsfähigkeit der additiven Fertigung“<sup>108</sup> den Anforderungen der Just-in-Time-Fertigung entsprechen. Frazier betont dennoch, dass „die Wirtschaftlichkeit bei der Fertigung von Teilen mittels additiver Fertigung in größeren Produktionslosen stark von der Reduktion der laufenden Kosten, d.h. der Kosten der Ausgangsmaterialien, die in der additiven Fertigung verwendet werden, abhängt“<sup>109</sup> Baumers et al. entwerfen „ein Modell der Produktionskosten für zwei verschiedene Systeme additiver Fertigung, die kommerziell für die Fertigung von Metallteilen für die Endnutzung, Elektronenstrahlschmelzen (EBM) und direktes Metall-Lasersintern (DMLS) verwendet werden.“<sup>110</sup> Sie zeigen verschiedene Ebenen der Systemproduktivität und kommen zu dem Schluss, dass die beobachteten Abscheidungsraten für die Verwendung von EBM und DMLS in Fertigungsanwendungen mit hohen Stückzahlen nicht ausreichen.<sup>111</sup> Vergleicht man die additive Fertigung in Bezug auf herstellerbezogene und kundenbezogene Geschäftsmodelle, wird Prozessqualität (Effizienz) unterschiedlich definiert.<sup>112</sup> Anders gesagt konzentrieren sich die früheren Geschäftsmodelle auf Effizienzmerkmale wie Prozesstransparenz, Skaleneffekte und Qualitätskontrolle, während letztere den Schwerpunkt auf niedrige Lagerkosten, Print-on-Demand und die Wiederverwendung von 3D-Modellen setzen.<sup>113</sup> Der Aspekt der Nachhaltigkeit ist für die Qualität des Produktdesigns unverzichtbar.<sup>114</sup> Laut Mani et al. „sind einige der wichtigsten Gestaltungsanforderungen, die beim Design für additive Fertigung beachtet werden müssen, unter anderem: eingeschlossene Hohlräume, Oberflächenbeschaffenheit, Festigkeit und Flexibilität sowie Maschinen- und Materialkosten.“<sup>115</sup> Außerdem vermerken Isanaka und Liou, dass additive Fertigungstechnologien bei der Schaffung „einer cyberfähigen Fertigungsumgebung durch Drucken oder Einbetten von

<sup>107</sup> *Frazier*, Metal additive manufacturing: a review, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, No. 6, 2014, S. 1926.

<sup>108</sup> *Frazier*, Metal additive manufacturing: a review, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, No. 6, 2014, S. 1926.

<sup>109</sup> *Frazier*, Metal additive manufacturing: a review, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, No. 6, 2014, S. 1926.

<sup>110</sup> *Baumers et al.*, The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 102, 2016, S. 193.

<sup>111</sup> Vgl. *Baumers et al.*, The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 102, 2016, S. 193.

<sup>112</sup> Vgl. *Bogers/Hadar/Bilberg*, Additive manufacturing for consumer-centric business models: Implications for supply chains in consumer goods manufacturing, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 102, 2016, S. 225 f.

<sup>113</sup> Vgl. *Bogers/Hadar/Bilberg*, Additive manufacturing for consumer-centric business models: Implications for supply chains in consumer goods manufacturing, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 102, 2016, S. 225 f.

<sup>114</sup> Vgl. *Diegel et al.*, Tools for Sustainable Product Design: Additive Manufacturing, *Journal of Sustainable Development*, Vol. 3, No. 3, 2010, S. 68.

<sup>115</sup> *Mani/Lyons/Gupta*, Sustainability characterization for additive manufacturing, *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 119, 2014, S. 422.

Sensoren und Stellantrieben an den entsprechenden Stellen<sup>116</sup> eine nachhaltige Qualitätskontrolle sowie eine rechtzeitige und vorausschauende Instandhaltung der Produktionsanlagen unterstützen können. Um die umweltrelevanten, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Auswirkungen, einschließlich der Vorteile und möglicher Fallstricke, beim Einsatz von additiver Fertigung zu erfassen, ist aber ein systematischer und lebenszyklusorientierter Ansatz zur Analyse der mittels additiver Fertigung hergestellten Bauteile notwendig.<sup>117</sup>

83 Mit dem Ziel, technologische und nicht-technologische Herausforderungen miteinander zu verbinden, haben Mellor et al. einen allgemeinen Rahmenplan für die Implementierung der additiven Fertigung vorgeschlagen, der aus den folgenden sechs Grundsätzen besteht:<sup>118</sup>

- I. **Strategie der additiven Fertigung:** Abstimmung zwischen Unternehmens-, Fertigungs- sowie Forschungs- und Entwicklungsstrategie;
- II. **Organisatorische Änderungen:** Unternehmensgröße, organisatorische Struktur, Erfahrung und Fähigkeiten der Mitarbeiter, Organisationskultur;
- III. **Lieferkette für die additive Fertigung:** Systemlieferant, Materiallieferant, Kunden, Standort des Herstellers
- IV. **Additive Fertigungstechnologie:** Fertigungsstandards, technologische Reife, technologische Vorteile und Zielkonflikte, unerwünschte Effekte;
- V. **Produktionssystem:** Design, Prozessplanung, Qualitätssicherung, Kostenrechnungssystem für die additive Fertigung sowie
- VI. **Externe Einflüsse:** Wettbewerbsdruck, Umweltgesetzgebung, Kundenanforderungen.

84 Mellor et al. weisen darauf hin, dass der Einsatz der additiven Fertigung zu einer erheblichen Änderung der Produktionsplanung und Qualitätssicherung führen kann, während es an Forschung auf diesen Gebieten noch mangelt.<sup>119</sup>

85 Zusammenfassend wurden in diesem Abschnitt vielfältige Attribute zur Schaffung eines für die additive Fertigung spezifischen QM-Systems aufgezeigt, und zwar aus technologischer und nicht-technologischer Sicht. In den folgenden Abschnitten werden zunächst die qualitätsrelevanten Aspekte in Verbindung mit den drei QM-Schwerpunkten, d.h. potenzial-, prozess- und produktbezogen, klassifiziert. Danach wird ein Modell – Intelligent Quality Management Process (IQMP-Modell) – für das Handling qualitätsrelevanter Aspekte in der additiven Fertigung dargestellt und schließlich wird die Entwicklung der Industrie 4.0 und das Aufkommen von cyber-physischen Produktionssystemen (CPPS) erörtert, welche das QM der additiven Fertigung durch neue Qualitätsherausforderungen in Verbindung mit den obengenannten Schwerpunkten direkt oder indirekt beeinflussen können.

<sup>116</sup> Isanaka/Liou, The Applications of Additive Manufacturing Technologies in Cyber Enabled Manufacturing Systems, Proceedings of the International Solid Freeform Fabrication Symposium 2012, S. 8.

<sup>117</sup> Vgl. Frazier, Metal additive manufacturing: a review, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 23, No. 6, 2014, S. 1917f. und Huang et al., Additive manufacturing and its societal impact: a literature review, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 67, Issue: 5, 2013, S. 1191f.

<sup>118</sup> Vgl. Mellor/Hao/Zhang, Additive manufacturing: A framework for implementation, International Journal of Production Economics, Elsevier, Vol. 149, 2014, S. 196f.

<sup>119</sup> Vgl. Mellor/Hao/Zhang, Additive manufacturing: A framework for implementation, International Journal of Production Economics, Elsevier, Vol. 149, 2014, S. 197.

## II. Klassifizierung qualitätsrelevanter Aspekte in der additiven Fertigung

Im vorhergehenden Abschnitt wurden verschiedene qualitätsrelevante Aspekte der additiven Fertigung ermittelt und zusammengefasst. Wie in Tab. 4 dargestellt, werden 15 qualitätsrelevante Aspekte, die zu Qualitätsproblemen führen, in drei Kategorien (potenzial-, prozess- und produktbezogen) klassifiziert. Die potenzialbezogenen qualitätsrelevanten Aspekte werden außerdem in vier Gruppen unterteilt:

1. QM-System als immaterielle Infrastruktur des QM,
2. Betriebsmittel, d.h. Maschinen, Werkzeuge und Ausrüstung, IT-Ausstattung usw.,
3. Personal und
4. Material, d.h. Roh- und Hilfsstoffe, Ersatzteile usw.

	Qualitätsrelevante Aspekte	Qualitätsmanagement-Schwerpunkte					
		Potenzialbezogen				Prozess- bezogen	Produkt- bezogen
		QM-System	Betriebs- mittel	Personal	Material		
1.	Dezentrale Produktion und daraus resultierende Änderungen in der Supply Chain, d.h. hinsichtlich Systemlieferant für additive Fertigung, Materiallieferanten, Kunden, Standort des Herstellers	✓	✓		✓	✓	✓
2.	Intelligente Netzwerke und Zusammenschaltungen von intelligenten Objekten und Maschinen, einschließlich intelligenter Systeme und Materialien sowie damit verbundene organisatorische Änderungen bezüglich des Managements von Erfahrungen und Fähigkeiten der Mitarbeiter, der Rolle des Personals und der Stellenbeschreibungen, der Schulungsprogramme sowie der Organisationskultur in der additiven Fertigung	✓	✓	✓	✓		
3.	Prozesssicherheit als integraler Bestandteil der Produktionssysteme der additiven Fertigung und entsprechende Sicherheitsnormen		✓			✓	
4.	Produktsicherheit als wichtiger Aspekt der Supply Chain der additiven Fertigung zur Erfüllung der technischen und rechtlichen Anforderungen sowie der Standards zur Verbrauchersicherheit	✓					✓
5.	Produktindividualisierung und -personalisierung in der additiven Fertigung mit Blick auf technologische Standards, die technologische Reife sowie die Verbrauchersicherheit und Strategien der Kundenzufriedenheit	✓	✓			✓	✓
6.	IT- und Cyber-Sicherheit, welche die Strategie, Organisation, Technologie, Supply Chain, Produktionssysteme der additiven Fertigung sowie auch externe Parteien beeinflusst und von diesen beeinflusst wird, d.h. Schutz computerbasierter Systeme vor Diebstahl oder Beschädigung der Hardware, Software oder der darauf gespeicherten Informationen sowie vor Unterbrechung oder Fehlleitung der dadurch bereitgestellten Dienste	✓	✓	✓		✓	

Beim Vergleich der Ergebnisse aus Tab. 4 mit dem Rahmenplan von Mellor et al. lässt sich feststellen, dass die 15 qualitätsrelevanten Aspekte mit den sechs Grundsätzen für die Implementierung einer additiven Fertigung verknüpft werden können. Die Klassifizierung der qualitätsrelevanten Aspekte einer additiven Fertigung, basierend auf den QM-Schwerpunkten, gibt einen detaillierten Überblick über die Ebenen der Auswirkungen und möglicher Ursachen von Qualitätsmängeln. Daraus resultiert zum einen eine Definition von Indikatoren für (Echtzeit-)Überwachungszwecke und zum anderen werden dadurch eine Ursache-Wirkungs-Analyse sowie ein Durchbruch hinsichtlich Verbesserungen auf strategischer, taktischer und operativer Ebene der additiven Fertigung unterstützt. 87

	Qualitätsrelevante Aspekte	Qualitätsmanagement-Schwerpunkte					
		Potenzialbezogen				Prozess- bezogen	Produkt- bezogen
		QM-System	Betriebs- mittel	Personal	Material		
7.	<b>Datenschutz</b> personenbezogener oder anderer sensibler Informationen, die innerhalb der Umgebung der additiven Fertigung gesammelt, gespeichert, verwendet und schließlich zerstört oder gelöscht werden und welche die Strategie, Organisation, Technologie, Supply Chain und Produktionssysteme der additiven Fertigung beeinflussen und davon beeinflusst werden sowie auch externe Parteien	✓	✓	✓		✓	
8.	<b>Datensicherheit</b> innerhalb der Umgebung der additiven Fertigung, einschließlich Organisation, Technologie, Supply Chain und Produktionssysteme der additiven Fertigung und in Verbindung mit externen Parteien hinsichtlich des Schutzes gesammelter oder produzierter Daten vor Diebstahl, Beschädigung oder Zerstörung	✓	✓			✓	
9.	<b>Hygiene</b> während der Produktion hinsichtlich der Standards und des Qualitätssicherungssystems in der additiven Fertigung, insbesondere relevant für die Lebensmittel- und Pharmaindustrie sowie Unternehmen der Medizintechnik	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10.	<b>Material- und Produktschutz</b> zum Erhalt der Qualität der Materialien und Produkte während des additiven Fertigungsprozesses und in der Supply Chain				✓	✓	✓
11.	<b>Energieeffizienz</b> hinsichtlich eines optimalen Managements des Energieverbrauchs der Maschinen und verbundenen Prozesse in der additiven Fertigung		✓			✓	
12.	<b>Umweltfreundlichkeit und -verträglichkeit</b> als Teil der Technologie, Produktionssysteme und Supply Chain der additiven Fertigung mit dem Ziel, die Nutzung der Materialien und die Fertigung der Produkte in Einklang mit den Umweltnormen zu gestalten		✓		✓	✓	✓
13.	<b>Abfallreduzierung und Recycling</b> von Material- und Produktrückständen innerhalb des Produktlebenszyklus in Zusammenhang mit der Strategie, Technologie, Supply Chain und den Produktionssystemen der additiven Fertigung sowie externen Parteien		✓		✓	✓	✓
14.	<b>Kostenmanagement</b> als integraler Bestandteil des Steuerungs- und Überwachungssystems der additiven Fertigung, welches durch die Strategien der additiven Fertigung sowie externe Einwirkungen beeinflusst wird	✓	✓	✓	✓		
15.	<b>Personalmanagement</b> als zentraler Bestandteil des Steuerungs- und Überwachungssystems der additiven Fertigung, welches durch die Strategie und Organisation der additiven Fertigung sowie externe Einwirkungen beeinflusst wird			✓			

Tabelle 4: 15 qualitätsrelevante Aspekte in der additiven Fertigung.

### C. Handhabung qualitätskritischer Aspekte der additiven Fertigung durch Anwendung eines Intelligenzigen Qualitätsmanagement-Prozesses (IQMP)

- 88 Um die QM-Grundsätze in der additiven Fertigung unter besonderer Berücksichtigung neuer Einflussfaktoren, die durch die Umwandlung der aktuellen in intelligente Fertigungssysteme hervorgerufen werden, zu implementieren, ist es äußerst wichtig, wissensbasierte Ansätze in die QM-Modelle zu integrieren.<sup>120</sup> Der IQMP ist ein generisches, iteratives und wissensbasiertes Closed-Loop-Feedback-System, bestehend aus wissensintensiven Aktivitäten zur ständigen Verbesserung und Erweiterung der Leistung eines Geschäftsprozesses, der in einer (Smart) Factory bzw. einem Unternehmen ausgeführt wird.<sup>121</sup> Der generische Rahmen des IQMP, der in Bezug auf das QM einen wissensbasierten Ansatz hat und gleichzeitig die Prinzipien des PDCA-Kreislaufs und TQM (s.o.) anwendet, ermöglicht die Anpassung und Verwendung des QM in der additiven Fertigung zur Kompensierung fehlender spezifischer QM-Modelle. Wie in Abb. 9 dargestellt, werden die wissensintensiven Tätigkeiten des IQMP in zwei Kategorien unterteilt: 1. vorbereitende Tätigkeiten (Vorab-Aktivitäten) innerhalb der Smart Factory wie Scoping (Aufgaben- und Anforderungsanalyse), Erwerb von Know-how und Bewertung, und 2. nachbereitende Tätigkeiten, z.B. Feedback-Analyse der Zielerreichung und Schlussfolgerungen. Die ordnungsgemäße Abwicklung dieser Tätigkeiten ist ein Schlüsselfaktor für die Sicherstellung der erfolgreichen Erfüllung der Soll-Qualität der Smart Factory. IQMP unterstützt dabei die ständige Verbesserung der Prozesse der additiven Fertigung durch die Verwendung und Verarbeitung von Feedback zur Verbesserung der Zielerreichung einerseits oder zur Standardisierung von Know-how bzw. Know-what andererseits, und außerdem zur Untersuchung des aktuellen Status des Geschäftsprozesses, von Fehlern und Kunden-Feedback (vgl. Abb. 9). Somit ist die Eigenschaft, die den Prozess mit Handling- und Management-Wissen versorgt, zwar intelligent, aber nicht zwingend vollautomatisch, d.h. möglicherweise mit menschlicher Arbeitskraft kombiniert. Die Bedeutung der Konzentration auf ein Feedback ist einerseits stark abhängig von dem Wert des unternehmenseigenen intellektuellen Kapitals und den kreativen Inhalten und andererseits von dem direkten oder indirekten Potenzial der Qualitätsverbesserung, basierend auf explizitem oder implizitem Wissen.<sup>122</sup> Die Vorab-Aktivitäten des IQMP und Feedback-Quellen sind in Abb. 9 aufgeführt. Im Einzelnen besteht das IQMP aus drei Arten von Vorab-Aktivitäten oder Phasen,

<sup>120</sup> Vgl. Ansari/Dornhöfer/Fathi, Ein meta-analytischer Ansatz zur kontinuierlichen Verbesserung der Wissensqualität aus Cyber-physikalischen Produktionssystemen, in: Refflinghaus et al. (Hrsg.), Qualitätsmanagement 4.0 – Status Quo! Quo vadis?, GQW (Gesellschaft für Qualitätswissenschaft) - Jahrestagung, 6. Band, Universität Kassel Press GmbH 2016, S. 187 f.; Ansari/Khobreh/Nasiri/Fathi, Knowledge Management support for Quality Management to achieve higher customer satisfaction, 2009 IEEE International Conference on Electro/Information Technology, IEEE, 2009, S. 78 f. und Ansari/Fathi/Seidenberg, Evolution of Intelligent Quality Management Process Based on Using Performance Quality Indicators, in: R. Maier, (Ed.): 6th Conference on Professional Knowledge Management – From Knowledge to Action, Bonn 2011, S. 149 f.

<sup>121</sup> Vgl. Ansari/Fathi/Seidenberg, Evolution of Intelligent Quality Management Process Based on Using Performance Quality Indicators, in: R. Maier, (Ed.): 6th Conference on Professional Knowledge Management – From Knowledge to Action, Bonn 2011, S. 152.

<sup>122</sup> Vgl. Ansari/Fathi/Seidenberg, Evolution of Intelligent Quality Management Process Based on Using Performance Quality Indicators, in: R. Maier, (Ed.): 6th Conference on Professional Knowledge Management – From Knowledge to Action, Bonn 2011, S. 154.

welche das effektive Handling und Durchführen des Geschäftsprozesses innerhalb der additiven Fertigung und folglich dessen iterative Verbesserung unterstützen. Die Tätigkeiten sind wie folgt definiert und beschrieben:

1. **Scoping** (Aufgaben- und Anforderungsanalyse): Kennen und Verstehen des Ausführungs- oder Anwendungsbereichs, der durch bestehende oder geplante Geschäftsprozesse abgedeckt wird und Formulierung entsprechender Ziele (d.h. Know-what). Entspricht das erworbene „Know-What“ dem Ziel des Geschäftsprozesses, wird die nächste Tätigkeit eingeleitet, anderenfalls wird das Scoping wiederholt, um das erforderliche Know-what vollständig zu erfüllen.
2. **Ausführungs-Wissen**: Erwerb von Fachwissen, um den bestehenden oder geplanten Geschäftsprozess auszuführen (d.h. Know-how). Hier wird untersucht, ob das erworbene Know-how ausreichend ist. Ist das Know-how nicht ausreichend, wird diese Phase in Übereinstimmung mit den formulierten Zielen und Vorgaben wiederholt.
3. **Bewertung**: Überprüfung, ob der Geschäftsprozess in Übereinstimmung mit den Kriterien und Präferenzen des Management-Teams, basierend auf der Unternehmenspolitik und -strategie, bewertet und analysiert wird. Es wird angenommen, dass die Kriterien und Präferenzen organisationsbezogene Fragen einschließen und umfassen. Somit wird in dieser Phase überprüft und verifiziert, ob eine Nichtkonformität zwischen den definierten und erarbeiteten Anforderungen und den organisatorischen Präferenzen besteht (d.h. „Know-if-possible“).

Der Abschluss der drei Vorab-Aktivitäten ist der Beleg dafür, dass grundlegende Wissensanforderungen für das Initiieren des Geschäftsprozesses erarbeitet und hinsichtlich der organisatorischen Präferenzen vollständig analysiert wurden. Der Geschäftsprozess kann somit gestartet werden, es sei denn, ein Nichtkonformitäts-Feedback wurde an die Feedback-Einheit gesendet, etwa ein Bericht über ein Problem, die Wissensanforderungen für den Geschäftsprozess zu formulieren. Außerdem werden die Personen, die die Vorab-Aktivitäten durchführen, als intern (z.B. technische Mitarbeiter wie 3D-Modell-Designer, Entwickler und Ingenieure sowie Mitarbeiter mit Organisations- und Verwaltungsaufgaben) und extern (z.B. Berater, 3D-Druck-Anlagenhersteller, Kunden) klassifiziert. Die Vorab-Aktivitäten sollten mittels Implementierungsleitfäden und Content- und Dokumentenmanagement-Systemen strukturiert werden. Das Ergebnis kann als eine Art spezifisches Wiki mit erarbeiteten Dokumenten und gewonnenem Wissen für die additive Fertigung betrachtet werden und sollte im Produktions-Repository gespeichert werden, das der Speicherung, Verwaltung und dem Zugriff von Daten (objektivem Feedback) dient, wobei bestehende Systeme, z.B. Enterprise Content Management Systeme (ECMS) genutzt werden können.

Die Feedback-Einheit ermöglicht und vervollständigt kontinuierliche Verbesserungsprozesse innerhalb des IQMP durch ein Zielerreichungs-Feedback, das von den obengenannten Quellen (vgl. dazu nachfolgende Abb. 9 und 10) bereitgestellt wird, wie:

1. **Nichtkonformitäts-Feedback**: Bericht über einen Fehlschlag der Geschäftsprozess-Initialisierung aufgrund von Nichtkonformität zwischen den in den Vorab-Aktivitäten definierten Anforderungen und den organisatorischen Präferenzen.
2. **Überprüfung und Test-Feedback**: Prüfung und Verifizierung der Ergebnisse des Geschäftsprozesses auf Korrektheit, Evaluierung und Bestimmung der Richtigkeit. Dieser Prozess wird normalerweise von den für die Qualität des Geschäfts-

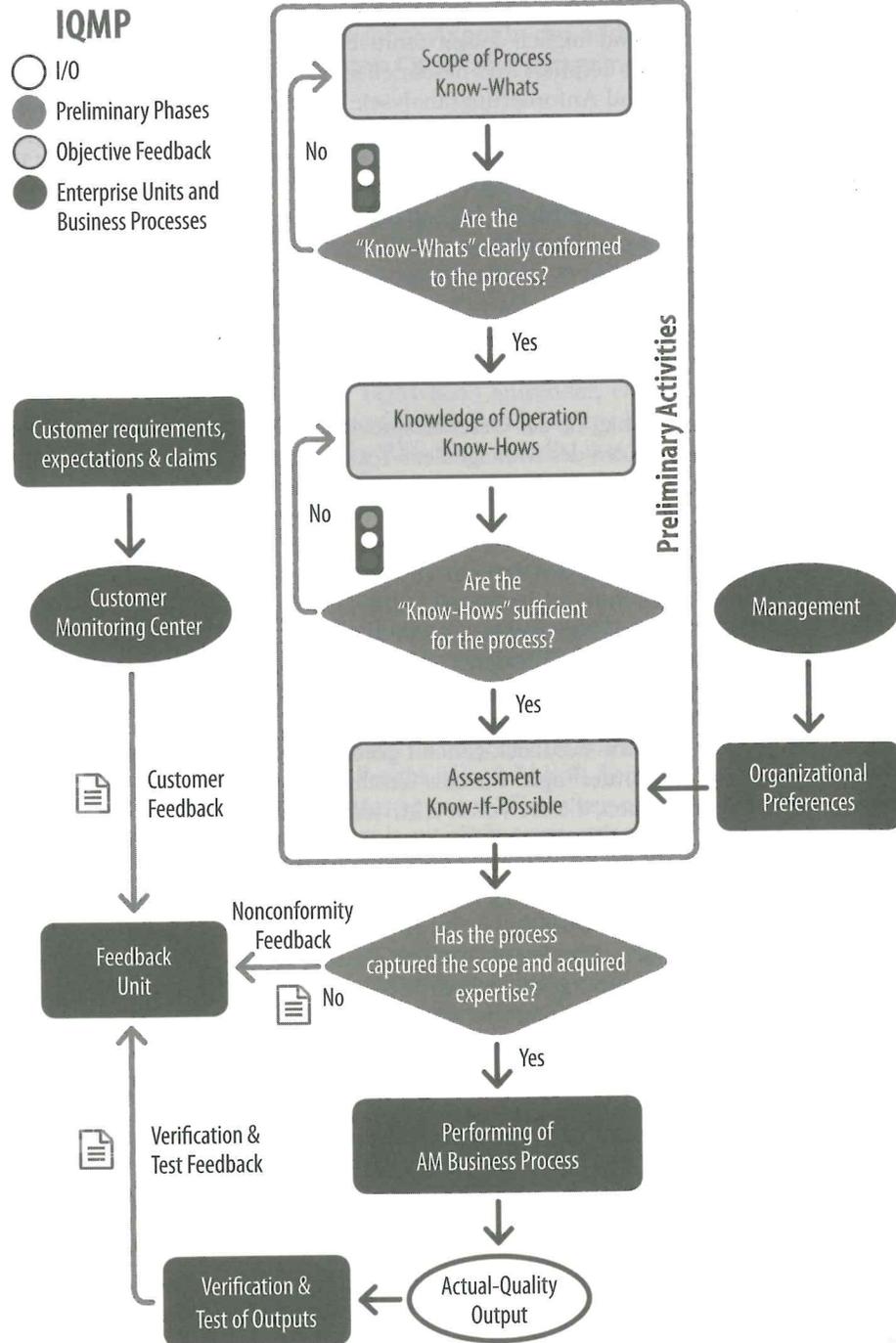


Abbildung 9: Vorab-Aktivitäten und Feedback-Quellen des IQMP.

prozesses Verantwortlichen durchgeführt und das Ergebnis als eine Art Zielerreichungs-Feedback berichtet. Diese Überprüfung und Verifizierung wird auf das „Ist-Qualitäts-Ergebnis“ (vgl. Abb. 9) angewandt, d.h. ein bestehendes, aktuelles Ergebnis mit einem bestimmten Qualitätsgrad, der aus dem Geschäftsprozess resultiert, und per Iteration verbessert werden soll, um das „Soll-Qualitäts-Ergebnis“ zu erreichen.

3. **Kunden-Feedback:** wird durch das Kunden-Monitoring-Zentrum des Unternehmens gesammelt und analysiert. Die gesammelten Daten und Informationen werden als eine Art Zielerreichungs-Feedback zur weiteren Analyse an die Feedback-Einheit übermittelt.

Darüber hinaus werden diese drei Arten von Zielerreichungs-Feedback im Produktions-Repository unter der Kategorie „Verbesserungspotenziale“ gespeichert (vgl. Abb. 10).

Die Feedback-Einheit ist nicht nur für die Überwachung und Evaluierung der aktuellen Leistung der Vorab-Aktivitäten innerhalb des Geschäftsprozesses verantwortlich, sondern verfolgt auch das Ziel, eine passende Lösung anzubieten, um die bestehende Situation zu verbessern und potentielle Probleme vorherzusehen. Daher umfasst die Feedback-Einheit zwei Schritte: „Evaluierung“ und „Reaktion“ (vgl. Abb. 10). Der Evaluierungsschritt beinhaltet zunächst die Überwachung des Zielerreichungs-Feedbacks, basierend auf Kriterien und Indikatoren, zudem die Erstellung von Matrizen zur Darstellung des aktuellen Status jeder Vorab-Aktivität und der Phasen des Geschäftsprozesses, die Identifizierung von Änderungstrends auf strategischer, taktischer und operativer Ebene und schließlich die Vermeidung potentieller Probleme durch proaktive Steuerung.

Die im Evaluierungsschritt verwendeten Qualitätskriterien sind in drei Gruppen gegliedert (s. Tab. 5).

Bei der Identifizierung der qualitätskritischen Aspekte der additiven Fertigung (vgl. Tab. 4) und der in Tab. 5 dargestellten Qualitätskriterien können zwei Arten von Indikatoren für die Überwachung der additiven Fertigung auf strategischer, taktischer und operativer Ebene entwickelt bzw. verwendet werden:

- **Standard-Indikatoren** (Key Performance Indicators – KPI), welche vom QM bezogen werden, sowie **Nachhaltigkeits-Indikatoren**, die wirtschaftliche, umweltrelevante und/oder gesellschaftliche Aspekte der additiven Fertigung abdecken; Beispiele: Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit, Wartungsfreundlichkeit usw.
- **Wissensbasierte Indikatoren**, welche auf der Basis von Extraktion, Explikation und Formalisierung der Erfahrungen des Personals der additiven Fertigung in einer Smart Factory durch strukturierte Erhebungen oder Beobachtungen erstellt werden, die verifiziert und anschließend für den Kontext der additiven Fertigung standardisiert werden können, z.B. Kostenindikatoren für die Modellierung geplanter und ungeplanter Ausfallkosten.

Schließlich liefert die Feedback-Einheit den „Höhere-Qualität-Input“, mit dem der nächste IQMP-Zyklus begonnen wird und der modifizierte „Know-how-what“-Lösungen für jede Vorab-Aktivität umfasst. Der gesamte Prozess führt zu Änderungen der Ziele und Szenarien jeder Phase und wird wiederholt, um das gewünschte QM-Ziel zu erreichen.

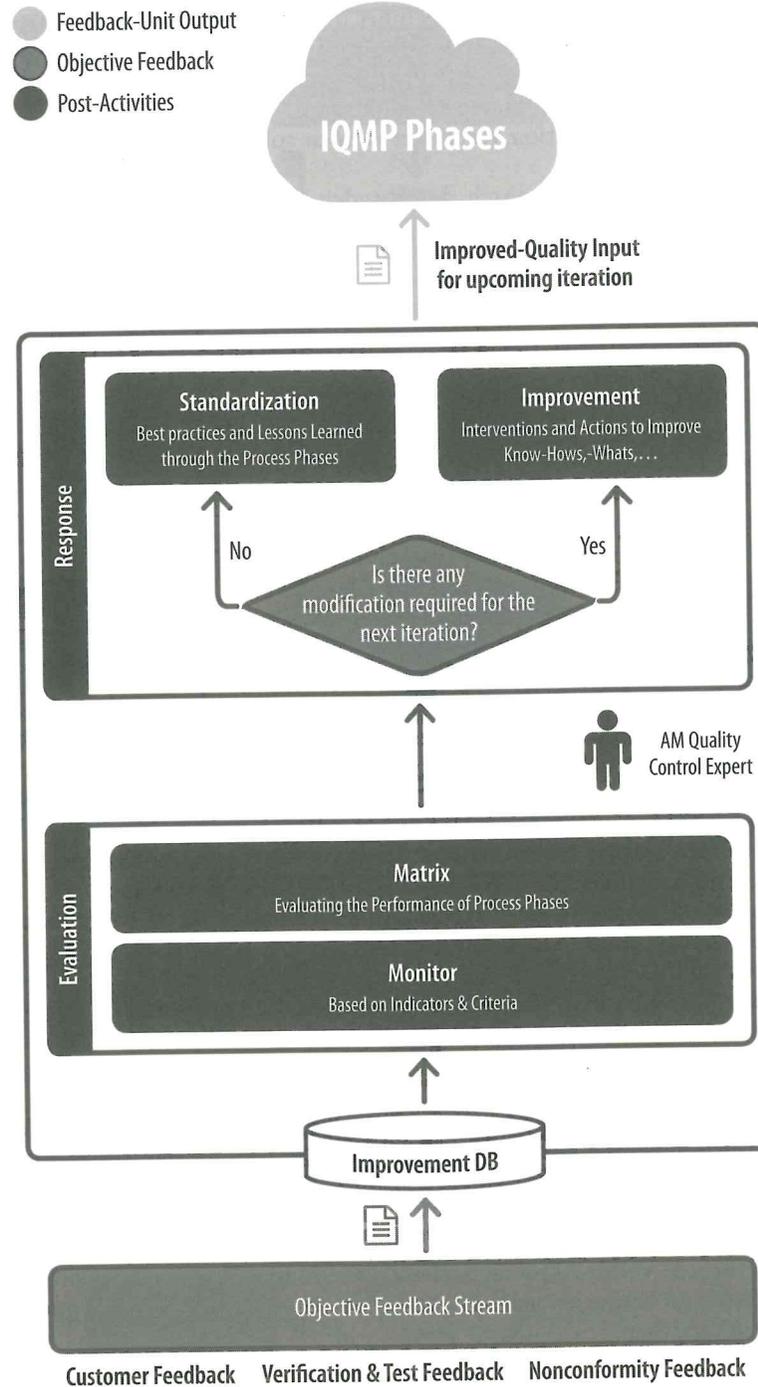


Abbildung 10: Feedback-Einheit mit den Schritten „Evaluierung“ und „Reaktion“.

Seidenberg/Ansari

Qualitätsebene	Qualitätskriterien
Potenzial-Ebene (QM-System, Betriebsmittel, Personal und Material)	Vollständigkeit
	Genauigkeit
	Überschaubarkeit
	Anwendbarkeit
	Erreichbarkeit
	Sicherheit
	Wartungsfreundlichkeit
Prozess-Ebene	Geschwindigkeit
	Zweckmäßigkeit
	Pünktlichkeit
	Rückverfolgbarkeit
	Effizienz
Produkt-Ebene (Zustand der physischen und der Informations-Produkte)	Interaktivität
	Wiederverwendbarkeit
	Prägnanz
	Konsistenz
	Richtigkeit
	Aktualität
	Recyclingfähigkeit

Tabelle 5: In der Feedback-Einheit verwendete Qualitätskriterien für die proaktive Überwachung und Steuerung (übernommen von Eppler, *Managing Information Quality: Increasing the Value of Information in Knowledge-intensive Products and Processes*, Berlin, 2006, S. 76).

### D. Erörterung der technologischen und nicht-technologischen Herausforderungen durch den Trend zu Industrie 4.0 in der additiven Fertigung

Die Entwicklung von QM-Modellen für die additive Fertigung hängt nicht nur von bestehenden technologischen und nicht-technologischen Herausforderungen der additiven Fertigung ab, sondern auch von der technologischen Weiterentwicklung, insbesondere in der Industrie 4.0 und infolge des Auftretens von cyber-physischen Produktionssystemen (CPPS). Industrie 4.0 als aktueller Trend in Produktionssystemen zielt auf die Weiterentwicklung der Automatisierung und des Grads des Datenaustauschs bis zu einer Tiefe, die Selbstorganisationsfunktionen in der Produktion und damit verbundene Geschäftsprozesse ermöglicht und beschleunigt.<sup>123</sup> Mit dem

<sup>123</sup> Vgl. Vogel-Heuser/Bauernhansl/ten Hompel, (Hrsg.), *Handbuch Industrie 4.0: Allgemeine Grundlagen*, Bd. 4, Springer 2017, S. 1 f. und Bartodziej, *The Concept Industry 4.0: An Empirical Analysis of Technologies and Applications in Production Logistics*, Springer 2017, S 1 f.

Seidenberg/Ansari

Ziel des höchsten Level der Produktionssystemautonomie löst die Industrie 4.0 den Übergang vom heutigen Fertigungsbetrieb zur Smart Factory durch Integration von CPPS, Internet of Things (IoT), Internet of Services (IoS) und intelligenten Materialien und Produkten aus.<sup>124</sup> CPPS sind eine neue Art von Produktionssystemen mit einem breiten Anwendungsspektrum, die als Feedback-Systeme charakterisiert werden, welche im Idealfall intelligent, anpassungsfähig und vorausschauend, vernetzt bzw. dezentralisiert sind, in Echtzeit und möglicherweise mit drahtloser Sensor- und Aktortechnologie und gegebenenfalls kombiniert mit menschlicher Arbeitskraft laufen.<sup>125</sup> Die mit dem übergreifenden Thema Industrie 4.0 verbundene technologische Weiterentwicklung beinhaltet hochvolumigen Echtzeit-Datenaustausch zwischen verschiedenen intelligenten Objekten wie Systemen oder Materialien und führt aufgrund der Heterogenität und der Genauigkeit der akkumulierten Daten zu einer hochentwickelten Datenverarbeitung.<sup>126</sup> Somit führt die autonome Entscheidungsfindung durch die Zusammenarbeit von Mensch und Maschine zu neuen Herausforderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit und Qualität der Entscheidungen, die direkt oder indirekt die Qualität der Prozesse und Produkte beeinflussen.<sup>127</sup> Beim Verfolgen der Ziele von Industrie 4.0 tritt eine Reihe von Herausforderungen auf, die durch einen Expertenausschuss identifiziert wurden:<sup>128</sup>

1. **Standardisierung und Referenzarchitektur** zur Realisierung einer Smart Factory und deren unternehmensübergreifender Vernetzung,
2. **Management komplexer Systeme** wie CPPS,
3. **flächendeckende Breitband-Infrastruktur** zum Einsatz von IoT und IoS sowie drahtloser Sensor- und Aktortechnologien,
4. **Betriebs- und Angriffssicherheit** innerhalb und zwischen vernetzten Smart Factories,
5. **Arbeitsorganisation und -gestaltung** zur Spezifizierung der Rollen von Mensch und CPPS im Kontext der Smart Factory,
6. **Aus- und ständige Weiterbildung** zur Erhöhung der menschlichen Kompetenzen für die Ausführung anspruchsvoller Aufgaben und die Zusammenarbeit mit CPPS,
7. **rechtliche Rahmenbedingungen** sowie
8. **Ressourceneffizienz** hinsichtlich physischer, menschlicher und intellektueller Ressourcen.

<sup>124</sup> Vgl. Roth (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0: Allgemeine Grundlagen, Bd. 4, Springer 2017, S. 1 f. und Final report of the Industrie 4.0 Working Group: Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0, acatech – National Academy of Science and Engineering, Sponsored by German Federal Ministry of Education and Research, April 2013, S. 1 f.

<sup>125</sup> Vgl. Lee/Seshia, Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach, 2nd Edition, 2015.

<sup>126</sup> Vgl. Ansari/Dornhöfer/Fathi, Ein meta-analytischer Ansatz zur kontinuierlichen Verbesserung der Wissensqualität aus Cyber-physikalischen Produktionssystemen, in: Refflinghaus et al. (Hrsg.), Qualitätsmanagement 4.0 – Status Quo! Quo vadis?, GQW (Gesellschaft für Qualitätswissenschaft) – Jahrestagung, 6. Band, Universität Kassel Press GmbH 2016, S. 187 f.

<sup>127</sup> Vgl. Ansari/Seidenberg, A Portfolio for Optimal Collaboration of Human and Cyber Physical Production Systems in Problem-Solving, In Proceedings of the 13th International Conference on Cognition and Exploratory Learning in Digital Age (CELDA 2016), Mannheim, October 28–30, International Association for Development of the Information Society, 2016, S. 311 f.

<sup>128</sup> Vgl. Final report of the Industrie 4.0 Working Group: Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0, acatech – National Academy of Science and Engineering, Sponsored by German Federal Ministry of Education and Research, April 2013, S. 6 f.

Die genannten Herausforderungen sind mit den Potenzialen und Ursachen von Qualitätsproblemen auf strategischer, taktischer und operativer Ebene in der Smart Factory verbunden und verknüpft und geeignet, die Qualität der Prozesse und Produkte zu beeinflussen. Betrachtet man die Smart Factory als Hauptresultat von Industrie 4.0, so schafft der Einsatz von CPPS den Mehrwert zur Integration des Sensor- und Aktorprinzips als inhärentes Merkmal und außerdem zur Einbindung der Fähigkeit, mit anderen intelligenten Objekten wie intelligenten Geräten und Materialien zu kommunizieren. Zu diesem Zweck wird die Sammlung und Synchronisierung der Fertigungsdaten durch die Verwendung von drahtlosen Geräten wie RFID (Radiofrequenz-Identifikation) oder drahtlose Kommunikationsnetzwerke wie Wi-Fi und Bluetooth realisiert.<sup>129</sup> Das Aufkommen von CPPS führt zu verschiedenen neuen technologischen und nicht-technologischen Herausforderungen mit erheblichen Auswirkungen auf die Qualität, was direkt oder indirekt die Weiterentwicklung der additiven Fertigung, z.B. durch die Verwendung von CPPS in der additiven Fertigung oder die Umwandlung bestehender 3D-Druckersysteme in CPPS, beeinflusst. Die folgende Tab. 6 fasst elf grundlegende Herausforderungen zusammen, die in der Literatur hinsichtlich der Realisierung von CPPS identifiziert werden.

Herausforderungen von CPPS	Beschreibung	Art	
		Technologisch	Nicht-technologisch
Kompatibilität	Kompatibilitätsprobleme können aufgrund der Integration von heterogenen Cyber- und physischen Aspekten von CPPS, d.h. in der Systemintegration sowohl von Subsystemen als auch „Systemen von Systemen“ auftreten.	✓	
Dezentrale Sensorik, Datenverarbeitung und Steuerung	Die Hauptprobleme beinhalten die (Semi-)Echtzeit-Sammlung entsprechender Informationen, die Verarbeitung und Steuerung in einer dezentralen Umgebung.	✓	
Physische Schnittstellen und Integration	Ein wesentliches Merkmal von CPPS ist die Möglichkeit des Kontakts mit der physischen Welt durch die Verwendung verschiedener Sensor-Technologien.	✓	
Menschliche Schnittstellen und Integration	Ein weiteres wesentliches Merkmal von CPPS ist die Möglichkeit, über Mensch-Maschine-Schnittstellen effektiv mit verschiedenen Arten von Endnutzern auf diversen Qualifikations- und Kompetenzniveaus zu kommunizieren.	✓	✓

<sup>129</sup> Vgl. Huang et al., RFID-enabled Real-time Wireless Manufacturing for Adaptive Assembly Planning and Control, Journal of Intelligent Manufacturing, Volume 19, Issue 6, Springer 2008, S. 701 f. und Ehrlich/Wisniewski/Jasperneite, State of the Art and Future Applications of Industrial Wireless Sensor Networks, Jahreskolloquium Kommunikation in der Automation 2016, Lemgo, S. 1 f.

Herausforderungen von CPPS	Beschreibung	Art	
		Technologisch	Nicht-technologisch
Wissensextraktion aus heterogenen Datenquellen	Die Verarbeitung von gesammelten Rohdaten in strukturiertem, semi-strukturiertem und nicht-strukturiertem Format sowie in verschiedenen Qualitäts- und Richtigkeitsniveaus, die Wissensextraktion zur Unterstützung der Entscheidungsfindung und das Lernen von jeder Entscheidungsinstanz erfordern den Einsatz von künstlicher Intelligenz, insbesondere Data-Mining und Techniken maschinellen Lernens.	✓	
Entwurf und Analyse von physischen und Cyber-Komponenten	Der Entwurf und die Analyse von heterogenen physischen und Cyber-Komponenten mit verschiedenen Begriffen von Zeit, über verschiedene Skalen und die Integration des damit gesammelten Feedbacks entfalten eine sehr hohe Komplexität.	✓	
Datenschutz, Vertrauen, Sicherheit	CPPS werfen neue Probleme auf, da für das Offenlegen von Informationen von physischen Systemen möglicherweise neue Regelungen hinsichtlich Zugriff und Transparenz notwendig werden, z.B. welche Informationen versteckt werden können. Außerdem sind im Kontext vernetzter Smart Factories neue Arten von physischen und cyber-physischen Angriffen möglich, daher gibt es eine Nachfrage nach neuen Konzepten und Werkzeugen für die Cyber-Sicherheit.	✓	✓
Robustheit, Anpassung, Rekonfiguration	CPPS arbeiten in dynamischen Produktionsumgebungen und müssen daher unsichere Situationen und Störungen bewältigen, ohne dass die Ergebnisqualität beeinträchtigt wird. Außerdem sollten CPPS rekonfigurierbar und anpassbar sein, um (unerwartete) Fehler auf physischer und Cyber-Ebene zu bewältigen.	✓	

Herausforderungen von CPPS	Beschreibung	Art	
		Technologisch	Nicht-technologisch
Software	Für die Entwicklung und den Einsatz von CPPS sind neue Programmiersprachen notwendig oder auch traditionelle, die die Komplexität der cyber-physischen Räume bewältigen können. Darüber hinaus benötigen CPPS integrierte Software-Lösungen, um die Leistungsplanung, -überwachung und -steuerung der CPPS zu unterstützen und hochvolumige Echtzeit-Datenübertragung zwischen Subsystemen, „Systemen von Systemen“ und der Umgebung bewältigen zu können.	✓	
Verifizierung, Prüfung, (Sicherheits-) Zertifizierung und Richtlinien	CPPS benötigen neue Ansätze zur Verifizierung und Prüfung, um potenzielle Ereignisse wie physische oder cyber-bezogene Fehler durch den Vergleich mit bestimmten Standards zu überprüfen und zu regulieren. Zu diesem Zweck sollte ein Erkennungs-, Lern- und Logik-Modul entwickelt werden, um die Richtigkeit von Entscheidungen sicherzustellen und das Lernen von früheren Modulen zu fördern. CPPS benötigen außerdem Zertifizierungen für den sicheren Umgang, z.B. zur Identifizierung von und im Umgang mit Gefahren.	✓	✓
Gesellschaftliche Auswirkungen	Soziale Aspekte der CPPS können auch Design, Überprüfbarkeit, Validierung, Betrieb, Datenschutz, Vertrauen und Fehlertoleranz beeinflussen.		✓

Tabelle 6: Grundlegende Herausforderungen von CPPS  
(übernommen aus Lee/Seshia, *Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach*, 2nd Edition, Cambridge 2015; Ansari/Seidenberg, *A Portfolio und CPS Summit, Report: Cyber-Physical Systems Summit*, 2008).

In diesem Kontext führt die Weiterentwicklung des QM in Abstimmung mit der Industrie 4.0 zur Schaffung des Konzeptes „Qualitäts-Management 4.0“,<sup>130</sup> welches hauptsächlich darauf abzielt, Methoden künstlicher Intelligenz, insbesondere Data-Mining, semantische Technologie und Methoden maschinellen Lernens,

<sup>130</sup> Refflinghaus et al. (Hrsg.), *Qualitätsmanagement 4.0 – Status Quo! Quo vadis?*, GQW-Jahrestagung, 6. Band, Kassel 2016, S. 1 f.

einzusetzen. Dies verfolgt das Ziel der Automatisierung der Verarbeitung und Analyse hochvolumiger Datenmengen, die innerhalb der Smart Factory übertragen werden, sowie die Nutzung der Daten zur Qualitätsüberwachung und -steuerung der betrieblichen Systeme in Echtzeit. Beispielsweise nutzen Seiffert et al. Mustererkennungsmethoden zur Überwachung und vorausschauenden Qualitätssicherung durch Echtzeit-Überwachung und Interpretation zahlreicher Prozessparameter im Zusammenhang mit 3D-Druckern.<sup>131</sup> Ähnliche Ansätze mit anderen Methoden wie der Meta-Analyse des Wissenskapitals werden in der Literatur<sup>132</sup> im Hinblick auf verschiedene Fertigungssysteme und -maschinen dargestellt, was die Möglichkeit für zukünftige interdisziplinäre Forschung im Rahmen der QM 4.0 für die additive Fertigung eröffnet.

### E. Schlussfolgerung und Ausblick

- 99 Das derzeitige QM der additiven Fertigung ist geprägt durch die Übernahme und Adaption bewährter, allgemein anwendbarer Prinzipien und Instrumente des QM, die im Grundlagenteil A dieses Beitrages vorgestellt wurden. Dabei wurde auch auf Anwendungsbesonderheiten hinsichtlich der additiven Fertigung eingegangen, soweit diese Eingang in die Literatur gefunden haben. Ein speziell für die additive Fertigung entwickeltes QM existiert derzeit nicht. Dem stehen die nach wie vor dynamische technologische Entwicklung und auch die Heterogenität der Verfahren selbst entgegen. Die Normung rund um die additiven Fertigungsverfahren befindet sich derzeit in einer Aufbauphase.
- 100 Die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit der additiven Fertigung wird durch die Implementierung der QM-Grundsätze erreicht, die die Produktqualität, die Unternehmensleistung und die damit verbundenen Prozesse durch die Verwendung von Wissenskapital bezüglich der additiven Fertigung sicherstellen. Das im Teil C vorgeschlagene IQMP (Intelligent Quality Management Process) -Modell setzt den Schwerpunkt speziell auf die Nutzung von wissensbasierten QM-Methoden, um das Zielerreichungs-Feedback zur ständigen Verbesserung und zur Steigerung der Leistung der Geschäftsprozesse in der additiven Fertigung zu nutzen. Um die Ziele des IQMP vollständig zu erfüllen, ist die Definition von Indikatoren für die additive Fertigung, basierend auf den dargestellten qualitätsrelevanten Herausforderungen und Qualitätskriterien, von grundlegender Bedeutung. Die Quantifizierung der Indikatoren wird durch empirische Studien des Modells in verschiedenen Anwendungen und technologischen Szenarien der additiven Fertigung erzielt werden. Die Erstellung eines Indikatorkatalogs kann der Feedback-Einheit ermöglichen, Verbesserungspotenziale zur Identifizierung und Auswahl gewonnener Erkenntnisse sowie zur Standardisierung von Best Practices, die mittels IQMP ermittelt wurden,

<sup>131</sup> Vgl. Seiffert et al., Traditionelles neu gedacht: Das Katapult als Lernzeug für die Qualität in der Industrie 4.0, in: Refflinghaus et al. (Hrsg.), Qualitätsmanagement 4.0 – Status Quo! Quo vadis?, GQW-Jahrestagung, 6. Band, Kassel 2016, S. 54 ff.

<sup>132</sup> Siehe Ansari/Dornhöfer/Fathi, Ein meta-analytischer Ansatz zur kontinuierlichen Verbesserung der Wissensqualität aus Cyber-physikalischen Produktionssystemen, in: Refflinghaus et al. (Hrsg.), Qualitätsmanagement 4.0 – Status Quo! Quo vadis?, GQW (Gesellschaft für Qualitätswissenschaft) – Jahrestagung, 6. Band, S. 187 ff., Universität Kassel Press GmbH 2016. sowie weitere Beiträge in: Refflinghaus et al. (Hrsg.), Qualitätsmanagement 4.0 – Status Quo! Quo vadis?, GQW-Jahrestagung, 6. Band, Kassel 2016.

zu identifizieren und das „Know-how-what“ sowie hersteller- oder kundenbezogene QM-Strategien effizient zu modifizieren. Um die Evaluierungs- und Reaktionsschritte des IQMP zu automatisieren, wird empfohlen, eine QM-Software für die additive Fertigung einzusetzen, welche die Datensammlung und -verarbeitung sowie die Integration eines Feedback-Prozesses in die intelligente Fertigungsumgebung erleichtert. Der vorgeschlagene IQMP ist der erste Schritt auf dem Weg zur Realisierung eines wissensbasierten QM-Modells und letztlich zur Unterstützung der additiven Fertigungsumgebung bei der Bewältigung der Anforderungen der intelligenten Fertigung und QM 4.0 in der Zukunft mit Hilfe von semantischer Technologie, maschinellem Lernen und der Analyse großer Datenmengen (Big Data).