

# Handbuch Industrie 4.0

Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik

Bearbeitet von  
Gunther Reinhart

1. Auflage 2017. Buch. 700 S. Hardcover  
ISBN 978 3 446 44642 7  
Format (B x L): 20,7 x 27,7 cm  
Gewicht: 2235 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Produktionstechnik](#)

Zu [Inhaltsverzeichnis](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

**beck-shop.de**  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung [beck-shop.de](http://beck-shop.de) ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.



Leseprobe

Handbuch Industrie 4.0

Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik

Herausgegeben von Gunther Reinhart

ISBN (Buch): 978-3-446-44642-7

ISBN (E-Book): 978-3-446-44989-3

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44642-7>

sowie im Buchhandel.

Gunther Reinhart

# Handbuch Industrie 4.0

Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik

HANSER

Der Herausgeber:

*Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart*, Technische Universität München

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek:

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-446-44642-7

E-Book-ISBN: 978-3-446-44989-3

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen erstellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Verfahren und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Verfahren oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.



© Carl Hanser Verlag, München 2017

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg, Julia Stepp

Herstellung: Cornelia Rothenaicher

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Titelmotiv: Frank Wohlgemuth, Hamburg

Druck und Bindung: FIRMENGRUPPE APPL, aprinta druck GmbH, Wemding

Printed in Germany

# Vorwort

Ein neues Zeitalter der Industrialisierung beginnt: Objekte, Maschinen und Geräte werden intelligent, nutzen das Internet der Dinge und kommunizieren mit den Menschen auf natürliche Weise. Potenzial genug, die Automatisierung der Produktion neu zu definieren. Sie wird sich nicht nur weiter beschleunigen, sondern auch leistungsfähiger und intelligenter werden. Gerne bezeichnen wir die Transformation unserer Fabriken in dieses neue Zeitalter mit dem Begriff der 4. Industriellen Revolution. Sie wird in den nächsten Jahren die Art, in der Produkte entwickelt, gefertigt und vertrieben werden, vollständig verändern.

Durch die digitale Vernetzung der Kunden, Produzenten und Lieferanten werden sich völlig neue Prozesse etablieren. Das vorliegende Handbuch möchte diese Entwicklung begleiten. Es beschreibt, wie sich die Unternehmen mit Hilfe überall verfügbarer Rechnerleistung (Cloud) und sinnvoll genutzter Datenbankkapazitäten (Big Data) neue Geschäftsfelder erschließen können. Es beantwortet auch die Frage, wie aus Maschinen, Robotern und Anlagen Cyber-physische Produktionssysteme werden. Ganz neue Geräte und Systeme der Automatisierung werden entstehen und auf den internationalen Märkten der Industrieausrüstung angeboten.

Leider ist Industrie 4.0 weder ein Produkt noch ein Prozess. Erst einmal ist es auch kein Projekt, vielmehr ist es ein Impuls und eine Aufforderung an die produzierende Industrie, durch die Integration moderner Informations- und Kommunikationstechnologie neuartige, intelligente Produktionsanlagen und Produktionssysteme zu entwickeln. Gerne wird hierfür auch der englische Begriff der Smart Factory verwendet. Jedes Unternehmen muss für sich selbst entwickeln und entscheiden, wie seine Smart Factory aussieht. Dazu sind geeignete Projekte mit dem Commitment der Unternehmensleitung zur Definition und zum Aufbau der eigenen intelligent vernetzten Produktion aufzu-

setzen. Wenigstens sind die „Zutaten für Industrie 4.0“, also die Elemente der Smart Factory bekannt: Die Cyber-physischen Produktionssysteme, das Internet der Dinge, Sensornetzwerke, die Cloud Services, Big Data Analytics, Digitale Schatten und Digitale Zwillinge, kurz die Digitale Fabrik. Nicht zu vergessen kognitive und physische Assistenzsysteme wie kooperative Roboter.

In diesem Handbuch Industrie 4.0 erfahren Sie, wie durch den Einsatz neuer Technologien neuartige Produktionssysteme für kundenindividuelle Produkte und Services wirtschaftlich darstellbar sind. Auch Produkt-Service-Kombinationen und neuartige softwarebasierte Geschäftsplattformen werden behandelt. Ebenso zeigt das Handbuch, wie die vorhandenen Ressourcen auf die digitale Fabrik bzw. die Smart Factory umgestellt werden können. Viele verfügbaren Automatisierungskomponenten, Werkzeug- und Verarbeitungsmaschinen sind bereits Industrie 4.0-fähig oder können für die Transformation vorbereitet werden. Die Herausforderung liegt in der Realisierung einer leistungsfähigen Echtzeitkommunikation zwischen diesen so genannten Cyber Physical Systems (CPS).

Das Handbuch gliedert sich in drei Teile, welche systematisch aufeinander aufbauen. Im Teil A *Prozesse der Smart Factory* wird anhand mehrerer Beiträge beschrieben, wie sich die Prozesse in der Smart Factory verändern und welche organisatorischen, technischen, rechtlichen und nicht zuletzt menschlichen Aspekte dies betrifft. Auch neue Geschäftsmodelle und entsprechende Transformationsstrategien werden behandelt. Teil B beschreibt *Cyber-physische Komponenten für die Produktion*. Wir beginnen mit dem intelligenten Werkstück mit Produktgedächtnis, setzen fort mit Werkzeugen, Werkzeugmaschinen und Anlagen mit ihrer Verkettung als Cyber-physische Systeme und schließen mit Aspekten der Montage, der Logistik und der Automatisierung.

Teil C stellt schließlich konkrete *Anwendungsbeispiele* vor. Von vernetzten Anlagen für die spanende Fertigung über vernetzte Montage- und Verpackungsanlagen geht es zu branchenbezogenen Beispielen: Die Automobilindustrie, die Luftfahrtindustrie, die Elektronikindustrie und den Werkzeugbau mit seiner individuellen Einzel- und Kleinserienfertigung.

Das Handbuch erklärt die Schnittstellen, die Verknüpfung mit der bereits eingeführten und im Consumer-Markt etablierten Informations- und Kommunikationstechnologie sowie mit den zugehörigen Geräten und auch den Aufbau neuer Strukturen und Abläufe. Jedes Unternehmen, das in den nächsten Jahren wettbewerbsfähig bleiben möchte, befasst sich bereits konkret mit Industrie 4.0. Dieses Handbuch ist ein unverzichtbarer Ratgeber auf dem Weg in dieses neue Zeitalter.

Ich möchte mich hiermit ganz herzlich bei den zahlreichen Autoren, meinen Kollegen und ihren wissenschaftlichen Mitarbeitern bedanken. Sie haben spontan und proaktiv die Idee eines derartigen Handbuchs aufgegriffen und mit ihren Beiträgen bereichert. Nur so

war es möglich in derart kurzer Zeit ein so umfassendes Opus zu erstellen. Genauso intensiv möchte ich mich auch bei den Koordinatoren und Lektoren dieses Buchprojekts bedanken, ganz besonders bei Herrn Dino Knoll. Er und seine Kollegen haben mit unermüdlichem Einsatz dafür gesorgt, dass die Beiträge inhaltlich wie zeitlich zusammenpassten, die Begrifflichkeit abgestimmt wurden und so ein für die Praxis hilfreiches Werk entstand. Schließlich danke ich dem Hanser Verlag und insbesondere Herrn Volker Herzberg und Frau Julia Stepp für die professionelle Betreuung des Buches und für die Möglichkeit, ein solches Werk gemeinsam zu erarbeiten und zu publizieren.

*Gunther Reinhart*

München im April 2017

Allen Autorinnen und Autoren ist die Gleichbehandlung der Geschlechter ein Anliegen. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wurde nur die maskuline Form verwendet.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	VII
<b>Der Herausgeber</b> .....	XXIII
<b>Autorenverzeichnis</b> .....	XXV
<b>Von CIM zu Industrie 4.0</b> .....	XXXI
<i>Gunther Reinhart, Detlef Zühlke</i>	
Industrielle Revolutionen .....	XXXI
Globalwirtschaftliche Einflussfaktoren (Market Pull) .....	XXXV
Technologische Einflussfaktoren (IK-Technology Push) .....	XXXVIII

## TEIL A

### Prozesse der Smart Factory

<b>1 Geschäftsmodell-Innovation</b> .....	3
<i>Gunther Schuh, Michael Salmen, Philipp Jussen, Michael Riesener, Violett Zeller, Tobias Hensen, Advan Begovic, Martin Birkmeier, Christian Hocken, Felix Jordan, Jan Kantelberg, Christoph Kelzenberg, Dominik Kolz, Christian Maasem, Jan Siegers, Maximilian Stark, Christian Tönnies</i>	
1.1 Die Transformation vom Produkt- zum Lösungsanbieter .....	3
1.2 Der Digitale Schatten als Basis für Predictive Analytics .....	10
1.3 Innovationsarten zur Einführung neuer Geschäftsmodelle und Kundenorientierung durch neue Innovationsprozesse .....	12
1.4 Netzwerkartige Wertschöpfungssysteme .....	18
1.5 Plattformansätze zur Kollaboration .....	21
1.6 Wandel zum Industrie 4.0-Unternehmen .....	24
<b>2 Veränderung in der Produktionsplanung und -steuerung</b> .....	31
<i>Peter Nyhuis, Marco Hübner, Melissa Quirico, Philipp Schäfers, Matthias Schmidt</i>	
2.1 Einführung in die PPS .....	31
2.2 Transparenz durch Datenverfügbarkeit als Enabler für eine leistungsfähigere PPS .....	33
2.3 Potenziale der Digitalisierung für die Aufgaben der PPS .....	34
2.3.1 Produktionsprogrammplanung .....	35
2.3.2 Auftragsmanagement und Auftragsversand .....	35

2.3.3	Sekundärbedarfsplanung .....	37
2.3.4	Fremdbezugsgrubplanung und Fremdbezugsplanung .....	38
2.3.5	Produktionsbedarfsplanung .....	40
2.3.6	Eigenfertigungsplanung .....	40
2.3.7	Eigenfertigungssteuerung .....	41
2.3.8	Bestandsmanagement .....	42
2.3.9	Produktionscontrolling .....	43
2.4	Mythos PPS 4.0 .....	45
<b>3</b>	<b>Der Mensch in der Produktion von Morgen</b> .....	<b>51</b>
	<i>Gunther Reinhart, Klaus Bengler, Christiane Dollinger, Carsten Intra, Christopher Lock, Severina Popova-Dlogosch, Christoph Rimpau, Jonas Schmidler, Severin Teubner, Susanne Vernim</i>	
3.1	Die Bedeutung von Industrie 4.0 für den Mitarbeiter .....	51
3.2	Grundlegende Konzepte und Modelle .....	54
3.2.1	Das Konzept Mensch – Technik – Organisation (MTO) .....	54
3.2.2	Belastungs-Beanspruchungskonzept .....	56
3.2.3	Gestaltung von Assistenzsystemen .....	57
3.2.4	Systemergonomische Analyse .....	59
3.3	Qualifizierung des Produktionsmitarbeiters in der Industrie 4.0 .....	60
3.3.1	Entwicklungstendenzen der Arbeit in der Produktion durch Industrie 4.0 .....	60
3.3.2	Charakteristik des Produktionsmitarbeiters der Zukunft .....	63
3.3.3	Qualifikationsbedarf für den Produktionsmitarbeiter der Zukunft .....	64
3.4	Individuelle dynamische Werkerinformationssysteme .....	66
3.4.1	Übersicht Werkerinformationssysteme .....	68
3.4.2	Individuelle Werkerinformation .....	72
3.4.3	Dynamische Werkerinformation .....	77
3.5	Mensch-Roboter-Interaktion .....	77
3.6	Personalführung .....	79
3.6.1	Auswirkungen einer stärkeren Vernetzung und Digitalisierung .....	79
3.6.2	Auswirkungen des demografischen Wandels und veränderten Werteverständnisses	81
3.6.3	Auswirkungen des produktionstechnischen Umfelds .....	82
3.6.4	Anschauungsbeispiel: Reduzierung kognitiver Belastung für Führungspersonen ...	84
<b>4</b>	<b>Daten, Information und Wissen in Industrie 4.0</b> .....	<b>89</b>
	<i>Jörg Krüger, Axel Vick, Moritz Chemnitz, Martin Rosenstrauch, Johannes Hügler, Maximilian Fechteler, Matthias Blankenburg</i>	
4.1	Maschinensteuerung aus der Cloud – Automation as a Service .....	89
4.1.1	Einführung zu Cloud-Plattformen und -Diensten .....	89
4.1.2	Potenziale der Cloud für die Produktion .....	91
4.1.3	Wege zur Cloud-basierten Automatisierung .....	92
4.2	Big Data .....	97
4.2.1	Definitionen .....	98
4.2.2	Tools .....	99
4.2.3	Anwendungen .....	100
4.2.4	Mögliche Anwendungsgebiete .....	101

4.3	Kommunikation .....	104
4.3.1	Kommunikationstechnik für die Produktion: Bereit für Industrie 4.0? .....	104
4.3.2	Kommunikation auf der Feldebene .....	106
4.3.3	Drahtloskommunikation in der Fabrik .....	106
4.3.4	Middleware und Standards: Die Fabrik vernetzt sich .....	107
4.3.5	Potentiale des taktilen Internets .....	108
<b>5</b>	<b>Cyber-Sicherheit in Industrie 4.0</b> .....	<b>111</b>
	<i>Claudia Eckert</i>	
5.1	Motivation .....	111
5.2	Sicherheitsbedrohungen und Herausforderungen .....	112
5.2.1	Charakteristika von Industrie 4.0 .....	113
5.2.2	Bedrohungen .....	114
5.2.2.1	Angreifertypen .....	114
5.2.2.2	Bedrohungen für Industrial Control Systems .....	114
5.2.3	Anforderungen an die Cyber-Sicherheit .....	116
5.2.3.1	Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligten Instanzen .....	116
5.2.3.2	Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten .....	117
5.2.3.3	Produktion intelligenter Produkte, Verfahren und Prozesse .....	118
5.2.3.4	Orientierung an individualisierten Kundenwünschen .....	119
5.2.3.5	Verfügbarkeit relevanter Informationen in Echtzeit .....	119
5.3	Cyber-Sicherheit: Lösungsansätze .....	120
5.3.1	Sicherheitsleitfaden .....	121
5.3.2	Produkt- und Know-how-Schutz .....	123
5.3.2.1	Software Reverse Engineering und Gegenmaßnahmen .....	123
5.3.2.2	Absicherungskonzepte für industrielle Steuerungsanlagen .....	126
5.3.3	Sicherheit von Apps .....	127
5.3.3.1	Ausgewählte Problembereiche von Android-Apps .....	127
5.3.3.2	App-Ray-Analysewerkzeug .....	128
5.3.4	Datensouveränität: Industrial Data Space .....	130
5.3.4.1	Architekturüberblick .....	131
5.3.4.2	Sicherheitsarchitektur .....	132
5.3.4.3	Anwendungsszenario: Predictive Maintenance .....	134
5.4	Zusammenfassung .....	135
<b>6</b>	<b>Organisation, Qualität und IT-Systeme für Planung und Betrieb</b> .....	<b>137</b>
	<i>Michael Niehues, Gunther Reinhart, Robert H. Schmitt, Günther Schuh, Felix Brambring, Max Ellerich, Hannes Elser, Daniel Frank, Sebastian Groggert, Andreas Gützlaff, Verena Heinrichs, Thomas Hempel, Kevin Kostyszyn, Hao Ngo, Laura Niendorf, Eike Permin, Jan-Philipp Prote, Christina Reuter, Robin Türtmann</i>	
6.1	Systeme für Geschäftsprozesse .....	137
6.1.1	Systeme zur Planung und zum Betrieb der Geschäftsprozesse .....	137
6.1.1.1	Enterprise Resource Planning .....	137
6.1.1.2	Manufacturing Execution Systems .....	137
6.1.1.3	Advanced Planning and Scheduling .....	139

6.1.1.4	PPS als Schnittmenge von ERP und MES .....	139
6.1.2	Trends im Planning and Scheduling .....	140
6.1.2.1	Echtzeitdatenerfassung und unternehmensübergreifende Bereitstellung ...	140
6.1.2.2	Zentrale, dezentrale und hybride Steuerungsstrukturen .....	143
6.1.2.3	Plattformstrategie und App-basierte Individualisierung .....	145
6.1.2.4	Werkzeuge zur zielgruppenspezifischen Datenaufbereitung .....	145
6.2	Organisation und IT .....	146
6.2.1	Organisation von Planung und Betrieb .....	146
6.2.2	Cyber-physische Systeme zur Unterstützung der Planung und des Betriebs .....	147
6.2.2.1	Hochauflösende Datenaufnahme .....	147
6.2.2.2	Prognosefähigkeit durch echtzeitnahe Simulation .....	150
6.2.2.3	Entscheidungsunterstützung mittels intuitiver Visualisierung .....	153
6.3	Qualität und IT .....	154
6.3.1	Computerized Quality .....	155
6.3.2	Trends im Kontext von Industrie 4.0 .....	157
6.3.2.1	Data Analytics zur Steigerung von Produkt- und Prozessqualität .....	157
6.3.2.2	Smart Devices für die Qualitätssicherung .....	160
6.3.2.3	Plattform-basierte Kollaboration für eine bessere Ressourcennutzung .....	161
6.3.2.4	Selbstoptimierende Prüfsysteme .....	164
6.3.2.5	Interaktive Prozessdokumentation auf Wiki-Basis .....	164
6.3.3	Fazit .....	165
<b>7</b>	<b>Aspekte der Fabrikplanung für die Ausrichtung auf Industrie 4.0</b> .....	<b>169</b>
	<i>Uwe Dombrowski, Tobias Stefanak, Philipp Krenkel</i>	
7.1	Aktueller Stand und Weiterentwicklung der Digitalen Fabrik .....	169
7.1.1	Definition der Digitalen Fabrik .....	170
7.1.2	Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik .....	172
7.1.3	Nutzen der Digitalen Fabrik .....	175
7.2	Beitrag der Digitalen Fabrik zur Ausrichtung der Fabrikplanung auf Industrie 4.0 .....	177
7.2.1	Betriebsanalyse .....	178
7.2.2	Grobplanung .....	180
7.2.3	Feinplanung .....	183
7.2.4	Umsetzung .....	186
7.2.5	Betrieb, Tuning und Anpassung .....	186
7.3	Zusammenfassung und Ausblick .....	188
<b>8</b>	<b>Rechtsfragen bei Industrie 4.0: Rahmenbedingungen, Herausforderungen und Lösungsansätze</b> .....	<b>191</b>
	<i>Gerrit Hornung, Kai Hofmann</i>	
8.1	Handlungsbedarf .....	191
8.2	Datenhoheit .....	191
8.2.1	Konzeptionelle Schutzrichtungen .....	192
8.2.2	Schutz in der unmittelbaren Einflussosphäre .....	193
8.2.3	Immaterialgüterrecht .....	193
8.2.4	Schutz von Unternehmensgeheimnissen .....	195
8.2.5	Faktische Datenhoheit durch Softwareschutz .....	197

8.2.6	„Dateneigentum“ .....	198
8.2.7	Fazit .....	199
8.3	Haftung und Rechtsgeschäfte .....	200
8.3.1	Haftung .....	200
8.3.1.1	Vertragliche Haftung .....	200
8.3.1.2	Gesetzliche Haftung .....	201
8.3.2	Rechtsgeschäfte .....	202
8.4	Datenschutzrecht .....	204
8.4.1	Betriebliche Mitbestimmung .....	204
8.4.2	Grundsätzliche Anforderungen im Betrieb .....	204
8.4.3	Zusammenarbeit mit Dritten .....	205
8.5	IT-Sicherheitsrecht .....	206
8.5.1	Reichweite des IT-Sicherheitsgesetzes .....	206
8.5.2	Auswirkungen auf die Industrie 4.0 .....	207
8.5.3	Untersuchungsbefugnisse des BSI .....	208
8.6	Fazit .....	208
<b>9</b>	<b>Strategien zur Transformation der Produktionsumgebung</b> .....	<b>213</b>
	<i>Dennis Kolberg, Ellina Marseu, Dominic Gorecky, Jonas Koch, Christian Plehn, Detlef Zühlke, Gunther Reinhart</i>	
9.1	Identifikation von Handlungsbedarfen .....	213
9.2	Management von Änderungen in der Produktion .....	217
9.2.1	Aufbau und Kontext des Änderungsmanagements in der Produktion .....	218
9.2.2	Der Änderungsprozess für eine digitalisierte Produktion .....	219
9.2.2.1	Phase I: Proaktivität .....	220
9.2.2.2	Phase II: Reaktivität .....	221
9.2.2.3	Phase III: Retrospektivität .....	222
9.2.3	Analyse von Produktionsänderungen .....	222
9.2.4	Zusammenfassung .....	225
9.3	Definition von Anforderungen für CPPA .....	226
9.3.1	Status Quo bei der Erstellung von Lastenheften im Kontext der Produktion .....	227
9.3.2	Vorgehen und Checkliste zur Erstellung von Lastenheften für CPPA .....	227
9.3.2.1	1. Schritt: Projektziel festlegen .....	228
9.3.2.2	2. Schritt: Problemfelder identifizieren .....	228
9.3.2.3	3. Schritt: Lösungsalternativen bestimmen .....	229
9.3.2.4	4. Schritt: Lösungsalternativen abstimmen und integrieren .....	230
9.3.2.5	5. Schritt: Finales Lastenheft erstellen .....	230
9.4	Vorgehen zur Konzeption und Realisierung .....	232
9.4.1	Status Quo bei der Produkt- bzw. Systementwicklung .....	233
9.4.1.1	Disziplinspezifische Vorgehensmodelle und Werkzeuge .....	234
9.4.1.2	Disziplinübergreifende Vorgehensmodelle und Werkzeuge .....	237
9.4.1.3	Status Quo bei der Entwicklung von CPS-basierten Lösungen .....	239
9.4.1.4	Status Quo bei der Entwicklung von wandelbaren Produktionsanlagen .....	242
9.4.2	Entwicklungsmethodik für Cyber-physische Produktionsanlagen .....	242
9.4.2.1	Phasen 1 und 2: Übergreifende System- und Subsystementwürfe .....	244
9.4.2.2	Phase 3: Detaillierter Subsystementwurf .....	249

9.4.2.3	Phasen 4 und 5: Integration .....	253
9.5	Zusammenfassung .....	254
<b>10</b>	<b>Systematische Einbindung von Kunden in den Innovationsprozess</b> .....	<b>257</b>
	<i>Simon Bock, Johann Füller, Giordano Koch, Udo Lindemann</i>	
10.1	Notwendigkeit und Chancen der Kundeneinbindung in Zeiten der Digitalisierung .....	257
10.2	Öffnen des Innovationsprozesses durch Open Innovation .....	259
10.3	Kundeneinbindung in den Innovationsprozess .....	260
10.3.1	Phasen der Kundeneinbindung .....	260
10.3.2	Methoden zur Einbindung von Kunden und externen Akteuren .....	261
10.3.3	Ideen, Konzepte und Technologien .....	263
10.4	Von Mass Customization zum kundeninnovierten Produkt .....	265
10.5	Agile Entwicklungsprozesse .....	266
10.6	Produktarchitekturen adaptierbarer und individualisierbarer Produkte .....	272
10.7	Kostenbeurteilung adaptierbarer und individualisierter Produkte .....	275
<b>11</b>	<b>Industrie 4.0 und die Steigerung der Energieeffizienz in der Produktion</b> .....	<b>279</b>
	<i>Sebastian Thiede, Gerrit Posselt, Christoph Herrmann</i>	
11.1	Energieflüsse und Energieeffizienz in der Produktion .....	279
11.2	Cyber-physische Produktionssysteme im Kontext der Energieeffizienz .....	281
11.3	Energetransparente Maschinen .....	282
11.4	Energieeffizienz in der Prozesskette – Dynamischer Energiewertstrom .....	285
11.5	Energieeffizienz auf Fabrikebene .....	287
11.5.1	3D-Monitoring thermischer Emissionen .....	287
11.5.2	Multi-Level-Simulation .....	288
11.6	Zusammenfassung und Ausblick .....	290

**TEIL B**

**Mechatronische (cyber-physische) Automatisierungskomponenten**

<b>1</b>	<b>Das gentelligente Werkstück</b> .....	<b>295</b>
	<i>Berend Denkena, Marc-André Dittrich, Florian Uhlich, Lukas Maibaum, Tobias Mörke</i>	
1.1	Die Vision: Das gentelligente Werkstück .....	295
1.2	Die Vision: Einordnung gentelligenter Werkstücke .....	297
1.3	Die Umsetzung: Befähigung des Werkstücks .....	298
1.3.1	Daten erfassen .....	299
1.3.1.1	Sensorbasierte Datenaufnahme .....	299
1.3.1.2	Bauteilrandzonenbasierte Datenaufnahme .....	302
1.3.2	Werkstückidentifikation und inhärentes Speichern von Daten .....	304
1.3.3	Kommunikation .....	309
1.4	Anwendungen .....	311
1.4.1	Anwendung in der Fertigungsphase .....	311
1.4.2	Anwendung in der Nutzungsphase .....	316

<b>2</b>	<b>Das intelligente Werkzeug</b> .....	323
	<i>Michael Zäh, Philipp Rinck, Sebastian Pieczona, Eva Schaupp, Thomas Grosch, Eberhard Abele, Joachim Metternich</i>	
2.1	Das Werkzeug – bisher und zukünftig .....	323
2.2	Aktuelle Ansätze und Beispiele intelligenter Werkzeuge .....	324
2.2.1	Einstufung von Werkzeugen .....	324
2.2.2	Anwendungsfälle für intelligente Werkzeuge .....	325
2.2.3	Schnittstellen zur Einbindung eines intelligenten Werkzeugs .....	328
2.3	Werkzeugüberwachung .....	331
2.4	Intelligenter Werkzeugkreislauf .....	334
2.4.1	Motivation .....	334
2.4.2	Funktionsbausteine des Smart Tools .....	334
2.4.3	Fazit und Ausblick .....	339
<b>3</b>	<b>Die vernetzte Werkzeugmaschine</b> .....	341
	<i>Christian Brecher, Werner Herfs, Denis Özdemir, Markus Obdenbusch, Johannes Nittinger, Frederik Wellmann, Michael Königs, Christian Krella, Simon Sittig</i>	
3.1	Frontloading durch eine effizientere CAD-CAM-NC-Kette .....	343
3.1.1	Die CAD-CAM-NC-Kette .....	343
3.1.2	Automatisierungsmechanismen in heutigen CAM-Systemen .....	344
3.1.3	Weiterführende Ansätze in Forschung und Praxis .....	346
3.1.4	Zwischenfazit .....	349
3.2	Simulation des Prozess-Maschine-Verhaltens im Produktentstehungsprozess .....	349
3.2.1	Optimierung von NC-Programmen in der Arbeitsvorbereitung .....	351
3.2.2	Rückkopplung von Erkenntnissen in der Entwicklungsphase von Produktionsmitteln .....	355
3.2.3	Zwischenfazit .....	356
3.3	Big Data-Analysen im produzierenden Unternehmen .....	356
3.3.1	Integrative Vernetzung der CAD-CAM-NC-Kette .....	357
3.3.2	Prozessdatenrückführung und -kontextualisierung .....	359
3.3.3	Datenevaluation .....	360
3.3.3.1	Manuelle Prozessevaluation .....	360
3.3.3.2	Produktivitätssteigerungen .....	361
3.3.3.3	Automatisierte Evaluation und Qualitätsprognose .....	361
3.3.4	Zwischenfazit .....	362
3.4	Impulse von Industrie 4.0 auf das Condition-Monitoring von Werkzeugmaschinen .....	363
3.4.1	Vision der selbstüberwachenden Werkzeugmaschine .....	363
3.4.2	Maschinenkomponentenmodelle für die Gebrauchsdauerprognose .....	365
3.4.3	Integration in die Produktionslandschaft .....	368
3.4.4	Zwischenfazit .....	369
3.5	Neue Bedienkonzepte für die nutzerzentrierte Werkzeugmaschine .....	370
3.5.1	Konventionelle Bedienkonzepte .....	370
3.5.2	Neue Bedienkonzepte .....	371
3.5.3	Anforderungen an ein nutzerzentriertes Bedienkonzept .....	372
3.5.4	Touchscreen-Bedienung im Produktionsumfeld .....	372

3.5.5	Benutzerzentrierte Dialoggestaltung .....	374
3.5.6	Middleware .....	376
3.5.7	Zwischenfazit .....	376
3.6	Fazit .....	376
<b>4</b>	<b>Verarbeitungsanlagen und Verpackungsmaschinen</b> .....	<b>379</b>
	<i>Jens-Peter Majschak, Marc Mauermann, Tobias Müller, Christoph Richter, Marcel Wagner, Gunther Reinhart</i>	
4.1	Konsumgüterproduktion 4.0 .....	379
4.1.1	Anlagen zur Massenproduktion von Verbrauchsgütern .....	379
4.1.2	Trends im Lebensmittel- und Pharmabereich .....	381
4.1.3	Wandlungsfähige Verarbeitungsprozesse .....	383
4.2	Vom Stoffsystem zum Produkt in wandlungsfähigen Prozessketten .....	384
4.2.1	Wandlungsfähige Fließprozesse .....	384
4.2.2	Variationsebenen in Verarbeitungsanlagen .....	388
4.3	Elemente wandlungsfähiger Verarbeitungsanlagen .....	390
4.3.1	Der qualitätsgeführte Prozess .....	390
4.3.2	Qualitätsmaterial und Qualitätsprodukt .....	393
4.3.3	Wandlungsfähige Wirkpaarungen .....	395
4.4	Wandlungsfähige Verarbeitungsanlagen .....	399
4.4.1	Wandlungsfähige Anlagenstrukturen .....	399
4.4.2	Selbstüberwachende und selbstoptimierende Maschinen .....	403
4.4.3	Prozessintegrierte mechatronische Simulation .....	414
4.4.4	Aspekte der automatisierten Reinigung von wandlungsfähigen Anlagen .....	417
4.4.5	Bedienerassistenz .....	420
<b>5</b>	<b>Transfersysteme</b> .....	<b>429</b>
	<i>Klaus Dröder, Franz Dietrich, Alexander Tornow, Christian Löchte, Birk Wonnemberg, Roman Gerbers, Paul Bobka</i>	
5.1	Verkettung von Anlagen .....	430
5.1.1	Verkettung in der automatisierten Produktion .....	430
5.1.2	Flexibilisierung von Transfersystemen .....	431
5.1.3	Potential flexibler Verkettung in typischen Anordnungsstrukturen .....	432
5.1.4	Maximierung der Flexibilität von Transfersystemen am Beispiel des „Incremental Manufacturing“ .....	436
5.2	Roboterbasierte Transfersysteme .....	437
5.2.1	Sensorintegration in roboterbasierten Transfersystemen .....	438
5.2.2	Intuitive Programmierung von roboterbasierten Transfersystemen .....	439
5.2.3	Anwendungsbeispiel: Hochflexibler Werkstücktransfer „Griff in die Kiste“ .....	442
5.3	Greiftechnik in Transfersystemen .....	443
5.3.1	Funktionsintegrierte Greifsysteme .....	444
5.3.2	Anpassungsfähige Greifsysteme .....	447

<b>6</b>	<b>Logistik 4.0</b> .....	451
	<i>Christian Lieberoth-Leden, Marcus Röschinger, Johannes Lechner, Willibald A. Günthner</i>	
6.1	Digitalisierung und Vernetzung in der Supply Chain 4.0 .....	453
6.1.1	Einsatz intelligenter Ladungsträger am Beispiel der Lebensmittel-Supply Chain ....	454
6.1.2	Kollaboratives Lebenszyklusmanagement in der Cloud am Beispiel der Werkzeug-Supply Chain .....	460
6.2	Einsatz digitaler Werkzeuge in der Logistikplanung .....	465
6.2.1	Einsatz von Virtual Reality zur Planung manueller Kommissioniersysteme .....	466
6.2.2	Kollaborative Planung und Inbetriebnahme von Materialflusssystemen .....	471
6.3	Schnittstellen zur Einbindung des Menschen in digitale Logistikprozesse .....	475
6.3.1	Neue Formen des Informationsaustauschs für eine effizientere manuelle Kommissionierung .....	477
6.3.2	Assistenzsysteme für Staplerfahrer zur Darstellung und Erfassung von Prozessdaten .....	479
6.4	Steuerungskonzepte für automatisierte und flexible Materialflüsse in Produktion und Distribution der Industrie 4.0 .....	483
6.4.1	Effiziente Erstellung einer Steuerung für Materialflusssysteme durch automatische Softwaregenerierung .....	485
6.4.2	Verwendung einer verteilten Materialflussteuerung zur Realisierung von wandelbaren Materialflusssystemen .....	487
6.4.2.1	Verteilte Materialflussteuerung im Internet der Dinge der Intralogistik ...	489
6.4.2.2	Autonome Fördertechnikmodule zur Selbstkonfiguration der Materialflussteuerung .....	490
6.5	Einführung und Einsatz von RFID zur dezentralen Datenhaltung .....	497
6.5.1	Innovative Konzepte und Werkzeuge zur Einführung von RFID .....	499
6.5.2	Automatische Erfassung und Bereitstellung von Prozessdaten .....	507
<b>7</b>	<b>Montage 4.0</b> .....	513
	<i>Julian Backhaus, Veit Hammerstingl, Joachim Michniewicz, Cosima Stocker, Marco Ulrich, Gunther Reinhart</i>	
7.1	Motivation .....	513
7.2	Beispielprodukt und -anlage .....	515
7.2.1	Beispielprodukt .....	515
7.2.2	Beispielanlage .....	515
7.3	Lösungsneutrale Fähigkeitenbeschreibung .....	516
7.3.1	Begriffsbestimmung und Beispiele .....	516
7.3.2	Nutzen .....	519
7.3.3	Taxonomie der Fähigkeiten .....	520
7.4	CAD-Produktanalyse – Generierung von Produkthanforderungen .....	522
7.4.1	Assembly-by-Disassembly – Bestimmung von Montagereihenfolgen und -bewegungen .....	523
7.4.2	Bestimmung von quantitativen Prozessparametern .....	524
7.4.3	Bestimmung von Bauteilschnittstellen .....	525
7.5	Automatische Montageplanung .....	525
7.5.1	Einführung und Systemübersicht .....	525

7.5.2	Erzeugung des Fähigkeitenmodells einer Anlage mit bekanntem Layout .....	528
7.5.3	Anforderungen-Fähigkeiten-Abgleich – Automatische Montageplanung .....	529
7.5.3.1	Arten der Prüfung .....	530
7.5.3.2	Bestimmung von Sekundärprozessen .....	532
7.5.4	Beispielhafte Abgleichmodule .....	532
7.5.5	Automatische Ableitung von Handlungsempfehlungen .....	534
7.5.5.1	Produktorientierte Handlungsempfehlungen .....	534
7.5.5.2	Betriebsmittelorientierte Handlungsempfehlungen .....	535
7.5.6	Bewertung und Auswahl von Planungsalternativen .....	535
7.5.7	Automatische Erstellung von Montageanleitungen .....	536
7.6	Automatisierte Integration .....	536
7.6.1	Automatisierte Konfiguration von Produktionskomponenten (Plug & Produce) .....	536
7.6.1.1	Konzept zur Ad-hoc-Vernetzung heutiger Anlagenkomponenten .....	538
7.6.1.2	Automatisierte Generierung eines vereinheitlichten Fabrikabbildes .....	540
7.6.2	Zeitoptimale Bahnplanung von Robotersystemen .....	542
7.6.2.1	Selbst-Programmierung von Industrierobotern .....	542
7.6.2.2	Modellierung als Graph und Beschreibung im Konfigurationsraum .....	542
7.6.2.3	Praxisgerechte Methoden arbeiten stichprobenbasiert .....	543
7.6.2.4	Kollisionsdetektion als Flaschenhals .....	544
7.6.2.5	Optimierung der Fahrtzeit .....	544
7.6.2.6	Einsatz in der Montage .....	546
7.6.3	Aufteilung auf Zielsysteme und Codegenerierung .....	547
7.7	Automatisierte Hardwareauslegung am Beispiel von Zuführsystemen .....	548
7.7.1	Grundlagen .....	548
7.7.2	Physiksimulation .....	549
7.7.3	Randbedingungen .....	549
7.7.4	Simulationsgestützte Auslegung .....	550
7.7.5	Fertigung und Validierung .....	551
7.7.6	Fazit .....	552
7.8	Zusammenfassung .....	552
<b>8</b>	<b>Wandelbare modulare Automatisierungssysteme</b> .....	<b>555</b>
	<i>Dominic Gorecky, André Hennecke, Mathias Schmitt, Stephan Weyer, Detlef Zühlke</i>	
8.1	Die Automatisierungspyramide .....	555
8.1.1	Dezentrale Prozesssteuerung mittels <i>Smarter Produkte</i> .....	557
8.1.2	Konvergenz von Feld- und Steuerungsaufgaben mittels <i>Smarter Feldgeräte</i> .....	561
8.1.3	Vertikale Integration und cloudbasierte, modulare IT-Systeme .....	564
8.2	Smarte Vernetzung .....	566
8.2.1	Kommunikationsstandards für Industrie 4.0 .....	567
8.2.2	Ethernet in der Automatisierungstechnik .....	569
8.2.2.1	Echtzeitfähige Kommunikation mit Time Sensitive Networking .....	570
8.2.2.2	Software Defined Networking – Ein neues Netzwerkparadigma in der Automatisierungstechnik .....	571
8.2.2.3	Neue Kommunikationsstrukturen für Industrie 4.0-Netzwerke .....	575
8.2.3	Standards zur Informationsmodellierung in der Automatisierungstechnik .....	577

## TEIL C

### Anwendungsbeispiele

<b>1</b>	<b>Vernetzte Anlagen für die spanende Fertigung</b> .....	587
	<i>Jürgen Fleischer, Heinz Gaub, Heiner Lang, Markus Klaiber, Sebastian Schöning, Bastian Rothaupt</i>	
1.1	Flexible Kleinserienfertigung von Maschinenkomponenten .....	587
1.1.1	Randbedingungen und Fertigungsumfeld .....	587
1.1.2	Lösungsansatz für die vernetzte Fertigung .....	589
1.2	Lösungsassistenz in der vernetzten Großserienfertigung .....	591
1.2.1	Aufbau des Lösungsassistenten .....	591
1.2.2	Bedienerführung .....	592
1.2.3	Datenanalyse und Fehlerauswertung .....	592
1.3	Digitale Lösungen für Honsysteme .....	593
1.3.1	Honen in der Großserienfertigung .....	593
1.3.2	Fernwartungslösung für Honmaschinen .....	594
1.3.3	Cloudservices durch Maschinenanbindung .....	596
1.4	Fertigung von Maschinenkomponenten für Spritzgießmaschinen .....	597
1.4.1	Spritzgießmaschinen .....	598
1.4.2	Anlagen für die Fertigung der Maschinenkomponenten .....	599
1.4.3	Intelligente Fertigungsmittel .....	601
1.4.4	Vertikale und horizontale Vernetzung .....	601
1.4.5	Selbstorganisierende Transportprozesse .....	602
1.5	Fazit .....	603
<b>2</b>	<b>Montagesysteme: Skalierbare Automatisierung in der „Lernfabrik Globale Produktion“</b> .....	605
	<i>Gisela Lanza, Sebastian Greinacher, Fabio Echsler Minguillon</i>	
2.1	Die Lernfabrik im Kontext von Industrie 4.0 .....	605
2.1.1	Zielstellung der Lernfabrik Globale Produktion .....	605
2.1.2	Sichten auf Industrie 4.0 in der Lernfabrik .....	606
2.1.3	Aufbau der Lernfabrik .....	606
2.2	Das Konzept der skalierbaren Automatisierung .....	607
2.2.1	Herausforderungen der Automatisierung in der Montage .....	607
2.2.2	Prinzip der skalierbaren Automatisierung .....	608
2.2.3	Potenziale der skalierbaren Automatisierung .....	609
2.2.4	Fazit zum Konzept der skalierbaren Automatisierung .....	610
2.3	Umsetzung der skalierbaren Automatisierung in der Lernfabrik Globale Produktion .....	610
2.3.1	Skalierungsstufen in der Lernfabrik .....	610
2.3.2	Technische Umsetzung der skalierbaren Automatisierung in der Lernfabrik .....	616
2.4	Ausblick .....	620

<b>3</b>	<b>Verarbeitungstechnik</b> .....	621
	<i>Jens-Peter Majschak, Gunther Reinhart, Georg Götz, Christoph Richter, Marc Mauermann, Simon Berger, Marcel Wagner</i>	
3.1	Individualisierte Lebensmittelverarbeitung und -verpackung in Losgröße 1 – FORFood .....	621
3.1.1	Lebensmittelverarbeitung für die Herstellung einer kundenindividuellen Mahlzeit in Losgröße 1 .....	621
3.1.2	Formatflexible Verarbeitungsprozesse für ein kundenindividuelles Verpacken .....	623
3.1.3	Digital Moulding für ein formatflexibles Thermoformen .....	623
3.1.4	Flexibler Siegelprozess mittels Multi-Kontur-Werkzeugen .....	624
3.1.5	Automatisierte Herstellung von individualisierten Sammelpackungen .....	625
3.2	Automatische Feinerlegung von Schinken .....	626
3.2.1	Aufgabenstellung .....	626
3.2.2	Anlagenkonzept .....	627
3.2.3	Erfassung der Schinkeneigenschaften .....	628
3.2.4	Schnittreihenfolge .....	629
3.2.5	Referenz-Petri-Netze – Ansatz zur Modellierung und Simulation von Prozessschritten und Gesamtprozessen .....	630
3.2.6	Zusammenfassung .....	631
3.3	Kognitive Systeme im Druckgewerbe .....	631
3.3.1	Steigender Kostendruck im Druckgewerbe .....	631
3.3.2	Reduktion der Makulatur als potenzieller Stellhebel .....	631
3.3.3	Regelungskonzept .....	632
3.3.4	Technische Bewertung .....	633
3.3.5	Wirtschaftliche Bewertung für eine Offsetdruckmaschine .....	633
3.3.6	Zusammenfassung .....	634
<b>4</b>	<b>Anwendungsfeld Flugzeugbau</b> .....	635
	<i>Thorsten Schüppstuhl, Christian Schlosser</i>	
4.1	Betrachtung der Branche .....	635
4.1.1	Wirtschaftliche Randbedingungen .....	635
4.1.2	Technologische und organisatorische Besonderheiten .....	636
4.1.3	Industrie 4.0-Ansätze und Ist-Situation .....	636
4.2	Befähigertechnologien für bedeutende Aufgaben .....	638
4.2.1	Rumpfsektionenmontage .....	638
4.2.2	Turbinenschaufelmontage .....	639
4.2.3	Brennkammerinspektion .....	640
4.3	Befähigende Querschnittstechnologien .....	642
4.3.1	Mobile Roboter für die Rumpf-Außenstruktur .....	642
4.3.2	Ortsflexibles Robotersystem für Bearbeitungsaufgaben .....	644
4.3.3	Mensch-Maschine-Systeme .....	645
4.4	Integrationstechnologien .....	647
4.4.1	Ziele und Ansätze .....	647
4.4.2	Beispiele für Lösungsansätze .....	648
4.4.3	Unterstützung der Integration .....	650

<b>5</b>	<b>Intelligent vernetzte Elektronikproduktion</b> .....	653
	<i>Eva Bogner, Christopher Kästle, Jörg Franke, Gunther Beitinger</i>	
5.1	Elektronische Systeme sind Grundlage und Vorbild für das Internet der Dinge .....	653
5.1.1	Die Befähiger des Internets der Dinge basieren auf fortschrittlichen elektronischen Aufbautechnologien .....	653
5.1.2	Die Produktion elektronischer Systeme ist Vorbild für die Digitalisierung der Fabrik	655
5.2	Vollautomatisierung von Fertigung und Materialfluss .....	659
5.2.1	Prozess- und Informationsautomatisierung .....	659
5.2.2	Traceability .....	661
5.2.3	Identifikation und Vernetzung zu CPS .....	663
5.3	Dynamische Wertschöpfungsketten .....	665
5.3.1	Individuelle Produktkonfiguration .....	665
5.3.2	Optimierte Auftragsabwicklung .....	666
5.3.3	Flexible Produktionssysteme .....	668
5.4	Nullfehler-Produktion .....	671
5.4.1	Qualitätssicherung .....	671
5.4.2	Big Data versus Smart Data .....	673
5.4.3	Mensch-Maschine-Interaktion .....	676
5.5	Durchgängige Informationssysteme .....	678
5.5.1	Produktentwicklung .....	678
5.5.2	CAD/CAM-Kopplung .....	680
5.5.3	Anbindung an das Manufacturing Execution System .....	683
5.6	Referenzmodell .....	684
5.6.1	Entwicklung zum Digital Enterprise .....	685
5.6.2	Greenfield- und Brownfield-Ansatz .....	687
5.6.3	Beispiel: Siemenswerke in Amberg und Chengdu .....	687
<b>6</b>	<b>Die SmartFactory für individualisierte Kleinserienfertigung</b> .....	691
	<i>Stephan Weyer, Fabian Quint, Stefanie Fischer, Dominic Gorecky, Detlef Zühlke</i>	
6.1	SmartFactory <sup>KL</sup> -Systemarchitektur .....	693
6.1.1	Konzeption der Systemarchitektur .....	693
6.1.2	Systemarchitektur – Anforderungen und Spezifikationen .....	694
6.2	Umsetzung der Systemarchitektur .....	697
6.2.1	Produktschicht .....	698
6.2.2	Produktionsschicht .....	699
6.2.3	Versorgungsschicht .....	701
6.2.4	Integrationsschicht .....	702
6.2.5	IT-Systemschicht .....	702
6.3	Anwendungsszenario .....	703
6.4	Zusammenfassung und Ausblick .....	706

<b>7</b>	<b>Anwendungsfeld Automobilindustrie</b> .....	709
	<i>Gunther Reinhart, Dino Knoll, Ulrich Teschemacher, Gregor Lux, Joscha Schnell, Florian Endres, Fabian Distel, Christian Seidel, Christoph Berger, Jan Klöber-Koch, Julia Pielmeier, Stefan Braunreuther</i>	
7.1	Big Data Analytics in der Produktionslogistik am Beispiel der Materialflussanalyse .....	710
7.1.1	Analytics-Technologien und der Digitale Schatten in der Produktionslogistik .....	710
7.1.2	Materialflussanalyse im Digitalen Schatten .....	711
7.1.3	Fazit und Ausblick .....	711
7.2	Logistik 4.0 – Optimierungsverfahren zur Steigerung der Dynamik .....	712
7.2.1	Motivation .....	712
7.2.2	Zielsetzung .....	712
7.2.3	Vorgehensweise .....	712
7.2.4	Ergebnisse .....	713
7.3	Selbst-Kalibrierung roboterbasierter Messsysteme .....	714
7.3.1	Ausgangssituation .....	714
7.3.2	Zielsetzung .....	714
7.3.3	Vorgehensweise .....	715
7.3.4	Ergebnisse .....	716
7.4	Data Mining in der Batterieproduktion für die Elektromobilität .....	716
7.5	Digitale Produktion mittels additiver Fertigungsverfahren .....	718
7.5.1	Additive Fertigung und Industrie 4.0 .....	718
7.5.2	Kurzüberblick zu aktuellen Prozesskategorien der Additiven Fertigung .....	719
7.5.3	Case Study – Additive Fertigung von Zahnrädern .....	719
7.6	Konzeption sowie Umsetzung einer Trainingsumgebung zur Qualifikation von Instandhaltern im Umfeld Industrie 4.0 .....	720
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	725

# Der Herausgeber



## **Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart**

ist Ordinarius für Betriebswissenschaften und Montagetechnik an der Technischen Universität München. Er studierte Maschinenbau mit dem Schwerpunkt Konstruktion & Entwicklung und promovierte bei Prof. Dr.-Ing. J. Milberg am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der Technischen Universität München. Danach war er leitender Angestellter in verschiedenen Funktionen bei der BMW AG in München und Dingolfing. 1993 wurde Prof. Reinhart auf den Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik an der Technischen Universität München und in die Leitung des iwb berufen.

Von März 2002 bis Februar 2007 war Herr Reinhart von seinen Tätigkeiten am *iwb* beurlaubt und übernahm die Aufgabe des Vorstandes für Technik und Markt bei der *IWKA Aktiengesellschaft* in Karlsruhe, einem Maschinenbaukonzern mit ca. 13 000 Mitarbeitern weltweit. Dabei widmete er sich insbesondere der globalen Erschließung neuer Märkte, der Einrichtung eines Produktionssystems und dem Ausbau der *IWKA Verpackungstechnik-Gruppe*.

Seit 2007 ist er wieder zurück an der Technischen Universität München und leitet gemeinsam mit Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh das zwischenzeitlich auf weit über 100 Mitarbeiter gewachsene Institut an den Standorten Garching bei München und Augsburg. Gleichzeitig ist er Vorstandsvorsitzender des *Bayerischen Clusters für Mechatronik und Automation e. V.*

Seit 2016 ist Prof. Reinhart darüber hinaus geschäftsführender Leiter des *Fraunhofer IGCV* in Augsburg (Fraunhofer Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik). Dieses Institut beschäftigt sich mit den Bauweisen und der Verarbeitung des hybriden Leichtbaus in intelligent vernetzten Produktionsstrukturen.

Herr Reinhart ist Wissenschaftlicher Beirat der *nationalen Plattform Industrie 4.0*, Themensprecher der Plattform Digitale Produktion des *Zentrums Digitalisierung Bayern* und Leiter des *Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrums Augsburg*. Er unterstützt mehrere Organisationen und Unternehmen als Beirat und Aufsichtsrat.

Darüber hinaus ist er Mitglied bei zahlreichen wissenschaftlichen Gesellschaften und Akademien (*acatech* - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, *WGP*, *CIRP*, *WiGeP* und *WG-MHI*). Er hat ca. 800 Veröffentlichungen in führenden Fachzeitschriften publiziert und ist Autor bzw. Herausgeber von zwölf Büchern und zwei Buchreihen. Er hat weit über 100 wissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zur Promotion geführt.

**Christian Lieberoth-Leden, Marcus Röschinger,  
Johannes Lechner, Willibald A. Günthner**

Die Rolle der Logistik in der Industrie 4.0 ist so vielfältig und bedeutsam wie die Logistik selbst. Dabei werden die Aufgaben der Logistik auch im vierten industriellen Zeitalter, also die Aufgaben der Logistik 4.0, grundlegend dieselben bleiben. So wird die Logistik stets eine wichtige Schnittstellenfunktion darstellen, die für die Verfügbarkeit des richtigen Gutes in der richtigen Menge, im richtigen Zustand, am richtigen Ort, zur richtigen Zeit, für den richtigen Kunden, zu den richtigen Kosten und zur richtigen Qualität verantwortlich ist. Der Fokus der Logistik 4.0 liegt daher im Einsatz neuer und innovativer Technologien. Schließlich können hierdurch verschiedene logistische Kennzahlen, wie z. B. Liefertreue, -qualität, -flexibilität, -fähigkeit und Servicegrad, weiter optimiert

werden. Für die Logistik 4.0 müssen in der Folge neue Konzepte für die Planung, Steuerung, Realisierung und Kontrolle von Material- und Informationsflüssen erstellt und umgesetzt werden. In diesem Kontext gilt es, alle Ebenen der Unternehmenslogistik (Bild 6.1) zu betrachten und geeignete Technologien für Optimierungen zu identifizieren. Lösungen für die Logistik 4.0 adressieren dabei nicht nur innerbetriebliche Prozesse, sondern gleichermaßen auch überbetriebliche. Beispielsweise erfordern die immer komplexer und globaler werdenden Wertschöpfungsketten und -netzwerke neue Ansätze im Supply Chain Management, um die effizientere Koordination der Material- und Informationsflüsse von Rohstofflieferanten bis zum Kunden zu ermöglichen.



**Bild 6.1**

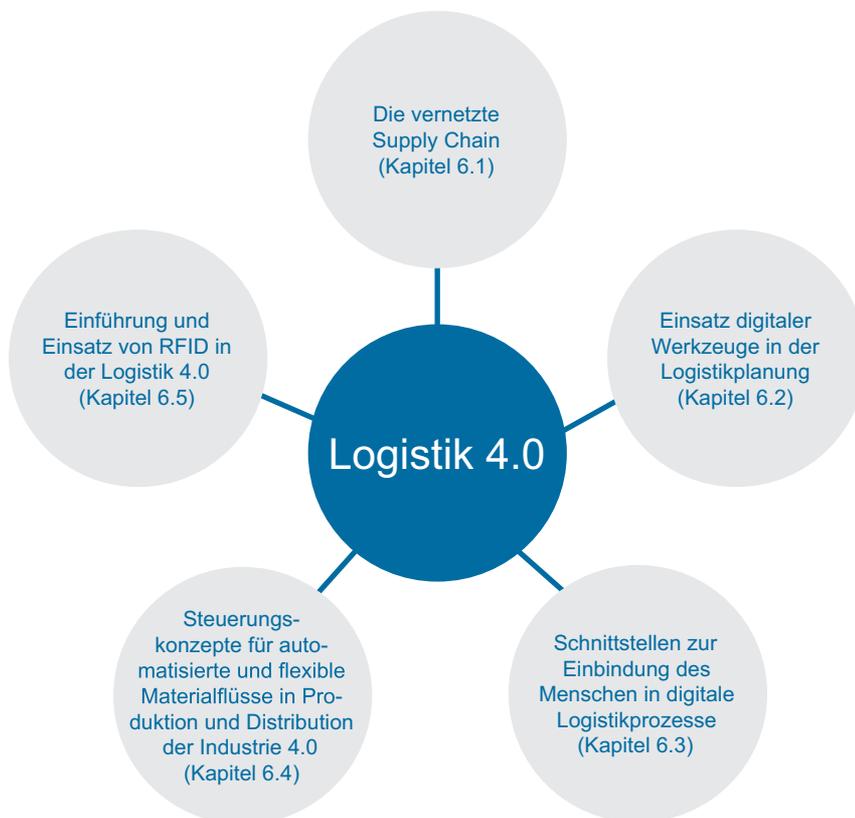
Logistik 4.0 adressiert alle Ebenen der klassischen Unternehmenslogistik (Quelle: Lehrstuhl fml, Technische Universität München)

Aus technischer Perspektive betrachtet, zielt die Logistik 4.0 nach der bereits erfolgten Mechanisierung und Automatisierung auf die Digitalisierung und Virtualisierung von Fördertechnikgeräten und Materialflussanlagen ab. Diese sollen schließlich nicht mehr nur schlanke und selbststeuernde, sondern vielmehr kognitive Logistikprozesse und -systeme ermöglichen, welche sich unter anderem durch Lernfähigkeit, Intelligenz und Entscheidungsfähigkeit auszeichnen. Als Ausgangsbasis für die Logistik 4.0 dienen hierbei die Konzepte und Erfahrungen aus dem Internet der Dinge und Dienste in der Intralogistik (Günthner 2010). So wird auch hier die Grundidee verfolgt, dass sich logistische Objekte, wie Behälter, Werkstücke oder Pakete, selbstständig ihren Weg durch das Logistiksystem bahnen. Zu diesem Zweck kommunizieren die Objekte untereinander und mit technischen Einrichtungen wie Fördertechnikmodulen oder Maschinen, welchen sie mitteilen, was mit ihnen geschehen soll. Ein wesentliches Charakteristikum derartiger Systeme besteht in deren ausgeprägter Dezentralität und Modularisierung. So können Systemelemente steuerungstechnisch einfach miteinander gekoppelt werden und folglich eine neue Systemkonfiguration realisieren. Aufgrund des dezentralen Steuerungsansatzes ist der Aufwand für die Anpassung der Steuerung an die neue Konfiguration äußerst gering. Für das Gesamtsystem ergibt sich somit ein hoher Grad an Wandelbarkeit. Dies sind wichtige Eigenschaften, um aktuellen Rahmenbedingungen wie der zunehmenden Individualisierung von Produkten, einer steigenden Variantenvielfalt und kürzeren Produktlebenszyklen Rechnung zu tragen.

Neben dem Internet der Dinge wird innerhalb der Industrie 4.0 auch das Internet der Dienste von entscheidender Bedeutung sein. So stellen Software-Services bestimmte Funktionen zur Verfügung und unterstützen hierdurch verschiedene Prozesse. Im Falle von operativen Prozessen können Dienste beispielsweise für die Koordination des Materialflusses eingesetzt werden, indem sie den intelligenten Objekten Informationen für deren Entscheidungsfindung bereitstellen. Weitere Dienste adressieren Prozesse in der Planung und bieten hierfür unterstützende Funktionen und Tools. Eine wichtige Eigenschaft und gleichzeitig ein großer Vorteil der Serviceorientierung, also der informationstechnischen und organisatorischen Integration von Diensten in Unternehmensprozesse, besteht darin, dass diese aufwandsarm an neue Randbedingungen angepasst werden können. So stehen die Dienste nicht

nur unabhängig von Systemkonfigurationen, Standorten und Zeiten zur Verfügung, sondern werden oftmals webbasiert, zum Beispiel aus einer Cloud, bereitgestellt, was den Einsatz von verschiedenen Endgeräten, wie Tablets und Smartphones, auch in operativen Bereichen ermöglicht.

Um die Zielstellungen und Potenziale der Logistik 4.0 zu präzisieren, werden in den folgenden Unterkapiteln ausgewählte Anwendungen betrachtet und greifbare Handlungsempfehlungen präsentiert. Hierzu werden verschiedene Aspekte der Logistik 4.0 betrachtet (Bild 6.2). Für diese werden innovative Lösungen und Konzepte beschrieben, welche auf andere Anwendungsfälle übertragbar sind und somit zu einer Umsetzung der Logistik 4.0 beitragen. Dabei liegt in Kapitel 6.1 der Fokus zunächst auf unternehmensübergreifenden Prozessen. Zum einen wird in diesem Kontext ein Konzept für das überbetriebliche Behältermanagement mittels intelligenter Behälter vorgestellt. Zum anderen wird eine Cloud-Lösung für das industrielle Werkzeugmanagement präsentiert, welche Dienste für die zugehörigen Prozesse bereitstellt und durchgängige Informationsflüsse in und zwischen allen am Werkzeug-Lebenszyklus beteiligten Unternehmen erlaubt. Aspekte der intensiveren unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit werden auch in Kapitel 6.2 adressiert. Hier liegt der Fokus auf der kollaborativen Planung von Materialflusssystemen. Hierzu wird eine Software-Plattform präsentiert, welche synchrone Planungsaktivitäten ermöglicht, wie zum Beispiel die parallele und unternehmensübergreifende Erstellung und Anpassung eines Layouts. Zudem wird auf die Potenziale der Virtual Reality-Technologie eingegangen und gezeigt, wie diese für die effiziente und transparente Planung von manuellen Kommissioniersystemen ausgeschöpft werden können. Kapitel 6.3 widmet sich daraufhin neuartigen Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine, um digitale Logistikprozesse zu ermöglichen. So wird beschrieben, wie eine effizientere Bereitstellung von Informationen mittels Augmented Reality-Technologie gelingen kann und den Menschen bei der Ausführung seiner Tätigkeiten unterstützt. Auf die Umsetzung von wandelbaren Materialflusssystemen wird in Kapitel 6.4 eingegangen. Hierbei werden dezentrale und zentrale Steuerungsansätze gegenübergestellt und die jeweiligen Systemarchitekturen genauer betrachtet. Ein wichtiger Bestandteil in automatischen Materialflusssystemen, unabhängig von deren Steuerungsansatz, sind identifizierbare Objekte. Da in die-

**Bild 6.2**

Inhalte dieses Kapitels in der Übersicht  
(Quelle: Lehrstuhl fml, Technische Universität München)

sem Zusammenhang die funkbasierte automatische Identifikation und Lokalisierung große Potenziale bieten, wird dem Einsatz der RFID-Technologie in der Logistik 4.0 das Kapitel 6.5 gewidmet. Dabei werden auch Konzepte und Werkzeuge vorgestellt, welche die optimierte Auslegung und effiziente Inbetriebnahme der Identifikationssysteme ermöglichen.

## 6.1 Digitalisierung und Vernetzung in der Supply Chain 4.0

Wesentliche Zielstellungen der Industrie 4.0 sind die vertikale und horizontale Integration von Prozessen und IT-Systemen. Dabei wird unter vertikaler Integration unter anderem das Verschmelzen der einzelnen Hierarchieebenen der klassischen Automatisierungspyramide in ein durchgängiges IT-System verstanden. Die horizontale Integration hingegen zielt ab auf die

konsequente informationstechnische Vernetzung verschiedener Prozessschritte, auch über Unternehmensgrenzen hinweg. Somit gilt es, bei der Konzeption entsprechender Lösungen neben internen Prozessen auch angeschlossene und übergreifende Prozesse in anderen Unternehmen zu berücksichtigen. Hierdurch steigt die Transparenz in der gesamten Supply Chain an, wodurch schließlich die Sicherheit und Stabilität der Prozesse erhöht werden kann (Kagermann 2013). Im Folgenden soll daher der Fokus auf der horizontalen Integration liegen und dargestellt werden, wie Prozesse, vor allem im unternehmensübergreifenden Umfeld, im Kontext der Logistik 4.0 vernetzt werden können und welche Potenziale sich hieraus ergeben.

Das übergeordnete Ziel der Vernetzung besteht darin, nicht nur die physischen Prozesse optimal aufeinander abzustimmen, also z. B. die rechtzeitige Bereitstellung von Material sicherzustellen, sondern die Prozesse auch auf digitaler Ebene zu integrieren. Als wichtige Aufgabenstellung lässt sich hierbei die durchgängige Gestaltung von Informationsflüssen identifizieren. Nur wenn jedem Prozessschritt in der Supply Chain die benötigten Daten rechtzeitig und in der richtigen Form

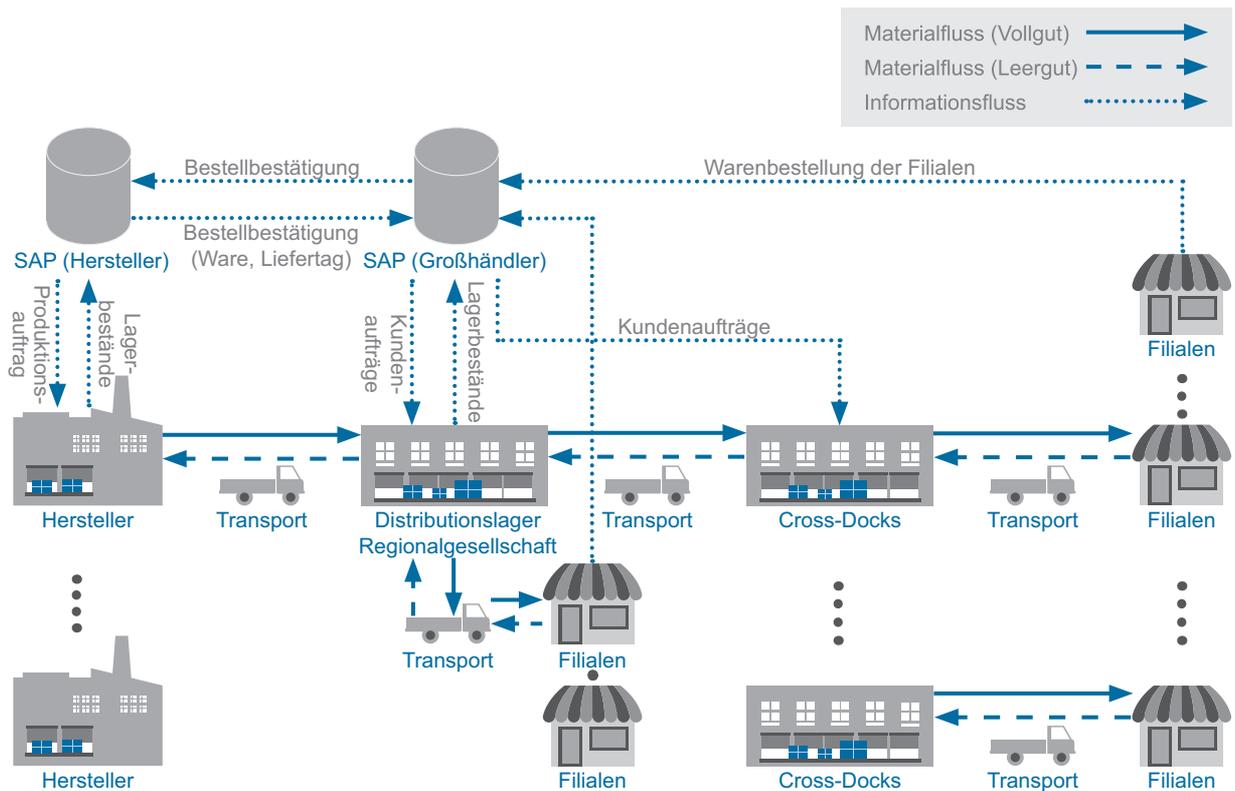
bereitstehen, kann dieser optimal ausgeführt werden. Um dies zu ermöglichen, sind mediale Brüche, wie sie z.B. bei der händischen Datenübertragung zwischen verschiedenen Systemen entstehen, im Informationsfluss zu vermeiden und Daten konsistent und stets aktuell für alle Prozessschritte verfügbar zu machen. Eine wichtige Voraussetzung hierfür stellt die Digitalisierung von Prozessen dar, was nicht nur das Vorhalten digitaler Daten, sondern auch deren automatische Erfassung und Übertragung umfasst.

Um aufzuzeigen, wie die digitale Vernetzung in der Supply Chain gelingen kann, werden in den beiden folgenden Unterkapiteln entsprechende Lösungskonzepte vorgestellt. Diese wurden zwar für konkrete Anwendungsfälle entwickelt, nämlich die Lebensmittel- und Werkzeug-Supply Chain, sind jedoch zu großen Teilen auf andere Problemstellungen übertragbar. So wird zum einen verdeutlicht, wie bestehende Objekte mit Intelligenz ausgestattet werden, sich somit aktiv an der Steuerung von logistischen Prozessen beteiligen und schließlich deren Vernetzung ermöglichen können. Zum anderen wird ein Ansatz für die konsistente Datenerhaltung in einer Cloud-Plattform diskutiert, von der

aus benötigte Daten automatisch allen Prozessschritten in der Supply Chain bereitgestellt werden können. Die Eignung beider Ansätze für die durchgängige Vernetzung unternehmensinterner und übergreifender Prozesse wird im Weiteren dargelegt.

### 6.1.1 Einsatz intelligenter Ladungsträger am Beispiel der Lebensmittel-Supply Chain

Die Vernetzung entlang der Supply Chain bietet große Potenziale hinsichtlich der Effizienzsteigerung unternehmensinterner und -übergreifender Prozesse. Um diese Aussage zu konkretisieren, wird in diesem Kapitel die Lebensmittel-Supply Chain (Bild 6.3) betrachtet und ein Lösungskonzept vorgestellt, das den Einsatz intelligenter Behälter für die Prozesssteuerung und -überwachung fokussiert. Basierend auf aktuellen Forschungsergebnissen und prototypischen Umsetzungen in der industriellen Praxis (Prives 2014; Wang 2014), wird im Folgenden sowohl auf die technische Ausgestaltung, also die Ausstattung von Behältern mit intelligenten Komponenten, als auch den Aufbau einer geeigneten Infrastruktur für die Datenerfassung und



**Bild 6.3** Aufbau der Lebensmittel-Supply Chain und übergeordnete Prozesse (Quelle: Lehrstuhl fml, Technische Universität München)

-verarbeitung eingegangen. Warum eine engere Zusammenarbeit und Vernetzung in der Lebensmittel-Supply Chain erstrebenswert ist, zeigt ein Blick auf die aktuelle Ausgangssituation. So wirken sich die Logistikkosten stark auf den Preis von Lebensmitteln für den Endverbraucher aus. Vor dem Hintergrund des hohen Konkurrenzdrucks sind diese somit ein wichtiger Stellhebel, um langfristig Gewinne erzielen zu können. In diesem Kontext gilt es zudem durch die Logistik sicherzustellen, dass Produkte für den Endverbraucher stets verfügbar sind. Dies und mitunter sehr niedrige Verfallsdaten erfordern eine schnelle Abwicklung der mehrstufigen Logistikprozesse sowie kurze Durchlaufzeiten.

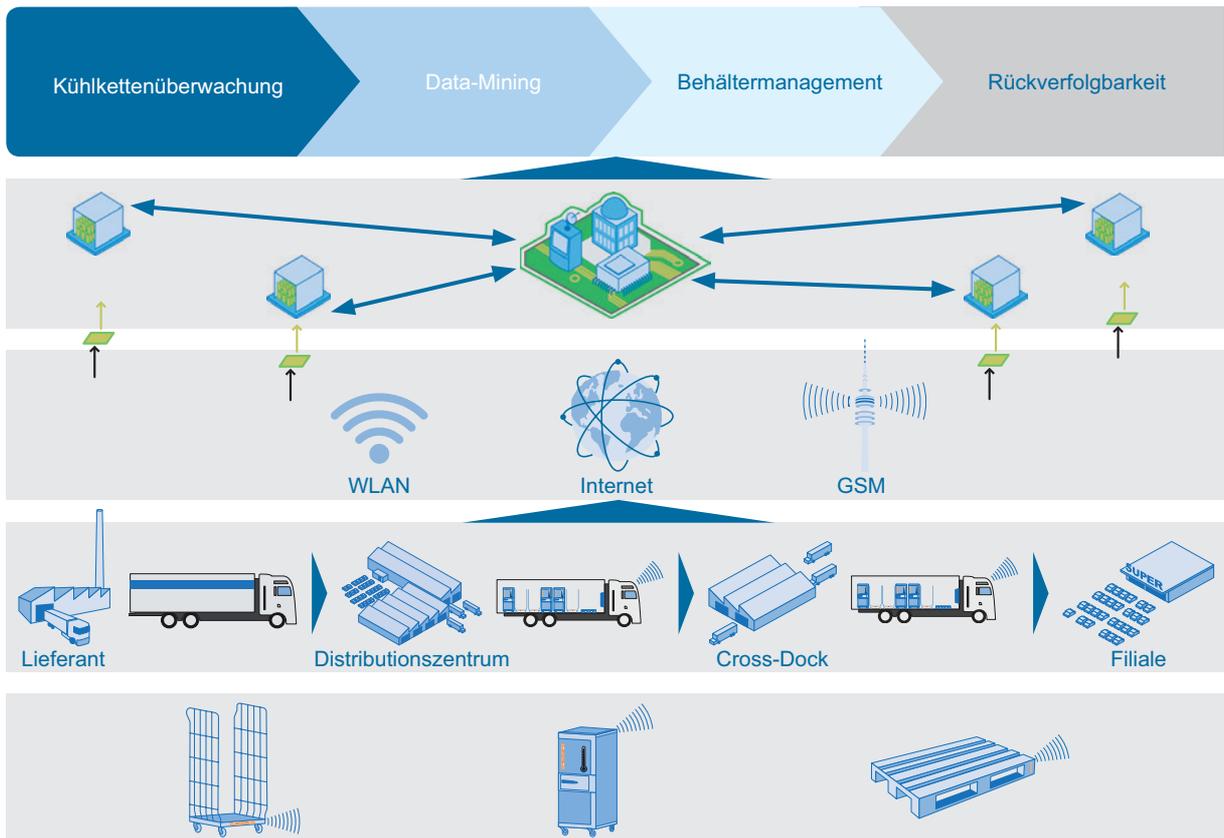
Es wird also ersichtlich, dass effiziente Logistikprozesse eine wesentliche Voraussetzung darstellen, um in der Lebensmittelbranche erfolgreich zu sein. Hierzu gilt es, die Prozesse in den einzelnen Gliedern der Supply Chain nicht losgelöst voneinander zu optimieren. Vielmehr müssen Lösungen entwickelt werden, die die Anforderungen aller Beteiligten gleichermaßen berücksichtigen. Somit kann schließlich nicht nur die Effizienz von Prozessen, sondern auch die Transparenz in der Supply Chain gesteigert werden. Dies ist ein wichtiger Aspekt, auch da die Rückverfolgbarkeit von Lebensmitteln von hoher Bedeutung ist und entsprechende Dokumentationen von Warenein- und -ausgängen vorgeschrieben sind. Hierzu müssen die einzelnen Unternehmen verstärkt zusammenarbeiten. Nur auf diese Weise können im Falle von festgestellten Qualitätsmängeln Lebensmittel aufwandsarm zurückgerufen und somit sowohl die Verbraucher als auch die Hersteller vor größerem Schaden geschützt werden. Vor dem Hintergrund diverser Warenumschläge (z.B. in Distributionszentren und Cross-Docks) und eines hohen Transportaufkommens geht mit diesen verpflichtenden Dokumentationen jedoch ein hoher – meist manueller – Aufwand einher. Dieser steigt für gekühlte und tiefgekühlte Produkte weiter an, da hier zusätzlich Temperaturdaten erfasst und protokolliert werden müssen. Nur auf diese Weise kann die Einhaltung der Kühlkette kontrolliert und nachgewiesen werden. Allerdings ist es aktuell oftmals schwierig nachzuvollziehen, wo sich welche Behälter in der Supply Chain befinden. Da erst nach aufwendigen Inventuren zuverlässige Aussagen über den tatsächlichen Standort, Zustand und Bestand möglich sind, werden in der Regel mehr Behälter als nötig in der Supply Chain vorgehalten. Durch die Integration von automatischen Erfas-

zungssystemen an entsprechenden Stellen kann diesem Informationsmangel entgegengewirkt werden. Zudem können durch derartige Systeme weitere Tätigkeiten, die aktuell vor allem manuell durchgeführt werden, automatisiert werden. Beispiele hierfür sind die Identifikation, Vollständigkeitskontrolle und Protokollierung von Versandeinheiten oder Lieferungen.

Aus der skizzierten Ausgangssituation wird deutlich, dass auf Basis einer automatischen Erfassung sowie sicheren Speicherung und Übertragung von Daten, z.B. Temperaturen, Standorte und Transportmengen, die Transparenz und Effizienz in der Lebensmittel-Supply Chain gesteigert werden kann. Aufbauend auf einer konsistenten Datenbasis können daraufhin neue Funktionen wie die automatische Kühlkettenüberwachung und Rückverfolgung von Lebensmitteln realisiert werden. Diese Aspekte stellen die Grundlage für eine gelungene horizontale Integration in der Lebensmittel-Supply Chain dar und werden im Lösungskonzept, das im Folgenden genauer betrachtet wird, berücksichtigt. Bild 6.4 zeigt hierzu zunächst einen Überblick über das Gesamtkonzept und unterteilt dieses in fünf Gestaltungsebenen. Dabei adressieren die beiden unteren Ebenen die notwendige Hardware, wie intelligente Behälter und Geräte für den Aufbau einer geeigneten Kommunikationsinfrastruktur. Darauf aufbauend wird in den drei Software-Ebenen festgelegt, wie die Daten ausgetauscht werden (z.B. Übertragungsprotokolle), welche Datenbankstrukturen geeignet sind und wie Daten ausgewertet und zu nützlichen Informationen aggregiert werden können. Basierend auf dieser Unterscheidung in Hardware- und Software-spezifische Aspekte gliedern sich die folgenden Ausführungen in zwei Unterkapitel.

### **Physische Elemente im System intelligenter Behälter**

Wann ist ein Behälter intelligent? Auch wenn es als Antwort auf diese Frage keine allgemeingültige Definition gibt, weisen intelligente Behälter typischerweise einige der folgenden Charakteristika und Systemelemente auf. Zunächst sind intelligente Behälter in der Lage, durch integrierte Sensoren verschiedene Daten selbstständig zu erfassen. Hierbei kann es sich sowohl um Umwelt- bzw. Umgebungsdaten, Zustandsdaten als auch Daten bezüglich des Inhalts handeln. Da die reine Erfassung und Speicherung von Daten im Anwendungskontext nur einen geringen Mehrwert bringt, besteht ein weiteres wichtiges Merkmal intelligenter



**Bild 6.4** Gesamtkonzept und Gestaltungsebenen für die Integration von intelligenten Behältern in die Lebensmittel Supply Chain (Quelle: Lehrstuhl fml, Technische Universität München)

Behälter in der Verarbeitung der erfassten Daten. Hierzu werden die Behälter mit Rechenkapazität ausgestattet, z.B. durch Integration von Mikrocontrollern. Basierend auf implementierten Entscheidungslogiken können die Behälter somit Daten auswerten und autonom Entscheidungen treffen. Hierdurch ist es schließlich möglich, dass Behälter ihren Weg durch die Supply Chain nicht nur selbst überwachen, sondern unter Berücksichtigung aktueller Zustände und Randbedingungen aktiv steuern. Da Entscheidungen also dezentral im jeweiligen Prozessschritt getroffen werden, sinkt der Koordinationsaufwand innerhalb der gesamten Supply Chain und es entsteht ein Internet der Dinge aus intelligenten Behältern. In diesem Zusammenhang wird eine weitere wesentliche Eigenschaft von intelligenten Behältern ersichtlich, nämlich die Kommunikationsfähigkeit. Hierunter fällt einerseits der Datenaustausch mit anderen am Prozess beteiligten Objekten, wie z.B. Förder- und Handhabungseinrichtungen, sowie mit übergeordneten IT-Systemen. Der Datenaustausch erfolgt hierbei in der Regel drahtlos, wozu z.B.

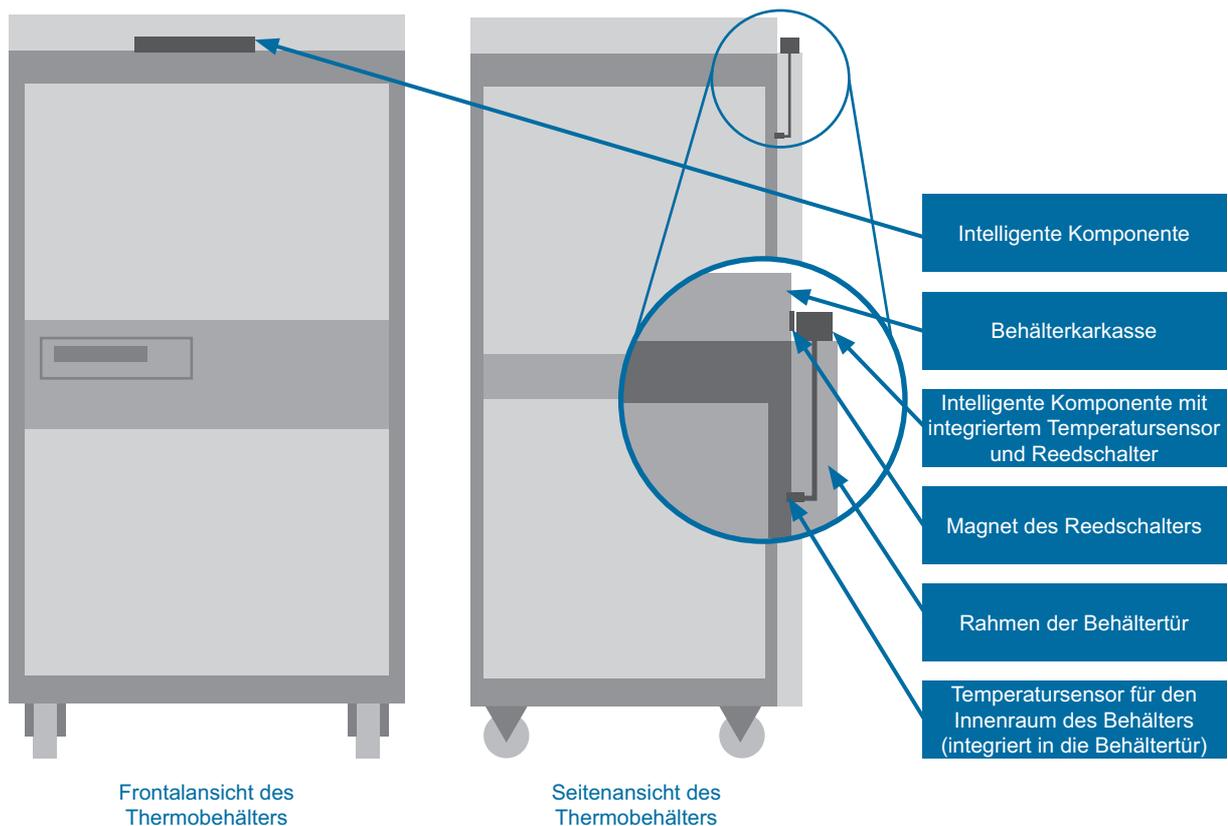
Funk- oder RFID-Module in die Behälter eingebaut werden. Andererseits sehen einige Konzepte intelligenter Behälter einen direkten Datenaustausch mit am Prozess beteiligten Menschen vor. So können diese, beispielsweise durch visuelle oder auditive Signale, bezüglich des aktuellen Zustands des Behälters informiert und gegebenenfalls zum manuellen Eingreifen aufgefordert werden.

Für den Einsatz in der Lebensmittelbranche, in der die Rückverfolgbarkeit und insbesondere die Überwachung der Kühlkette von sehr hoher Bedeutung ist, zeigt Bild 6.5 einen mit intelligenten Modulen ausgestatteten Thermobehälter. Er verfügt über mehrere Temperatursensoren, welche die exakte Erfassung der Lufttemperatur sowohl im Inneren des Behälters als auch in dessen Umgebung ermöglichen. Die erfassten Temperaturwerte werden in einem integrierten Speicher abgelegt und von einem Mikrocontroller verarbeitet, wodurch die Überwachung der Einhaltung der Kühlkette auf Behälterebene realisiert werden kann. Weiterhin ist es möglich, Temperaturverläufe aufzu-

zeichnen, auszuwerten und deren weitere Entwicklung zu prognostizieren. Somit kann der Thermobehälter bereits vor dem Eintreten kritischer Temperaturen, die im schlimmsten Fall eine Entsorgung der Lebensmittel bedingen, einen Warnhinweis kommunizieren. Durch die Erfassung und Aufzeichnung der Außentemperatur kann zudem transparent rückverfolgt werden, ob sich der Behälter jederzeit in geeigneten Räumen, wie z. B. gekühlten Lagerzonen und Transportcontainern, befunden hat. Weitere Sensoren dienen zur Erfassung der Luftfeuchtigkeit und Vibration im Behälter, welche zu einer Beschädigung der Ware führen können.

Wie bereits erwähnt, werden die erfassten Daten von einem integrierten Mikrocontroller weiterverarbeitet. Eine weitere Aufgabe dieses Systemelements besteht in der Steuerung der Kommunikation mit Objekten der Prozessinfrastruktur und den daran beteiligten Menschen. Letzteren gilt es in erster Linie, den aktuellen Zustand des Behälters und der darin befindlichen Lebensmittel möglichst transparent und einfach darzustellen. Zu diesem Zweck sind am Thermobehälter Leuchtdioden angebracht, die vom Mikrocontroller an-

gesteuert werden. Beispielsweise kann den Mitarbeitern auf diese Weise signalisiert werden, dass eine kritische Temperaturgrenze überschritten worden und ein sofortiges Eingreifen nötig ist. Über denselben Ansatz kann auch die durchgehende Energieversorgung des intelligenten Behälters sichergestellt werden, zumal die Mitarbeiter frühzeitig auf einen geringen Batterieladezustand hingewiesen werden können, ohne dass sie spezielle Anzeigen aufrufen oder Messungen durchführen müssen. Die Kommunikation mit der Infrastruktur erfolgt hingegen automatisch und drahtlos auf Basis von RFID im UHF-Bereich. Diese Technologie zeichnet sich durch hohe Lesereichweiten aus und ist in der Logistik weit verbreitet (siehe auch Kapitel 6.5). Der umgesetzte Thermobehälter bedient sich dieser Vorteile, wobei sich die Kommunikation in zwei Stufen unterteilen lässt. So werden die Daten, die vom Behälter übertragen werden sollen, zunächst in den internen Speicher des in den Behälter integrierten RFID-Transponders geschrieben. Hierzu stehen entsprechende Schnittstellen und Übertragungsprotokolle zwischen Sensoren, Mikrocontroller und Speicher zur Verfü-



**Bild 6.5** Skizze des intelligenten Thermobehälters für die Lebensmittelbranche (Quelle: Lehrstuhl fml, Technische Universität München)

ung. Daraufhin können die Daten an beliebiger Stelle in der Supply Chain ausgelesen und weiterverarbeitet werden. Um dies zu ermöglichen gilt es, eine geeignete Infrastruktur aufzubauen und festzulegen, an welchen Stellen entlang der Prozesskette das Auslesen und Übertragen von Daten notwendig und sinnvoll ist. Wichtige Identifikationspunkte stellen vor allem die Warenein- und -ausgänge bei Herstellern, Distributionszentren, Cross-Docks und Filialen dar. Allerdings kann auch das Auslesen und Kontrollieren von Daten bei Übergängen zwischen internen Bereichen, z.B. zwischen einem gekühlten Lager- und dem Versandbereich, sinnvoll sein. Um einen intelligenten Thermobehälter eindeutig identifizieren und die gespeicherten Daten erfassen zu können, müssen geeignete Geräte an den Identifikationspunkten bereitstehen. Hierzu können stationäre RFID-Reader eingesetzt werden, wobei sichergestellt werden sollte, dass diese im Prozess auf jeden Fall passiert werden. Dementsprechend empfiehlt es sich, die Reader entweder in Toren (Bild 6.6) anzubringen oder RFID-Gates aufzustellen.

Alternativ besteht die Möglichkeit, mobile Reader, z.B. Handhelds, einzusetzen. Hierdurch kann zwar keine vollautomatische Datenerfassung realisiert werden, jedoch können diese an mehreren Identifikationspunkten genutzt werden, wodurch der Aufwand für den Aufbau der Infrastruktur sinkt. Zusatzfunktionalitäten, wie das Anzeigen von Daten und die Erfassung von anderen Kennzeichnungen (z.B. Barcodes), erhöhen die Flexibilität und machen die mobilen Identifikationsgeräte vor allem für kleinere Unternehmen wirtschaftlich. Ein Ansatz, der die gleiche Zielstellung verfolgt, ist die Integration von Lesegeräten in LKW. Dabei erfolgt die Identifikation von intelligenten Behältern jeweils bei der Be- und Entladung, wobei der Standort

über integrierte GPS-Module bestimmt wird. Gerade in der Lebensmittel-Supply Chain, in der viele Warenumschläge erfolgen, kann hierdurch die Anzahl an umzusetzenden Identifikationspunkten reduziert werden. Hält man sich alleine die hohe Anzahl an Einzelhandelsfilialen, die beliefert werden müssen, vor Augen, so wird das Einsparungspotenzial dieses Ansatzes deutlich. Darüber hinaus ermöglicht dieser Ansatz die Datenerfassung und -übertragung während des Transports, wodurch die Transparenz in der Lebensmittel-Supply Chain weiter gesteigert werden kann.

### Kommunikation und Auswertung von Daten in der Lebensmittel-Supply Chain

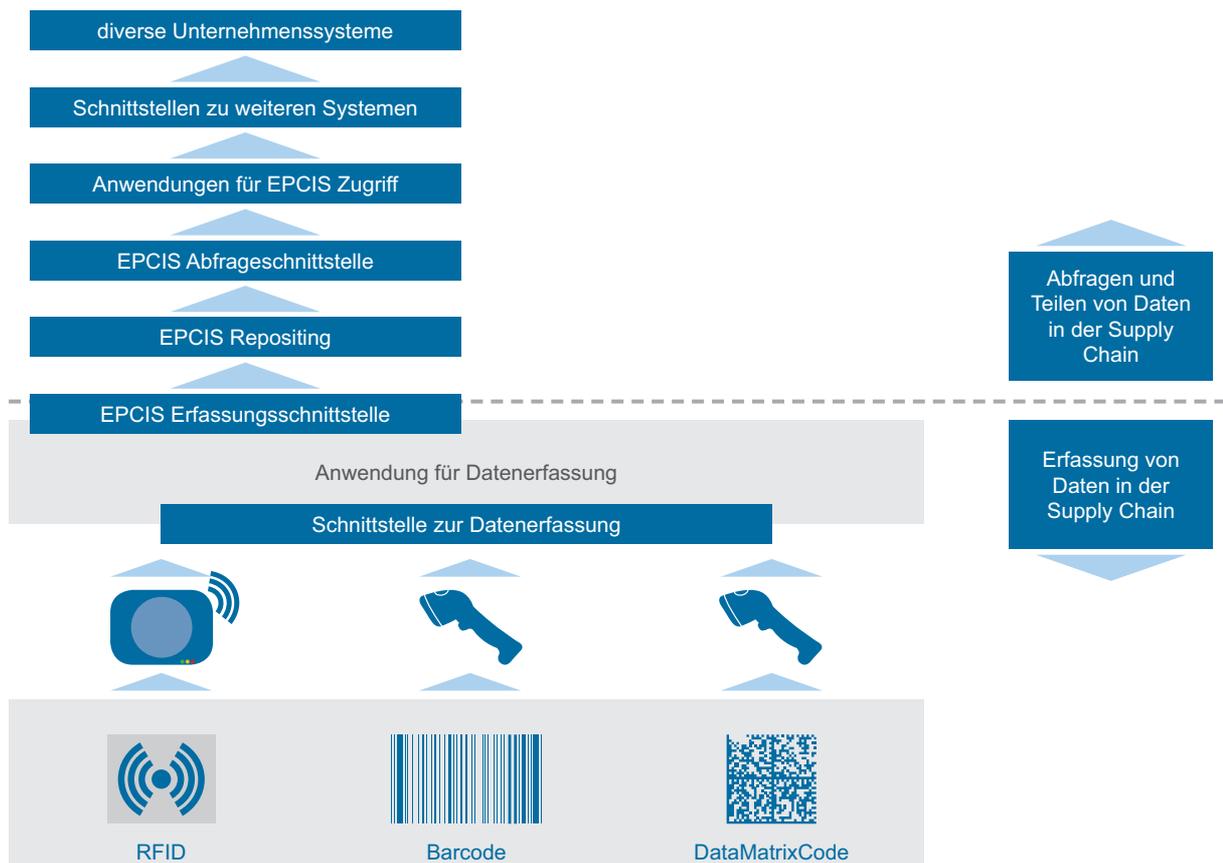
Für die Datenübertragung und -speicherung müssen Schnittstellen und Protokolle ausgewählt und in der Supply Chain umgesetzt werden. Um den Aufwand hierfür zu reduzieren und einfache Erweiterungen zu ermöglichen, empfiehlt es sich, auf standardisierte Informationsdienste zurückzugreifen. So basiert die IT-Infrastruktur für den vorgestellten intelligenten Thermobehälter auf dem Electronic Product Code Information Service (EPCIS), dessen Architektur in Bild 6.7 zusammengefasst ist. Es handelt sich hierbei um ein in der Logistik weit verbreitetes standardisiertes System für den Datenaustausch in Wertschöpfungsketten, welches von der Organisation GS1 gepflegt und entsprechend neuer Anforderungen erweitert wird (GS1 Global 2014).

Ein wesentlicher Aspekt bei der Implementierung von EPCIS ist die Zuweisung von Identifikationsnummern zu Objekten. Unter dem Oberbegriff Electronic Product Code (EPC) stehen hierzu eine Reihe verschiedener Nummernarten zur Verfügung, die unter anderem die Identifikation von Artikeln, Transporteinheiten, Inven-



**Bild 6.6**

Identifikation intelligenter Thermobehältern durch stationäre Reader (Quelle: Lehrstuhl fmi, Technische Universität München)



**Bild 6.7** Aufbau und Elemente des Informationsdienstes EPCIS (nach GS1 Global 2014a)

targütern sowie Standorten ermöglichen. Um die automatische Identifikation von Objekten wie dem intelligenten Thermobehälter realisieren zu können, müssen diese mit Kennzeichnungen, in welchen ein EPC codiert ist, versehen werden. Beispielsweise kann der EPC hierzu in einem Barcode verschlüsselt und ein entsprechendes Label am Objekt angebracht werden. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung von RFID-Transpondern als Datenträger für den EPC. Beim Auslesen der Transponderdaten wird dieser erfasst und somit die eindeutige Zuordnung von Daten und Objekt ermöglicht. Dabei sammelt und filtert eine Middleware die ausgelesenen Daten, woraufhin diese in eine standardisierte Form, sogenannte EPCIS-Events, gebracht und über eine Erfassungsschnittstelle (EPCIS Capture Interface) in einer Datenbank (EPCIS-Repository) abgelegt werden. EPCIS-Events sind XML-basiert und weisen einen standardisierten Aufbau auf, wobei der Inhalt im Kern die vier Dimensionen Was (ein oder mehrere EPC), Wann (Zeitstempel), Wo (Lokationsnummer) und Warum (Core Business Vocabulary)

enthält. In einer Art Anhang können in EPCIS-Events weitere prozessspezifische Daten übertragen und somit alle relevanten Informationen erfasst werden. Im Falle des intelligenten Thermobehälters werden also an allen Identifikationspunkten EPCIS-Events generiert, aus denen nicht nur hervorgeht, welcher Behälter wann und wo (z.B. Warenausgang Distributionszentrum) identifiziert wurde, sondern auch warum (z.B. Verladung auf LKW) und welchen Zustand Behälter und Inhalt hatten (z.B. Oberflächen- und Kerntemperatur). Auf Basis der durchgängigen Eventgenerierung in der Supply Chain sind folglich umfangreiche Auswertungen und Rückverfolgungen für alle Behälter und Lebensmittel möglich. Der Zugriff durch entwickelte Softwareanwendungen auf die gespeicherten Events erfolgt hierbei über eine Abfrageschnittstelle (EPCIS-Query). Um alle Events zu einem Objekt, die mitunter verteilt in der Supply Chain gespeichert sind, berücksichtigen zu können, wird zudem der Auffindungsdienst Object Name Service (ONS) genutzt. Darauf aufbauend können den Beteiligten der Supply Chain

weitere Dienste bereitgestellt werden, die über die reine Behälter- und Lebensmittelnachverfolgung (Tracking und Tracing) hinausgehen. Unter anderem ist es auf Basis aktueller Standort- und Bestandsinformationen möglich, Bestände zu optimieren und Bedarfe effizienter zu planen. Auch die Integration des Informationsdienstes für intelligente Behälter in die bestehende IT-Landschaft, z. B. die Vernetzung mit ERP-Systemen, bietet Potenziale (Wang 2014). So können Informationen aus beiden Systemen angereichert und für ein effizienteres Bestell- und Auftragsmanagement genutzt werden, wodurch schließlich die Transparenz in der gesamten Lebensmittel-Supply Chain weiter gesteigert werden kann.

Das Beispiel des intelligenten Behälters zeigt schließlich die Möglichkeiten und Potenziale auf, die sich aus dem Ansatz der dezentralen Datenhaltung ergeben. Dieser Ansatz zur horizontalen Integration in der Supply Chain ist jedoch nicht für alle Anwendungsfälle sinnvoll. Vor allem in Anwendungsfällen, in denen viele Daten zu einem Objekt vorliegen, Daten von verschiedenen Supply Chain-Partnern parallel bearbeitet oder Daten häufig entlang des Objekt-Lebenszyklus geändert werden, bietet die Datenhaltung in einer zentralen Plattform mitunter größere Potenziale. Diese Gesichtspunkte werden im folgenden Unterkapitel, in welchem ein Konzept für die intensive unternehmensübergreifende Zusammenarbeit in der Werkzeug-Supply Chain beschrieben wird, aufgegriffen.

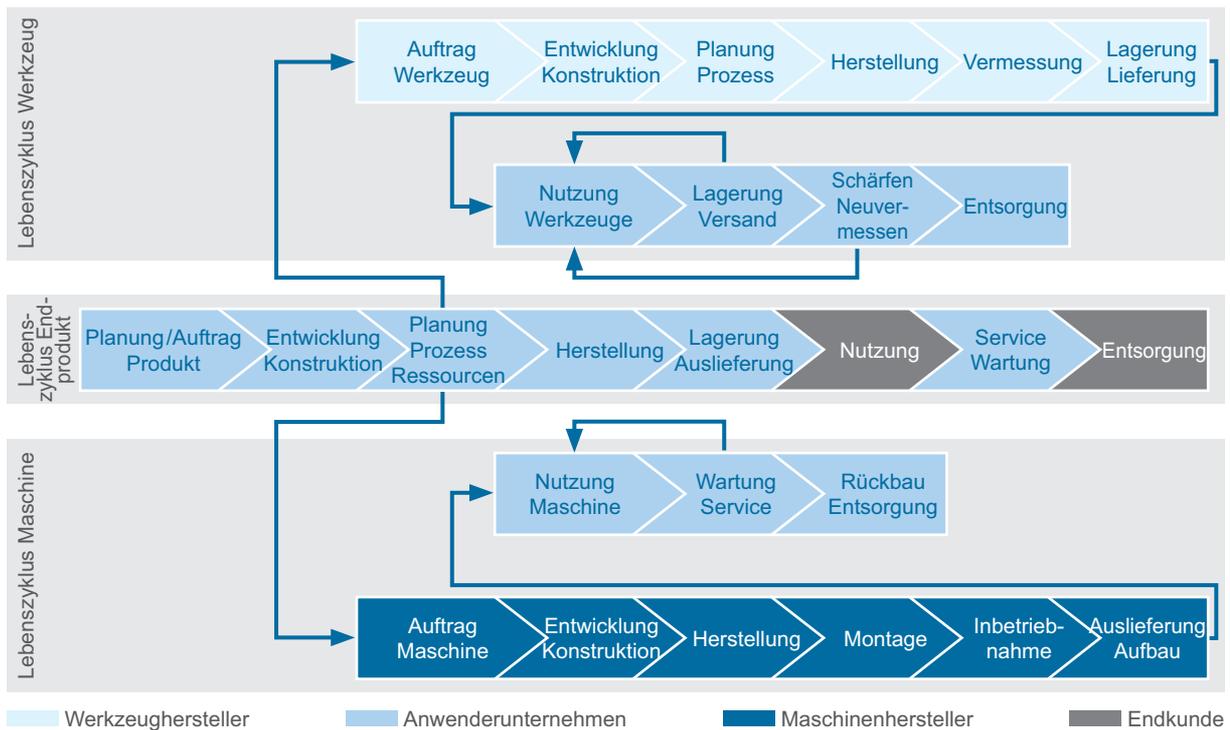
### 6.1.2 Kollaboratives Lebenszyklusmanagement in der Cloud am Beispiel der Werkzeug-Supply Chain

In Produktionsbetrieben stellt das Werkzeugmanagement einen wichtigen Aufgabenbereich dar. Gerade vor dem Hintergrund hoher personeller und monetärer Aufwände, z. B. für die Beschaffung, Lagerung, Bereitstellung, Einrichtung und Instandsetzung von Werkzeugen, gilt es, die Prozesse im Werkzeugmanagement möglichst effizient zu gestalten und schließlich einen optimalen Werkzeugeinsatz zu ermöglichen. Wesentliche Tätigkeiten lassen sich dabei einerseits der Werkzeugplanung, die sich z. B. mit der Auswahl und Zuordnung von Werkzeugen zu Fertigungsaufträgen und Maschinen sowie der Anforderungsdefinition an neue Werkzeuge beschäftigt, zuordnen. Andererseits gilt es, im Rahmen der Werkzeuglogistik Werkzeugbestände zu verwalten, Werkzeugbedarfe zu ermitteln sowie die

Bereitstellung der richtigen Werkzeuge an der richtigen Maschine zu planen (Mayer 1988). Neben dem Materialfluss von Werkzeugen spielt jedoch auch der begleitende Informationsfluss eine entscheidende Rolle im Werkzeugmanagement. So muss sichergestellt werden, dass in jedem Prozessschritt die benötigten Daten bereitstehen bzw. erfasst und übertragen werden. Dementsprechend sollten bei der Erstellung von geeigneten Konzepten für eine durchgängige Informationslogistik Anforderungen möglichst aller Prozesse im Werkzeugmanagement berücksichtigt werden. Diese lassen sich verschiedenen Phasen im Lebenszyklus eines Werkzeuges zuordnen (Bild 6.8). Am Werkzeug-Lebenszyklus sind wiederum mehrere Unternehmen beteiligt, welche die Werkzeug-Supply Chain bilden, wobei jedes Unternehmen verschiedene Daten benötigt und generiert:

- Der Werkzeughersteller generiert Konstruktionsdaten (z. B. geometrische Soll-Daten), für den Werkzeugeinsatz relevante Daten (z. B. zulässige Drehzahlen und geometrische Ist-Daten) sowie logistische Daten (z. B. Lagerbestand und Versanddaten).
- Die Hersteller von Maschinen benötigen Werkzeugdaten unter anderem für die Konstruktion und Inbetriebnahme von Maschinen.
- Der Anwender von Werkzeugen ist auf Werkzeugdaten angewiesen, um Maschinen einrichten und eine fehler- und ausschussfreie Produktion realisieren zu können. Weiterhin müssen auch hier Werkzeugbestände und -zustände verwaltet werden.
- Im Verlauf des Lebenszyklus wird ein Werkzeug, oftmals bei einem Dienstleistungsunternehmen, mehrfach geschärft und neu vermessen, woraus veränderte geometrische Daten resultieren.

Zwar existieren für den Datenaustausch zwischen den Unternehmen und Prozessen diverse Konzepte, jedoch stellen diese meist Insellösungen dar oder basieren auf manuellen Datenübertragungen und Papierdokumenten (z. B. Werkzeugbegleitkarten). Hieraus resultieren oftmals nicht nur eine mangelnde Transparenz im Werkzeugmanagement, z. B. hinsichtlich tatsächlicher Bestände, Zustände und Standorte, sondern auch Risiken hinsichtlich der Prozesssicherheit. So können durch die medialen Brüche im Informationsfluss manuelle Fehleingaben (z. B. bei der Maschineneinrichtung), die im schlimmsten Fall zu Maschinencrashes führen, nicht ausgeschlossen werden. Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden ein Konzept vorgestellt, welches im Rahmen eines Forschungsprojekts erarbeitet



**Bild 6.8** Vereinfachte Darstellung der Prozesse entlang des Werkzeuglebenszyklus und der Werkzeug-Supply Chain (Quelle: Lehrstuhl fml, Technische Universität München)

wurde und die unternehmensübergreifende Digitalisierung des Werkzeugmanagements zum Ziel hat (Röschinger 2014). Hierbei wird sichergestellt – basierend auf Web-Services und einer zentralen Cloud-Plattform, auf welche alle Unternehmen der Werkzeug-Supply Chain Zugriff haben –, dass zu jedem Zeitpunkt und für alle Prozessschritte aktuelle Werkzeugdaten zur Verfügung stehen. Dazu werden verschiedene Daten entlang des Werkzeug-Lebenszyklus automatisch erfasst und in der Cloud aktualisiert. Außerdem sieht das Konzept sowohl den Datenabruf von verschiedenen Endgeräten (z. B. Desktop PC, Smartphone, Tablet) als auch den automatischen Datenabruf vor, wodurch Automatisierungslücken, z. B. bei der Maschineneinrichtung, geschlossen werden können.

Bei der Erstellung eines Konzepts für ein unternehmensübergreifendes und Cloud-basiertes Werkzeugmanagement müssen diverse Gestaltungsfelder adressiert werden (Bild 6.9). So gilt es, alle relevanten Systemelemente sowie Lokationen zu identifizieren und für den automatischen Datenaustausch vorzubereiten. Zudem müssen die bestehenden Prozesse detailliert analysiert und diejenigen Prozessschritte identifiziert werden, in welchen eine automatische Da-

tenfassung und -bereitstellung realisiert werden soll. Es sollten entsprechend Soll-Prozesse definiert werden, aus welchen nicht nur die benötigten Zugriffspunkte auf die Cloud, sondern auch die in den jeweiligen Prozessschritten benötigten bzw. generierten Daten hervorgehen. Diese sind in einem Datenmodell zu strukturieren und festzuhalten, wodurch die Basis für die Umsetzung der Cloud-Datenbank geschaffen wird. Schließlich gilt es, die Art und Weise der Datenübertragung zu betrachten, also eine geeignete Kommunikationsinfrastruktur zu entwerfen. Hierbei müssen, insbesondere vor dem Hintergrund einer Cloud-Lösung, auch sicherheitstechnische Fragestellungen beantwortet werden. Neben technischen Maßnahmen sollte hierfür ein detailliertes Rechte- und Rollenkonzept erstellt werden, welches festhält, wer auf welche Daten Zugriff hat.

### **Kennzeichnung und Identifikation von relevanten Systemelementen**

Um eine explizite Zuordnung von Daten zu Objekten und hierauf aufbauend eine digitale Vernetzung der Prozesse zu ermöglichen, müssen Objekte entlang (unternehmensübergreifender) Prozesse eindeutig identi-

## Cloud-basiertes Werkzeugmanagementsystem



**Bild 6.9** Gestaltungsfelder bei der Konzeption des Cloud-basierten unternehmensübergreifenden Werkzeugmanagementsystems (Quelle: Lehrstuhl fml, Technische Universität München)

fiziert werden können. Das betrachtete Konzept für den Anwendungsfall des Werkzeugmanagements verfolgt hierzu den Ansatz der zentralen Datenhaltung. Das bedeutet, dass die Daten nicht auf den Systemelementen, sondern in einer zentralen Plattform – im Anwendungsfall in einer Cloud-Datenbank – gespeichert und verarbeitet werden. Folglich liegt die Intelligenz nicht bei den Systemelementen auf Prozessebene, sondern in der übergeordneten zentralen Cloud-Instanz. Da sowohl die zentrale als auch die dezentrale Datenhaltung diverse Vorteile und Nachteile aufweisen (Diekmann 2007), sollten die beiden Konzepte vor dem Hintergrund eines konkreten Anwendungsfalls gegeneinander abgewogen werden. Im Falle des Cloud-basierten Werkzeugmanagementsystems wird der Ansatz der zentralen Datenhaltung gewählt, da Daten nicht nur am Standort, an dem sich das gekennzeichnete Objekt befindet, zugänglich sein sollen. Vielmehr sollen Daten stets aktuell für alle Supply Chain-Partner verfügbar und abrufbar sein. Dabei sollen Datensynchronisationen zwischen der zentralen Cloud-Plattform und dezentralen Datenspeichern vermieden werden, da ansonsten die Aktualität und Konsistenz der Cloud-Daten nur eingeschränkt gewährleistet werden kann.

Das Konzept für ein unternehmensübergreifendes Werkzeugmanagement baut also auf einer zentralen Datenhaltung auf, wozu den Werkzeugen zunächst ein-

deutige Identifikationsnummern zugeordnet werden. Um die Überschneidungsfreiheit dieser Nummern sicherzustellen und eine flexible Erweiterbarkeit der Lösung, also unter anderem die Anbindung weiterer Unternehmen an die Cloud-Plattform, zu ermöglichen, wird hierzu auf den bereits in Kapitel 6.1.1 beschriebenen EPC-Standard zurückgegriffen. Durch die Vergabe von serialisierten Artikelnummern (SGTIN – Serialized Global Trade Item Number) können Werkzeuge eindeutig identifiziert und der richtige Datensatz in der Cloud adressiert werden. Um die Prozesse im Werkzeugmanagement durchgängig zu digitalisieren, müssen auch Systemelemente, mit denen Werkzeuge im Laufe ihres Lebenszyklus in Wechselwirkung stehen, automatisch identifizierbar sein, wofür diesen ebenfalls eindeutige Identifikationsnummern zuzuweisen sind. Beispiele hierfür sind Aufnahmen, in die Werkzeuge vor dem Einsatz in Maschinen montiert werden, Maschinenspindeln und Maschinen. Wie die verschiedenen Systemelemente gekennzeichnet werden, wie also die Codierung der Identifikationsnummern auf dem physischen Objekt erfolgt, ist im betrachteten Konzept nicht fest definiert. Vielmehr ist dieses unabhängig von gewählten Kennzeichnungs- und Identifikationstechnologien umsetzbar. Somit können auch verschiedene Technologien zum Einsatz kommen sowie bereits bestehende Lösungen (z. B. Identifikation von Aufnahmen

mittels RFID) verwendet werden. Einen interessanten Ansatz für die Kennzeichnung von Werkzeugen stellen jedoch optische Codes, wie Data Matrix Codes, dar. Diese werden den oben genannten Herausforderungen am besten gerecht, da sie sehr klein skaliert und somit auch auf sehr kleine Werkzeuge aufgebracht werden können. Außerdem bedingen optische Codes keinen physischen Datenträger, sondern können, z.B. durch den Einsatz von Lasergeräten, direkt auf die Werkzeugoberfläche appliziert werden. Hierdurch können sowohl zusätzliche fertigungstechnische Bearbeitungsschritte (z.B. Anbringung einer Bohrung für RFID Transponder) als auch Risiken hinsichtlich der Einschränkung der Funktionsfähigkeit des Werkzeuges vermieden werden.

Auf Basis der zugeordneten Identifikationsnummern und der aufgetragenen Kennzeichnungen können die Systemelemente eindeutig und automatisch identifiziert werden, womit eine wesentliche Voraussetzung für den Datenaustausch mit der Cloud geschaffen ist. Im nächsten Schritt gilt es nun festzulegen, wann und wo dieser erfolgen soll. Hierzu sind unter anderem Lokationen zu definieren, an welchen eine Identifikation erfolgen muss, um eine transparente und durchgängige Nachverfolgbarkeit zu ermöglichen (Tracking und Tracing). Beispiele hierfür sind Wareneingangs-, Versand- sowie Lagerbereiche. Durch den Einsatz von Identifikationsgeräten (z.B. RFID Reader, Barcode Lesegeräte und Smartphones) sowie die Zuweisung eindeutiger Lokationsnummern kann somit konsequent erfasst werden, welches Werkzeug sich wo befindet bzw. befunden hat. Auf Basis der festgelegten Identifikationspunkte können Soll-Prozesse definiert werden. Dabei gilt es zu beachten, dass an vielen Stellen nicht nur Daten in die Cloud zu übertragen sind (z.B. ID des Werkzeuges, Zeitpunkt und ID der Lokation), sondern oftmals auch Daten von der Cloud abgerufen werden müssen. Diese Aspekte sollen durch folgende Auflistung, welche den erweiterten Ablauf der automatisierten Maschineneinrichtung abstrahiert wiedergibt, dargestellt werden:

- Das benötigte Werkzeug muss zunächst aus dem Lager oder einem Lagersystem (z.B. Werkzeugschrank) geholt werden. Der genaue Standort (z.B. Lagerfach) kann aus der Cloud abgefragt werden, wozu auch Smartphones oder Tablets eingesetzt werden können. Für ein durchgängiges Tracking und Tracing wird das Werkzeug bei der Entnahme aus dem Lager ausgebucht und der Standort (z.B. Maschinenumge-

bung) bzw. Status (z.B. in Transport) entsprechend in der Cloud aktualisiert.

- Für den Einsatz auf der Maschine müssen viele Werkzeuge zunächst in eine Aufnahme montiert werden. Nach der physischen Montage muss auch eine datentechnische Verheiratung erfolgen, also eine Relation zwischen dem spezifischen Werkzeug und der Aufnahme hergestellt werden. Einerseits ist dies nötig, um später nachvollziehen zu können, welches Werkzeug sich wann in welcher Aufnahme befunden hat. Andererseits kann hierdurch eine eindeutige Zuordnung von veränderten geometrischen Daten, die mitunter aus einer Vermessung der Kombination aus Werkzeug und Aufnahme resultieren, erfolgen.
- Sobald das Werkzeug in die Maschine eingesetzt wird, entweder über ein Wechselsystem oder direkt in die Maschinenspindel, stehen somit die aktuellen und korrekten Daten zur Verfügung. Diese können nach der Identifikation des Werkzeuges oder der Aufnahme – durch die datentechnische Verheiratung können über beide Objekte die benötigten Datensätze referenziert werden – automatisch in die Maschinensteuerung übertragen werden. Neben dem Datenabruf wird in der Cloud der Standort des Werkzeuges und der Aufnahme aktualisiert, sodass in späteren Auswertungen auch die Zuordnung von Werkzeugen zu Maschinen berücksichtigt werden kann.
- Während des Werkzeugeinsatzes auf der Maschine können verschiedene Daten in die Cloud übertragen und dort gespeichert werden. Beispiele hierfür sind Einsatzzeiten, Daten zum bearbeiteten Material, Mengen von bearbeitetem Material (Laufmeter) sowie unter Umständen Fehlercodes. Hierdurch entsteht nicht nur für das Anwenderunternehmen eine wertvolle Datenbasis, sondern auch der Werkzeughersteller kann Auswertungen hinsichtlich der Werkzeugeignung für den Bearbeitungsprozess anstellen und Produktoptimierungen anstoßen.
- Nach dem Einsatz wird das Werkzeug entweder im Wechselsystem der Maschine gepuffert oder ausgewechselt. Auch hierbei sollte für ein durchgängiges Tracking und Tracing der Standort des Werkzeuges aktualisiert werden. Bevor das Werkzeug dann wieder eingelagert wird, erfolgt oftmals die Demontage aus der Aufnahme. Dieser Prozessschritt ist ebenfalls digital in der Cloud abzubilden. Weist eine optische Begutachtung oder Analyse erfasster Daten (z.B. kritische Laufmeter- bzw. Standwegzahl) darauf

hin, dass ein Werkzeug nicht mehr für weitere Bearbeitungseinsätze infrage kommt, so muss es instand gesetzt werden. Je nach Unternehmen kann dies unternehmensintern oder bei einem externen Dienstleister erfolgen, wobei das Werkzeug im letztgenannten Fall versandt werden muss. Basierend auf einer Identifikation am Warenausgang gilt es dabei, den Standort und Status (z. B. nicht verfügbar) des Werkzeuges in der Cloud zu aktualisieren. Angekommen beim Instandsetzer sollte dann der Standort erneut aktualisiert werden, wodurch die durchgängige Nachverfolgbarkeit in der gesamten Supply Chain gewährleistet werden kann.

Zur Realisierung der Soll-Prozesse müssen zum einen die zu erfassenden und bereitzustellenden Daten in einem Datenmodell dokumentiert und eine entsprechende Datenbank aufgesetzt werden. Zum anderen muss definiert werden, wie der Zugriff auf die Datenbank erfolgt und geeignete Schnittstellen geschaffen werden – hierauf wird im nächsten Unterkapitel genauer eingegangen.

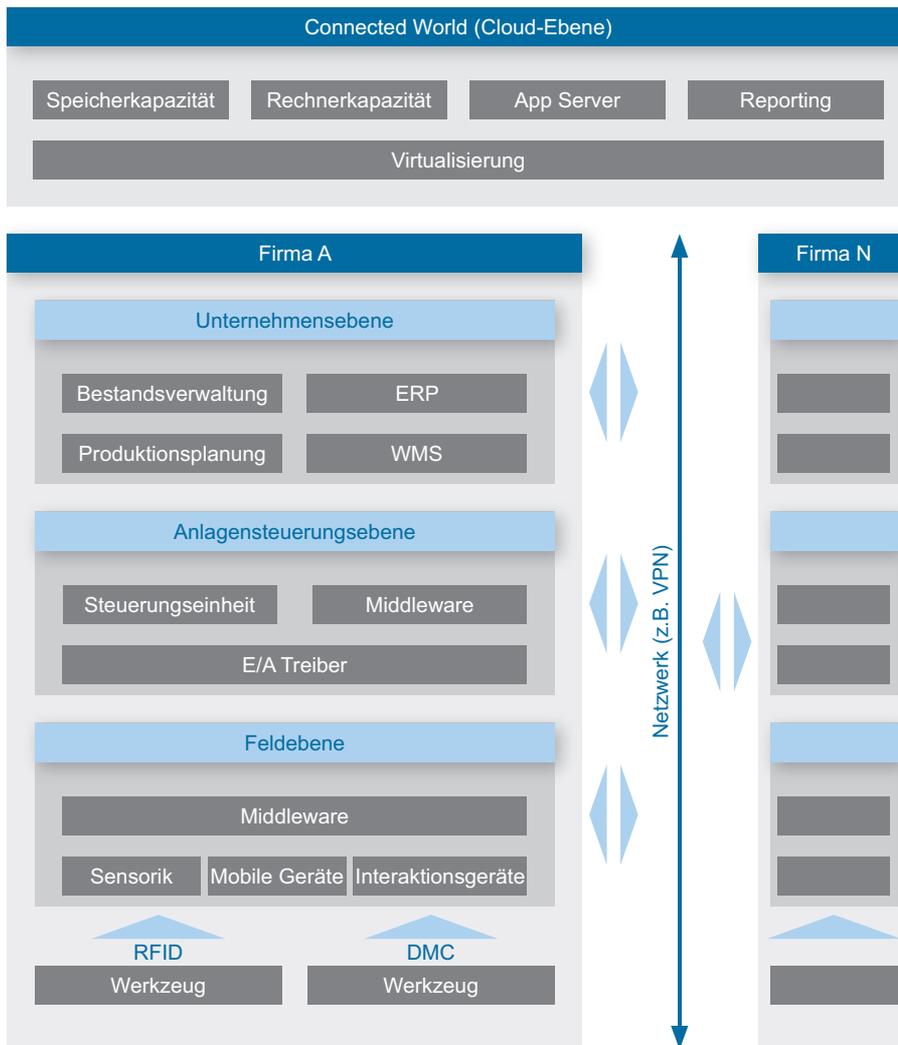
### **Systemarchitektur für den unternehmensübergreifenden Austausch von Werkzeugdaten**

Ziel des vorgestellten Cloud-Konzepts ist die automatische Datenerfassung und -bereitstellung, wobei dies flexibel entsprechend der Prozessanforderungen umzusetzen ist. Vor diesem Hintergrund können die verschiedenen Funktionen des Cloud-basierten Werkzeugmanagementsystems als Dienstleistung aufgefasst werden. Diese werden von einem Dienstleister, dem Betreiber der Cloud Plattform, als Web-Services für die Werkzeug-Supply Chain bereitgestellt. Es bietet sich daher an, die Systemarchitektur, in Bild 6.10 in einer groben Übersicht dargestellt, entsprechend des Paradigmas der Serviceorientierten Architektur (SOA) zu gestalten. Demzufolge befinden sich an den beschriebenen Identifikationspunkten auf der Feldebene Identifikationsgeräte, welche die auf den Systemelementen codierte Identifikationsnummer auslesen. Über eine Middleware wird diese an die Maschinensteuerung auf der Anlagensteuerungsebene weitergegeben. Von dort aus erfolgt ein Web-basierter Datenaustausch mit der Cloud-Ebene. Alternativ kann dieser auch direkt vom Erfassungsgerät (z. B. Smartphone) aus stattfinden, wobei dieses über eine Internetverbindung verfügen muss.

Um den Datenaustausch möglichst standardisiert durchzuführen, wird auf das in Kapitel 6.1.1 vorgestellte

te Konzept EPCIS zurückgegriffen. Dabei ermöglichen die für alle Prozessschritte definierten EPCIS-Events nicht nur die durchgängige Erfassung und Bereitstellung von Daten, sondern auch den Aufbau einer breiten Datenbasis für die Auswertung des gesamten Werkzeug-Lebenszyklus. Ein wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang ist die eindeutige Festlegung des Datenzugriffs und der Datensicherheit. Hierfür müssen einerseits die Kommunikationswege verschlüsselt und geschützt werden (z. B. durch https und VPN). Andererseits sollten für die Supply Chain-Partner Zugriffsrechte definiert, in einem Rechte- und Rollenkonzept festgehalten und unter anderem durch Logging-Funktionen realisiert werden. Somit kann sichergestellt werden, dass die jeweiligen Unternehmen nicht auf alle Daten der Supply Chain-Partner Zugriff haben, sondern nur auf die für sie relevanten und freigegebenen. Gerade vor dem Hintergrund der Erweiterbarkeit, also z. B. der Anbindung weiterer Anwenderunternehmen, welche mitunter Wettbewerber sind, ist dies ein entscheidender Aspekt. Allerdings sind die Datenzugriffe nicht nur im unternehmensübergreifenden Kontext zu betrachten. Es muss auch definiert werden, wer innerhalb eines Unternehmens Zugriff auf welche Daten hat. Für unterschiedliche Abteilungen und Mitarbeitergruppen können dementsprechend Zugriffe verweigert, nur Leserechte oder Vollzugriffe eingerichtet werden.

Einer der großen Vorteile der vorgestellten Architektur besteht in der Flexibilität hinsichtlich der Verwendung verschiedener Endgeräte. So kann der Datenaustausch mit der Cloud nicht nur von Maschinen aus, sondern auch Browser-basiert an Arbeitsplätzen erfolgen. Schließlich besteht auch die bereits erwähnte Möglichkeit, durch Smartphones auf die Cloud-Plattform zuzugreifen. Da die Lösung von einer vorhandenen Internetverbindung abhängig ist und diese auf Maschinenebene nicht immer gegeben oder gewünscht ist, kann der Einsatz von Smartphones eine interessante Zwischenlösung auf dem Weg zum vollautomatisierten Werkzeugmanagement darstellen. In einer Smartphone-App können verschiedene Funktionen realisiert und dabei die unterschiedlichen Module des Geräts, wie GPS Empfänger und Kamera, genutzt werden. Auch wenn im betrachteten Konzept noch keine Datenübertragung vom Smartphone zur Maschine vorgesehen ist, z. B. über Bluetooth, können durch den Einsatz von Smartphones der händische und papierbasierte Dokumentationsaufwand im Werkzeugmanagement reduziert und stets aktuelle Daten bereitgestellt werden.

**Bild 6.10**

Abstrahierte Systemarchitektur für das Cloud-basierte unternehmensübergreifende Werkzeugmanagementsystem (Quelle: Lehrstuhl fml, Technische Universität München)

Abschließend lässt sich also festhalten, dass durch Cloud-Lösungen eine intensive Vernetzung zwischen Supply Chain-Partnern erreicht werden kann. Am Beispiel der Werkzeug-Supply Chain zeigt sich, dass hierdurch Prozesse bei allen beteiligten Partnern optimiert werden können. So können, basierend auf der automatischen Erfassung und Bereitstellung aktueller Daten, diverse neue Funktionen ermöglicht werden. Bereits die automatische Identifikation von Werkzeugen und die Anzeige der zugehörigen Daten erhöht die Transparenz und Sicherheit in den Prozessen, zumal sichergestellt ist, dass es sich um die richtigen und aktuellen Daten handelt. Tiefer gehende Funktionen, wie die Übertragung der Daten direkt in die Maschinensteuerung, schließen Automatisierungslücken und eliminieren Fehlerquellen wie z.B. Fehleingaben bei der manuellen Datenübertragung. Aus Sicht des Werkzeug-

lebenszyklus betrachtet, ermöglichen Auswertungsfunktionen neue Aussagen über den optimalen Werkzeugeinsatz sowie transparente Informationen über Werkzeugbestände, -zustände und -standorte.

## 6.2 Einsatz digitaler Werkzeuge in der Logistikplanung

Für die breite Umsetzung der Logistik 4.0 müssen nicht nur die technologischen Grundlagen geschaffen werden, sondern auch entsprechende Methoden und Werkzeuge für die anwendungsfallbezogene Planung von

Logistik 4.0-Anwendungen und -Systemen bereitgestellt werden. Nur auf diese Weise können auch komplexe Systeme effizient geplant werden (Kagermann 2013). Auch im Bereich der Logistik werden Planungswerkzeuge benötigt, welche die flexible und robuste Planung der vielschichtigen technischen Systeme ermöglichen. So müssen neben den zu realisierenden Materialflüssen auch Informations- und Energieflüsse sowie Schnittstellen zu anderen Systemen wie z. B. Fertigungs- und Montagesystemen, adressiert werden. Außerdem muss die Rolle des Menschen in den technischen Systemen ausführlich analysiert und berücksichtigt werden. Zum einen bezieht sich diese Aussage auf die Mitarbeiter in den zu planenden Systemen. So muss bereits in der Planung sichergestellt werden, dass die spätere Ausführung manueller Tätigkeiten, die z. B. im Bereich der Kommissioniersysteme oftmals dominieren, nicht nur möglichst effizient, sondern auch ergonomisch möglich ist. Zum anderen sind auch das Aufgabenfeld des Planers zu untersuchen und dessen Tätigkeiten durch innovative Werkzeuge zu unterstützen.

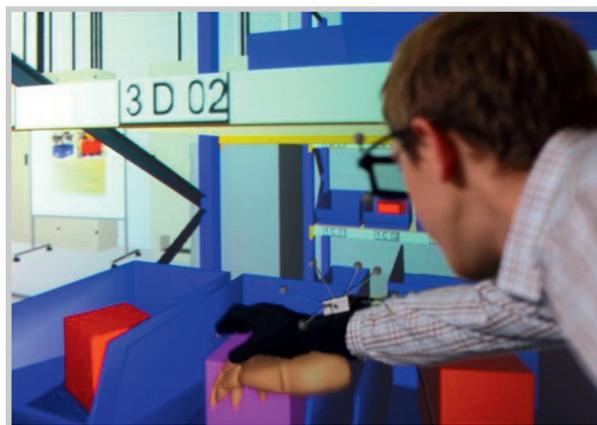
Grundlegend werden an die Planung von Materialflusssystemen, egal ob es sich um eine Neu-, Erweiterungs- oder Umstellungsplanung handelt, diverse Anforderungen gestellt. Wichtig sind in diesem Zusammenhang die bereits erwähnte zunehmende Komplexität der Planungsobjekte sowie der steigende Planungsumfang. Außerdem wird gefordert, dass Planungsprojekte effizienter durchgeführt werden, wozu es nicht nur die Planungssicherheit, sondern auch die Planungsgeschwindigkeit zu erhöhen gilt. Diesen Anforderungen kann durch den Einsatz innovativer Werkzeuge und Methoden nachgekommen werden, wobei diese durchgängig für den gesamten Planungsprozess bereitstellen sind.

Um aufzuzeigen, wie die genannten Planungsphasen durch digitale Werkzeuge unterstützt werden können, werden im Folgenden zwei wichtige Aspekte aufgegriffen und konkrete Lösungsansätze vorgestellt. Zum einen handelt es sich hierbei um den Einsatz der Virtual Reality Technology in der Planung von Kommissioniersystemen. Diese ermöglicht es, den Menschen frühzeitig, also bevor das System realisiert wird, in die Planung einzubeziehen und dessen Interaktion mit den Systemkomponenten zu testen. Zum anderen wird eine Plattform für die digitale und kollaborative Planung vorgestellt. Hierbei wird der Umstand adressiert, dass an der Planung von komplexen Systemen diverse

Unternehmen beteiligt sind. Diese müssen eine große Menge an Daten austauschen und koordinieren, wobei oftmals Probleme hinsichtlich der Konsistenz und der Transparenz auftreten. Außerdem besteht ein hoher Abstimmungsbedarf zwischen den Unternehmen, um sicherzustellen, dass die jeweils entwickelten Systemkomponenten kompatibel sind und schließlich zu einem Gesamtsystem zusammengebaut werden können. Die präsentierte Plattform greift diese Herausforderungen bei der kollaborativen Planung auf, indem sie unter anderem die synchrone und unternehmensübergreifende Betrachtung und Bearbeitung von Layouts ermöglicht. Anhand der vorgestellten Lösungskonzepte können sowohl die Potenziale von digitalen Werkzeugen in der Logistikplanung nachvollzogen als auch Handlungsbedarfe für weitere Anwendungsfälle abgeleitet werden.

### 6.2.1 Einsatz von Virtual Reality zur Planung manueller Kommissioniersysteme

Die Technologie der Virtual Reality (VR) erlaubt es den Menschen, mit einer virtuellen Welt, also einem künstlich am Rechner erzeugten Abbild der Realität, zu interagieren bzw. in diese einzutauchen. Im Kontext der VR wird dieses Eintauchen in die virtuelle Welt als Immersion bezeichnet. Für eine ausgeprägte Form der Immersion müssen Mensch-Maschinen-Schnittstellen eingesetzt werden, die eine starke und realitätsgetreue Interaktion des Nutzers mit der Simulationsumgebung (Bild 6.11) fördern. Bei der geschaffenen virtuellen Welt kann es sich um eine Nachbildung existierender Systeme, Modelle geplanter künftiger Systeme oder



**Bild 6.11** Virtual Reality-Umgebung (Quelle: Lehrstuhl fml, Technische Universität München)

# Stichwortverzeichnis

## Symbole

1D-/2D-Codierverfahren 560  
3D-Druck 396  
3D-Laserscanner 179  
3D-Monitoring 288  
3 V's 98

## A

Aachener Qualitätsmanagement Modell 154  
Abwehrfunktion 192  
Adaptierbarkeit 276  
adaptive Systeme 404  
additive Fertigung 650, 718  
Ad-hoc-Vernetzung 538  
Advanced Message Queuing Protocol 107  
Advanced Planning and Scheduling (APS) 139  
Advanced Planning System 601  
Agenten 490  
Analysemethoden  
- Big Data 99  
Analytic Hierarchy Process 224  
Änderungsmanagement 217  
Android Apps 127  
Andruck 633  
Anforderungen-Fähigkeiten-Abgleich 529  
- in der Montageplanung 529  
Angriffertypen 114  
Angriffspunkte 115  
Anlagenarchitektur 388  
Anlagenbediener 421  
Anlagenreinigung 417  
Anlagenstruktur 390, 399  
Anwendungsfalldiagramm 245  
Apache Hadoop 99  
App  
- für Verschleißerkennung 597  
App-Analysewerkzeuge 130  
Application Programming Interfaces 346  
AppRay 127

App-Sicherheit 127  
APS *siehe* Advanced Planning System  
Arbeitsanweisungen 661  
Arbeitsmittel 53  
Arbeitsplangenerierung 681  
Arbeitsplanung 311  
Arbeitsvorbereitung 351  
AR-Technologie 480  
Assembly-by-Disassembly 523  
Assistenzsystem 57, 145, 421, 479, 706  
Attribute 248  
Auffindungsdienst 459  
Auftragsabwicklung 666  
Auftragseingang 667  
Auftragssteuerung 658  
Augmented Reality 186, 480, 661, 677  
Ausbringung 389  
Aussteuerwerkzeuge 327  
Auto-ID-Technologie 560  
Automated Feature Recognition 345  
AutomationML 578  
automatisiertes Verpacken 625  
Automatisierung  
- Cloud-basierte 92  
- skalierbare 608  
Automatisierungsgrad 431, 615  
Automatisierungskomponenten  
- wandlungsfähige 537  
Automatisierungsportfolio 678  
Automatisierungspyramide 93, 120, 555, 678  
Automatisierungstechnik 555  
Automobilbau 591  
Automobilproduktion 709  
Autonomie 164  
Autonomous Vehicles 101  
AVB-Standard 570

## B

Barcode 660, 662  
Batch 382  
Batch-Produktion 382

- Batchprozess 386  
 Batterieproduktion 716  
 Bauteile  
   - gentelligente 319  
 Bauteilschnittstellen 525  
 BaZMod-Schnittstelle 330  
 Bearbeitungszentren 591  
 Bedienerbelastung 421f.  
 Bedienerführung 592  
 Bedienerqualifikation 421  
 Bedienkonzepte 370  
   - für Werkzeugmaschinen 372  
 Bedrohungen 114  
 Befähigertechnologien 638  
 Behälter  
   - intelligenter 455  
 Behältermanagement 508  
 Belastungs-Beanspruchungskonzept 56  
 Belastungsfälle 320  
 Belastungsgrößen 84  
 Beschaffungsmodelle 667  
 Bestandsmanagement 42  
 Bestandsreduzierung 46  
 betriebliche Mitbestimmung 204  
 Betriebsmittel 616  
 Betriebsmittelmodell  
   - digitales 518  
 Betriebs-Traceability 663  
 Bevölkerungswachstum 381  
 Big Data 10, 97, 673  
 Big Data-Analysen 48, 356  
 Big Data Analytics 710  
 Binärcodeanalyse 124  
 Blackboard 490  
 Blindbedienung 374  
 Blockchain-Technologie 117  
 Breakthrough-Innovation 13  
 Brownfield-Ansatz 214, 687  
 Bypass-Methodik 669
- C**
- CAD/CAM-Kopplung 680  
 CAD-CAM-NC-Kette 343, 357  
 CAD-Produktanalyse 522  
 CAM-Automatisierung 347  
 CAM-Systeme 344  
 CAM-Workflow 347  
 CAPP-Methoden 347  
 CAQ-Systeme 155  
 Care-Kompetenz 272  
 Cloud-basiertes Werkzeugmanagement 461  
 Cloud Computing 90, 564f.  
 Cloud-Lösungen 465
- Cloud-Plattformen 113  
 Cloudservices 596  
 Cloud Storage 90  
 Cloudsystem 11  
 Co-Creation 257, 259  
 Codierung 335  
 COMESCO-Kommunikationsstandard 684  
 Community Cloud 90  
 Complex Event Processing 26  
 Computer Integrated Manufacturing XXXII  
 Computerized Quality 156  
 Condition-Monitoring 363  
 Consumer-Technologien 371  
 Continuous Processing 382  
 CPPA *siehe* Cyber-physische Produktionsanlage  
 CPPA-Entwicklung 242  
 CPS-basierte Lösungen 239  
 Create- and Play-Kompetenz 272  
 cyber-physische Objekte 653  
 Cyber-physische Produktionsanlage 226  
 Cyber-physisches Produktionssystem 663  
 Cyber-physisches System XXXIV, 34, 97, 561, 563,  
   653  
 Cyber-Sicherheit 111  
   - Lösungsansätze 120
- D**
- Data Analytics 157  
 Data Broker 23  
 Datacentertopologie 577  
 Data Collector 23  
 Data Distribution Service 108  
 Data Economy 100  
 Data Matrix Codes 463  
 Data Mining 716  
 Datenaufnahme  
   - bauteilrandzonenbasierte 302  
   - sensorbasierte 299  
 Datenbrille 161, 477, 479f., 677  
 Dateneigentum 198  
 Datenerfassung 674  
 Datenevaluation 360  
 Datenhaltung 559  
 Datenhandschuh 470, 479  
 Datenhoheit 191  
 Datenschutzrecht 204  
 Daten-Souveränität 130  
 Datenübertragung 328  
 Definitionen  
   - Big Data 98  
 Dekompositionsstufe 399  
 demografischer Wandel 81  
 Demontgearbeitsplatz 440

- Designoptimierung 319  
 Design Thinking 268  
 Design- und Entwicklungsphase 263  
 deskriptive Analyse 103  
 Detektion 419  
 Diagnose  
 - signalgestützte 366  
 - wissensbasierte 657  
 Diagnostic Analytics 674  
 Dialoggestaltung  
 - benutzerzentrierte 375  
 Digitale Fabrik 169  
 Digital Enterprise 686  
 digitaler Schatten 9f., 517  
 digitaler Werkstückschatten 295, 315  
 digitaler Zwilling 417  
 Digitales Produktgedächtnis 558  
 digitale Vernetzung 621  
 Digital Twin 714  
 Diskretisierung der Arbeitsorgane 624  
 Disposables 396  
 disruptive Innovationen 14  
 Distributed Denial of Service-Attacke 574  
 Dokumentation 122  
 Dongle 125  
 Drahtloskommunikation 106  
 Drehbearbeitung 588  
 Durchlaufzeiten 46
- E**
- Ebenenflug 524  
 Echtzeit-Ethernet 569  
 Echtzeitfähigkeit 94  
 eCl@ss 579  
 ECM *siehe* Engineering Change Management  
 Eigenfertigungsplanung 40  
 Eigenfertigungssteuerung 41  
 Eigenschaftsschwankung 384  
 Einflussgröße 403  
 eingebettete Systeme 563  
 Electronic Product Code Information Service 458  
 Elektromobilität 716  
 Elektromotor-Montage 607  
 Elektronikentwurf 251  
 Elektronikfertigung 659  
 Elektronikproduktion 653  
 Emissionen 332  
 Emissive Projection Display 480  
 Energieeffizienz 279  
 Energieübertragung 329  
 Energiewertstrom 285  
 Engineering Change Management 218  
 Enterprise Resource Planning 19  
 Enterprise Resource Planning (ERP) 137  
 Enterprise Resource Planning-System 33, 556  
 EPCIS *siehe* Electronic Product Code Information Service  
 EPD *siehe* Emissive Projection Display  
 Erfahrungswissen 422  
 Ergonomie 184  
 ERP (Enterprise Resource Planning)-Systeme 138, 603  
 Erreichbarkeitsprüfung 532  
 Ertragsmodell 7  
 Ethernet 569  
 Evaluation  
 - automatisierte 361  
 Expertenbefragung 224  
 Expertensystem 421  
 Exploits 114
- F**
- Fabriklebenszyklus 177  
 Fabrikplanungsprojekte 177  
 Fähigkeitenmodell 528  
 Feature-Makro-Mapping 344  
 Fehlbedienung 373  
 Fehlerdatenanalyse 592  
 Fehlerlokalisierung 421  
 Fehlermanagement 159  
 Fehlerstatistik 660  
 Feinplanung 183  
 Feldbus 115  
 Fernwartung 121  
 Fernwartungslösung 594  
 Fertigung  
 - flexible 323  
 - vernetzte 589  
 Fertigungsauftragseröffnung 667  
 Fertigungsmittel  
 - intelligente 601  
 Fertigungsplanungssystem 343  
 Fertigungssteuerung 311  
 Fertigungszellen 433  
 Flexibilität 387, 431  
 Flexibilitätsplanung 273  
 flexible Roboterkinematik 625  
 flexibles Fertigungssystem 589, 601  
 Flugzeugbau 635  
 Flurförderfahrzeuge 479  
 Fördertechnikmodule 486  
 Formanpassung  
 - aktive 447  
 - passive 448  
 Formatflexibilität 623  
 formatflexibler Verpackungsprozess 623

Framework-Kompetenz 271  
 Fremdbezugsplanung 32, 38  
 Fügeprozesse 444  
 Führungsaufgaben 79  
 Funkstrecke 500  
 Funktechnologien 121  
 Funktionalmarktanalyse 229  
 Funktionen 248  
 Funktionsinkrement 625  
 Funktionsintegration 481  
 Funktionstest 672

## G

Gabelstapler 481  
 Ganzheitliches Produktionssystem  
 XXXIV  
 Gebrauchsdauerprognose 365  
 Geheimnisschutz 196  
 Generative Design Approach 319  
 Gerätehierarchie 581  
 Geschäftsgeheimnisse 195  
 Geschäftsmodelle 4  
 - plattformbasierte 23  
 Geschäftsmodell-Innovation 5  
 gesetzliche Haftung 201  
 GIML-Format 308  
 Grass Blade-Ansatz 214  
 Greenfield-Ansatz 214, 687, 697  
 Greifbarkeitsprüfung 532  
 Greifsysteme  
 - anpassungsfähige 447  
 - funktionsorientierte 444  
 Greiftechnik 443  
 Griff in die Kiste 443  
 Großserienfertigung 591

## H

Haftung  
 - vertragliche 200  
 Handhabungsflexibilität 527  
 Handlungsempfehlungen  
 - in der Montage 534  
 Handschuhbedienung 373  
 Hannoveraner Lieferkettenmodell 31  
 Head Mounted Display 469  
 Head up-Display 480  
 Heijunka 666  
 HMD *siehe* Head Mounted Display  
 Homogenisierung 386  
 Honen 593  
 Honzentren 593  
 Human Machine Interface 371

Hygieneklasse 389  
 Hygienezustand 418

## I

IAONA (Industrial Automation Open Networking  
 Alliance) 575  
 Ideengenerierungs- und Konzeptphase 263  
 Identifikationsnummer 458, 664  
 IEEE TSN-Standards 571  
 IFA-Lernfabrik 44  
 IFU Planungstisch 4.0 180  
 Immaterialgüterrecht 193  
 Incremental Manufacturing 436  
 individualisierte Produktion 622  
 individualisierter Kundenbedarf 621  
 individualisiertes Produkt 265  
 Individualisierung 665  
 Individualisierung von Produkten 621  
 Industrial Control Systems 116  
 Industrial Data Space 130, 132  
 Industrial Ethernet 569  
 Industrie 4.0 XXXIV, 111  
 Industrie-PC 562  
 Industrieroboter 433, 542  
 - Sonderbauformen 441  
 Informationsautomatisierung 661  
 Informationsdarstellung 477  
 Informationsmodell 558  
 Informationsmodellierung 577  
 Informationsstrukturierung 421  
 Informationssysteme 69  
 - durchgängige 678  
 Infrastructure as a Service 90  
 Initiierungsphase eines Projektes 244  
 In-Memory-Datenbanken 143  
 innerbetriebliche Kollaboration 162  
 innermaschinelles Verfahren 390  
 Innovationsprozesse 15  
 Innovationstypen 13  
 Instandhaltung 592, 640, 642  
 - Werkstückstatus-getriebene 316  
 Instandhaltungsmethodik  
 - proaktive 316  
 Instandhaltungsplanung 318  
 Integrationsgrad 380  
 Integrationstechnologien 637, 647  
 Interlocking-Abgleich 663  
 Internet der Dinge 489, 653  
 Intralogistik 489  
 ISA-95 580  
 Isolation 122  
 IT-Infrastruktur 618  
 IT-Sicherheit 112

IT-Sicherheitsrecht 206  
 IT-Sicherheitstechnologie 120  
 IT-Systeme  
 - Cloud-basierte 565

## K

Kanban  
 - elektronisches 661  
 Kapazitätsbalancierung 384  
 Kapazitätsmarkt 163  
 Kapselung  
 - modulare 355  
 Kleinserienfertigung 587  
 - individualisierte 691  
 Know-how-Diebstahl 118  
 Know-how-Schutz 123  
 Kognition 405  
 kohlenstoffverstärkter Kunststoff 644  
 Kollaboration 161  
 Kollaborationsplattform 472  
 Kollaborationsproduktivität 18  
 Kommissioniersysteme 466  
 Kommissionierung  
 - manuelle 477  
 Kommunikation 176, 309  
 Kommunikationsprotokolle 567  
 Kommunikationsschnittstelle 564  
 Kommunikationstechnik 104  
 Komponentenhärtung 122  
 Konfigurationsraum 542  
 Konnektor-Architektur 132  
 Konsumgüterindustrie 621  
 kontinuierliche Produktion 382  
 kontinuierliche Prüfung 122  
 kontinuierlicher Prozess 386  
 Kostensenkungspotenziale 275  
 kundenindividuelle Fertigung 665  
 kundeninnovierte Lösungen 266  
 Kundenorientierung 12, 15  
 Kundenwünsche 119, 679

## L

Ladungsträger 454  
 Lasermarkierung 304  
 Lastenheft 245  
 Lastenhefterstellung 227  
 Lastenheft für CPPA 228  
 Lead-User-Methode 264  
 LEAN Development 268  
 Lean Production XXXIII  
 Lebensdauerprognose 367  
 Lebensmittel 379

Lebensmittelbranche 456  
 Lebensmittelsicherheit 381  
 Lebensmittelverarbeitung 621  
 Lebenszyklusmanagement 460  
 Leistungserstellungsmodell 8  
 Leistungsmodell 7  
 Leitanwender 606  
 Lernfabrik Globale Produktion 605  
 Lesefeldausprägung 505  
 Linienanordnung 434  
 Logistik 183, 451  
 Logistik 4.0 712  
 Logistikmodule 486  
 Logistikplanung 465  
 Lokalisierung  
 - mit RFID 508  
 Lokalisierungssystem 649  
 Losgröße 1 162, 295, 467  
 Losgrößenplanung 668  
 Lösungsassistent 591

## M

Machbarkeitsuntersuchung  
 - RFID-System 502  
 Machine Learning 101  
 Makulaturreduktion 631  
 Manufacturing Change Management 218  
 Manufacturing Execution System (MES) 19, 137,  
 556, 601, 664, 683  
 Manufacturing Management System 589  
 Manufacturing Resource Planning (MRP II) 137  
 Maschinenflexibilität 526  
 Maschinenkomponentenmodelle 365  
 Maschinensteuerung 89  
 Maschinenstillstandzeiten 592  
 Mass Customization 257, 260, 265  
 Massenproduktion  
 - individualisierte 695  
 Materialbedarfe 37  
 Materialflussanalyse 711  
 Materialfluss-Interface 486  
 Materialflussmodule  
 - cyber-physische 491  
 Materialflusssysteme 471  
 - automatisierte 483  
 - Steuerungsentwicklung 485  
 Materialmodell 395  
 Material Requirements Planning (MRP) 137  
 Material-Traceability 662  
 Materialversorgung 668  
 MCM *siehe* Manufacturing Change Management  
 MCM-Prozess 220  
 Mechanikentwurf 250

mechatronische Simulation 414  
 Mehrwertdienst 92  
 Mensch-Maschine-Interaktion 252, 676  
 Mensch-Maschinen-Schnittstellen 476  
 Mensch-Maschine-Systeme 59, 645  
 Mensch-Roboter-Interaktion 77  
 Mensch-Roboter-Kollaboration 185  
 Mensch-Roboter-Kooperation 617  
 Mensch - Technik - Organisation 54  
 Mensch-und-Maschine-Interaktion 54  
 Messsysteme  
 - Selbst-Kalibrierung 714  
 Middleware 376  
 Migrationspfade 96  
 Migrationsstrategie 215  
 Mikrocontroller 563  
 Mitarbeiterunterstützung 358  
 mobile Endgeräte 116, 359  
 mobiler Roboter 622  
 Modellierungs-Software 245  
 Monitoring 383  
 Montage 513  
 Montageanleitungen 536  
 Montagekonzept  
 - wandlungsfähiges 638  
 Montagepläne 535  
 Montageplanung  
 - automatische 525  
 Montageprozesse 655  
 Mooresches Gesetz 654  
 Motion-Capturing 185  
 MQTT 569  
 MTConnect 568  
 MTO-Konzept 55  
 Multikopter 178  
 Multi-Level-Simulation 288, 290  
 Multi-Touch 371  
 Multitouch-Software-Interface 181

## N

NC-Planer 351  
 NC-Programme 351  
 NC-Programm-Generierung 681  
 Netnographie 261  
 Netzsegmentierung 121  
 Netzwerkanordnung 435  
 nichtlineare Arbeitspläne 311ff.  
 NoSQL 100  
 Nullfehler-Produktion 671

## O

Obfuskatoren 124  
 Object Name Service 459  
 Objektortung 141  
 ODVA-Maschinendatenmodell 577  
 Offsetdruck 631  
 Online-Datenverarbeitung 159  
 Online-Performance-Monitor 676  
 Online Research Communities 261  
 ONS *siehe* Object Name Service  
 OPC UA 107, 582  
 OPC UA Binar 567  
 OPC UA XML 568  
 OPC Unified Architecture 567  
 Open Innovation 257  
 Open Innovation-Wettbewerbe 263  
 Open Organisation 271  
 Ordnungsschikanen 551  
 Ortungssysteme  
 - kamerabasierte 482

## P

parallele Stoffströme 387  
 Parallelisierung 386  
 Parameteroptimierung 319  
 PAT 382  
 Perceptron 716  
 Personalführung 79  
 Pflichtenheft 227  
 Pharmaprodukte 379  
 Physical Unclonable Functions 126  
 Physik-Engine 415  
 Physiksimulation 549  
 Pick-by-Vision® 478  
 Piraterie 123  
 Planungsqualität 176  
 Platform as a Service 90  
 Plattform-basierte Kollaboration 161  
 Plattformtechnologien 21  
 PLM-System 678  
 Plug & Produce 536  
 Poka Yoke-System 661  
 PPS *siehe* Produktionsplanung und -steuerung  
 prädiktive Analyse 103  
 präskriptive Analyse 103  
 Predictive Analytics 10, 675  
 Predictive Maintenance 134  
 Predictive Policing 101  
 Prescriptive Analytics 675  
 primäre Variationsebene 388  
 Private Cloud 90  
 Probabilistic Roadmap Method 543

Product Backlog 16  
 Produkt 616  
   - kundenindividuelles 694  
 Produktarchitektur 266, 272  
 Produktentstehungsprozess 350  
 Produktentwicklung 678  
 Produktflexibilität 431, 526  
 Produktinkrement 17  
 Produktionsänderungen  
   - Analyse von 222  
 Produktionsanlagen  
   - wandelbare 242  
 Produktionsarbeit 62  
 Produktionsbedarfsplanung 40  
 Produktionscontrolling 32, 43  
 Produktionskonzepte 692  
 Produktionsmitarbeiter 63  
 Produktionsmittel-Eigenschaften 355  
 Produktionsmodul 695  
 Produktionsplanung und -steuerung (PPS)  
   31, 49, 139  
 Produktionsplattformen  
   - Cloud-basierte 92  
 Produktionsprogrammplanung 32, 35  
 Produktionsschicht 699  
 Produktionssysteme  
   - Cyber-physische 281  
   - flexible 668  
 Produktkonfiguration  
   - individuelle 665  
 Produkt-Lebenszyklus 122  
 Produktmodularität 384  
 Produktpiraterie 123  
 Produktschicht 698  
 Produktschutz 125  
 Prognosefähigkeit 26  
 Programmierung  
   - intuitive 439  
 Protokoll-Bindings 567  
 Prozessanalyse 382  
 Prozessdaten 158, 673  
 Prozessdatenerfassung 507  
 Prozessdatenrückführung 359  
 Prozessdokumentation 164  
 Prozesse  
   - selbstlernende 315  
 Prozessevaluation 360  
 Prozess-Maschine-Simulation 353  
 Prozessmodell 405, 418  
 Prozessregelung 325, 403  
 Prozesssteuerung 403  
   - dezentrale 557  
 Prozess-Traceability 663  
 Prozessüberwachung 313, 656

Prozessveranschaulichung 421  
 Prüfsysteme 164  
 Prüf-Traceability 662  
 Prüfverfahren 672  
 Public Cloud 90  
 PUF-Technologie 126

## Q

QR-Code 662  
 Qualifikation 720  
 Qualifikationsanforderungen 65  
 Qualifizierung 418  
 Qualität 154, 176  
 Qualitätsdaten 394  
 Qualitätskriterium 394  
 Qualitätsmanagement 155  
 Qualitätsmessung 394  
 Qualitätsparameter 391  
 Qualitätssicherung 160, 358, 671  
 Querschnittstechnologien 642  
 Q-Watchdog 676

## R

Radio Frequency Identification *siehe* RFID  
 Ransomware 114  
 Reader 511  
 Received Signal Strength Indicator *siehe* RSSI-Wert  
 Rechtsgeschäfte 202  
 Redundanz 387  
 Referenzmodell 686  
 Reifegradmodelle 215  
 Reinigungsprozess 417  
 Reinigungssystem 418  
 Reinigungsvalidierung 418  
 Rekonfiguration 386  
 Rekonfigurationsklassen 387  
 Requirements Engineering 226  
 Ressourceneffizienz 394  
 Reverse Engineering 123  
 RFID 497, 560, 655  
 RFID-Chip 297, 324, 590, 601  
 RFID-Komponenten 499  
 RFID-Projekte 499  
 RFID-System 309  
 RFID-Tag 698  
 RFID-Technologie 107  
 RFID-Transponder 336  
 Ringanordnung 434  
 Risikomanagement 4  
 Robo-Boss 101  
 Roboter 617  
   - mobile 642

Robotersystem  
 - ortsflexibles 644  
 Rohstoffeigenschaften 383  
 Rohstoffqualität 385  
 RSSI-Wert 502  
 Rumpfsektionenmontage 638  
 Rüsten 590  
 Rüstkontrolle 661, 663  
 Rüstoptimierung 670

## S

Same Day Delivery 162  
 Schallemission 332  
 Schlanke Produktion XXXIII  
 Schnittstellen 55, 475  
 - standardisierte 328  
 - zwischen Cloud und Produktion 95  
 Schulungen 122  
 Schutzrichtungen 192  
 Schutzziele 112  
 Schwingungen 333  
 Scrum 268  
 Scrum-Methodik 15  
 SDN *siehe* Software Defined Networking  
 Secure Memory Device 125  
 Sekundärbedarfsplanung 32, 37  
 Selbstkonfiguration 383  
 selbstoptimierende Maschinen 403  
 selbstoptimierende Prüfsysteme 164  
 Selbstoptimierung 164, 383  
 Selbstparametrierung 383  
 Selbst-Programmierung 542  
 Sensorik 332  
 Sensorintegration 438  
 sensorischer Abgleich 533  
 Sensortypen 300  
 Serialized Global Trade Item Number 462  
 SGTIN *siehe* Serialized Global Trade Item Number  
 Shared Memory 354  
 Sicherheitsarchitektur 132  
 Sicherheitsleitfaden 121  
 Sicherheitsprotokolle 121  
 Sicherheitstechnik 617  
 Siemens Industry Mall 666  
 Simulation 414  
 Simulationsmethode 414f.  
 Simulationsmodell 470  
 Smart Data 673  
 Smart Devices 160, 371  
 Smarte Feldgeräte 561f.  
 Smarte Objekte 113  
 Smarte Produkte 118, 123, 558  
 Smarte Vernetzung 566  
 Smart Factory 601, 647  
 Smart Factory Apps 119  
 Smart Factory in der Flugzeugproduktion 637  
 SmartFactory<sup>KL</sup> 693  
 Smart-Tool 334  
 Smartwatch 375  
 SMD-Fertigung 660  
 Social Media-Daten 159  
 Software as a Service 90  
 Software Defined Networking 571  
 Software-Entwurf 252  
 Softwaregenerierung  
 - automatische 485  
 Software Reverse Engineering 123  
 Softwareschutz 197  
 spanende Fertigung 587  
 Spannsystem  
 - flexibles 589  
 Speicherprogrammierbare Steuerungen  
 19, 115, 562  
 Speichersystem 387, 400  
 Speichertechniken 307  
 Speicherung  
 - magnetische 307  
 Spracherkennung 478  
 Spritzgussmaschinen 597  
 SPS *siehe* speicherprogrammierbare Steuerungen  
 Standard for the Exchange of Product model data  
 579  
 Standardisierung 176  
 Standortplanung 180  
 STEP *siehe* Standard for the Exchange of Product  
 model data  
 Steuerung  
 - verteilte 487  
 Steuerungsansätze  
 - zentrale 557  
 Steuerungsarchitektur 142  
 Steuerungsplattformen  
 - Cloud-basierte 93  
 Stillstandszeit 401  
 strukturelle Systemmodellierung 223  
 Stückzahlflexibilität 431  
 Subsysteme in CPPA 246  
 Subsystementwurf 249  
 Supply Chain 453  
 Supply Chain Management 666  
 Surface Mounted Devices 654  
 synchronisierte Einzelfertigung 162  
 SysML 245  
 Systemarchitektur  
 - für Industrie 4.0-Produktionsanlagen 694  
 Systemdefinition 223  
 Systemergonomische Analyse 59

**T**

Taktzahl 389  
 Taxonomie der Fähigkeiten 520  
 Taylorismus *XXXI*  
 Teamcenter 680  
 Thermobehälter  
 - intelligenter 457  
 Thermoformen 391  
 Time Sensitive Networking 570  
 Topologieoptimierung 319  
 Totally Integrated Automation 679  
 Touchscreen-Bedienung 372  
 Traceability 656f., 661  
 - externe 663  
 Traceability-System 659  
 Trackingsystem 470  
 Tracking und Tracing 460  
 Transfersysteme 429  
 - roboterbasierte 437  
 Transformationslinie 4  
 Transformationsstrategien 213  
 Transponder 500  
 Transport-Leitsystem 602  
 Transportmodul 400  
 Transportwege  
 - autonome 669  
 Treibermodule 487  
 Trilateration 509  
 Trusted Platform Module 125  
 TSN *siehe* Time Sensitive Networking  
 Turbinenschaufelmontage 639

**U**

UML 245  
 Unternehmensgeheimnisse 195  
 Unternehmenslogistik 451  
 Urbanisierung 381  
 Useware-Engineering 237

**V**

Validierung 418  
 Value Generator 23  
 Variantenflexibilität 431  
 Variantenvielfalt 692  
 VDMA Industrie 4.0-Readiness-Check 215  
 Verarbeitbarkeit 383  
 Verarbeitungsmaschine 379, 403  
 Verarbeitungsprozess 383  
 Verarbeitungssystem 379  
 Verarbeitungstechnik 621  
 Verarbeitungsverhalten 383

Verarbeitungsvorgang 380  
 Verarbeitungszeit 386  
 Verbrauchsgüter 379  
 Vermarktungsmodell 8  
 Vernetzung 18  
 - smarte 566  
 Verpackung 382  
 Verpackungsmaschine 623  
 Verpackungsmaschinenbau 625  
 Verschleißarten 331  
 Verschleißerkennung 596  
 Verschleißuntersuchung 333  
 Verschraubbarkeitsprüfung 532  
 Verwertungsfunktion 192  
 Viable System Modell 270  
 Vibrationswendelförderer 549  
 Virtual Reality 466  
 virtuelle Inbetriebnahme 414  
 virtuelle Netzwerkfunktionen 575  
 virtuelle Repräsentanz 516  
 virtuelles Modell 113  
 Visualisierung 619  
 Visualisierung von Prozessdaten 354  
 VLAN-Ansatz 576  
 V-Modell 239, 679  
 Vorgehensmodell  
 - IT-Security 122  
 Vorgehensmodell des Engineerings 241  
 Vorgehensmodelle der Bediensystemgestaltung 238  
 Vorgehensmodelle der Elektrotechnik/Elektronik 236  
 Vorgehensmodelle der Mechatronik 240  
 Vorgehensmodelle der Softwareentwicklung 237  
 Vorgehensmodelle zur Entwicklung von CPS 241  
 Vorgehensmodell zur Entwicklung von CPPA 244  
 VR *siehe* Virtual Reality  
 VR-Modell 468

**W**

Wandlungsbefähiger 616  
 Wandlungsfähigkeit 242, 609  
 WAN-Kommunikation 573  
 Wearable-Technologien 479  
 Werkerinformation  
 - Tablet-basiert 75  
 Werkerinformationssysteme 66  
 Werkstück 295  
 - gentelligentes 296  
 - Gestaltabweichung 315  
 Werkstückidentifikation 304  
 Werkstückoberflächen  
 - Online-Bewertung 314

- Werkstücktransfer 442
  - Werkzeug 323
    - aktorisches 305
    - intelligentes 324
  - Werkzeugauswahlprozess 348
  - Werkzeugdatenaustausch 464
  - Werkzeugmanagement 334
  - Werkzeugmaschine 341
    - nutzerintegrierte 370
    - selbstüberwachende 364
  - Werkzeugspannfutter 338
  - Werkzeug-Supply Chain 460
  - Werkzeugüberwachung 331
  - Werkzeugverschleiß 327, 331
  - Werteverständnis 81
  - Wertschöpfungsketten
    - dynamische 665
  - Wertschöpfungsprozess 116
  - Wertschöpfungssystem 20
  - Wiederherstellungsplan 122
  - Wiki-basierte Managementsysteme 165
  - Wirbelstromsensor 301
  - Wirkpaarung 396
  - Wirtschaftlichkeitsbewertung 615
  - Wissensmodellierung 224
  - Workflowgestaltung 375
- Z**
- Zeitspanvolumen 314
  - Zerspanungsprozess 327
  - Zielposen 546
  - Zielsystemeaufteilung 547
  - Zuführsysteme
    - Hardwareauslegung 548
  - Zustandsüberwachung 102, 325, 363