

# 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>Günther 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	Fremdbezugsgrobplanung 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 Fichteler, 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	Energietransparente 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
 <b>TEIL B</b>		
<b>Mechatronische (cyber-physische) Automatisierungskomponenten</b>		
<b>1</b>	<b>Das gentelligete Werkstück</b> .....	<b>295</b>
	<i>Berend Denkena, Marc-André Dittrich, Florian Uhlich, Lukas Maibaum, Tobias Mörke</i>	
1.1	Die Vision: Das gentelligete Werkstück .....	295
1.2	Die Vision: Einordnung gentelliger 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 Wonnenberg, 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 Produktanforderungen .....	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 Feinzerlegung 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