

<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 Tönnes</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 Workerinformationssysteme .....	66
3.4.1	Übersicht Workerinformationssysteme .....	68
3.4.2	Individuelle Workerinformation .....	72
3.4.3	Dynamische Workerinformation .....	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 Hügle, 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> . . . . .	111
	<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> . . . . .	137
	<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 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

## 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 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 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 Verarbeitungsanlagen und Verpackungsmaschinen .....</b>	<b>379</b>
<i>Jens-Peter Majschat, 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 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 Honssysteme	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

Die Autoren danken den Herausgebern und dem Verlag für die Unterstützung und die Möglichkeit, die Ergebnisse der Lernfabrik Globale Produktion in diesem Buch zusammenzufassen. Sie danken auch den beteiligten Unternehmen für die Bereitstellung der Daten und die Unterstützung bei der Umsetzung der Skalierbarkeit der Montagesysteme. Ein besonderer Dank geht an die Lernfabrik Globale Produktion für die Entwicklung und Umsetzung der Skalierbaren Automatisierung in der Montage.

<b>3 Verarbeitungstechnik</b> .....	621
<i>Jens-Peter Majschat, 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 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-Systemsschicht	702
6.3	Anwendungsszenario	703
6.4	Zusammenfassung und Ausblick	706

<b>7 Anwendungsfeld Automobilindustrie .....</b>	<b>709</b>
<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>	<b>725</b>