

Vorwort	VII
Der Herausgeber	XXIII
Autorenverzeichnis	XXV
Von CIM zu Industrie 4.0	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

1 Geschäftsmodell-Innovation	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
2 Veränderung in der Produktionsplanung und -steuerung	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
3	Der Mensch in der Produktion von Morgen	51
	<i>Gunther Reinhart, Klaus Bengler, Christiane Dollinger, Carsten Intra, Christopher Lock, Severina Popova-Dlogosch, Christoph Rimpau, Jonas Schmidtler, 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
4	Daten, Information und Wissen in Industrie 4.0	89
	<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
5	Cyber-Sicherheit in Industrie 4.0	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
6	Organisation, Qualität und IT-Systeme für Planung und Betrieb	137
	<i>Michael Niehues, Gunther Reinhart, Robert H. Schmitt, Günther Schuh, Felix Brambring, Max Ellerich, Hannes Elser, Daniel Frank, Sebastian Groggert, Andreas Gützlaß, 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
7	Aspekte der Fabrikplanung für die Ausrichtung auf Industrie 4.0	169
	<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
8	Rechtsfragen bei Industrie 4.0: Rahmenbedingungen, Herausforderungen und Lösungsansätze	191
	<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
9	Strategien zur Transformation der Produktionsumgebung	213
	<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
10	Systematische Einbindung von Kunden in den Innovationsprozess	257
	<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
11	Industrie 4.0 und die Steigerung der Energieeffizienz in der Produktion	279
	<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		
1	Das gentelligende Werkstück	295
	<i>Berend Denkena, Marc-André Dittrich, Florian Uhlich, Lukas Maibaum, Tobias Mörke</i>	
1.1	Die Vision: Das gentelligende Werkstück	295
1.2	Die Vision: Einordnung gentelligender 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

2	Das intelligente Werkzeug	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
3	Die vernetzte Werkzeugmaschine	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
4	Verarbeitungsanlagen und Verpackungsmaschinen	379
	<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
5	Transfersysteme	429
	<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

6	Logistik 4.0	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
7	Montage 4.0	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
8	Wandelbare modulare Automatisierungssysteme	555
	<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**

1	Vernetzte Anlagen für die spanende Fertigung	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	Lösungsassistent 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
2	Montagesysteme: Skalierbare Automatisierung in der „Lernfabrik Globale Produktion“	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

3	Verarbeitungstechnik	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
4	Anwendungsfeld Flugzeugbau	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

5	Intelligent vernetzte Elektronikproduktion	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
6	Die SmartFactory für individualisierte Kleinserienfertigung	691
	<i>Stephan Weyer, Fabian Quint, Stefanie Fischer, Dominic Gorecky, Detlef Zühlke</i>	
6.1	SmartFactory ^{KL} -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

7	Anwendungsfeld Automobilindustrie	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
	Stichwortverzeichnis	725