
Handbuch Industrie 4.0

Thomas Bauernhansl
Hrsg.

Handbuch Industrie 4.0

Band 1: Produktion

3. Auflage

mit 122 Abbildungen und 13 Tabellen

Unter Mitwirkung von Andreas Bildstein, Fraunhofer-Institut für
Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Kompetenzzentrum
DigITools für die Produktion, Stuttgart

 Springer Vieweg

Hrsg.

Thomas Bauernhansl
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

ISBN 978-3-662-58531-3 ISBN 978-3-662-58532-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58532-0>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2014, 2016, 2023
Ursprünglich erschienen unter: Vogel-Heuser, B., Bauernhansl, T., ten Hompel, M., „Handbuch Industrie 4.0 Bd. 1“

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Lektorat: Alexander Grün

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Ultra-kompakte Industrie-PCs: Multicore-Rechenleistung in IP20 und IP65/67



Mit Maßen von nur 82 x 82 x 40 mm und einzigartiger Montageflexibilität kann der Ultra-Kompakt-Industrie-PC C6015 auch kleinste Bauräume optimal ausnutzen. Die besonders robuste Variante C7015 dagegen bringt zusätzlich die Multicore-Rechenleistung direkt an die Maschine und erschließt so weitere Einsatzfelder. Die integrierte Intel-Atom®-CPU mit bis zu 4 Kernen erlaubt simultanes Automatisieren, Visualisieren und Kommunizieren auch in anspruchsvollen industriellen IP65/67-Anwendungen. Neben klassischen Steuerungsaufgaben eignen sich beide Ultra-Kompakt-IPCs besonders gut für den Einsatz als Gateway zur Vernetzung von Maschinen und Anlagenteilen – dank hoher Rechenleistung auch mit aufwendiger Vorverarbeitung großer Datenmengen. Dank des integrierten EtherCAT P-Anschlusses beim C7015 sind zusätzlich flexible I/O-Erweiterungen möglich.

Scannen und alles über die
Ultra-Kompakt-Vorteile erfahren



Vorwort zur 3. Auflage

Mit der 1. Auflage dieses Buches, das bereits 2014 unter dem Titel „*Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Handel*“ (Hrsg.: Bauernhansl, ten Hompel, Vogel-Heuser) erschienen ist, wurde ein wichtiger Schritt unternommen, das Thema Industrie 4.0 in der Fachliteratur zu verankern. Doch bereits damals war uns als Herausgeber klar, dass ein statisches Buch einer Entwicklung dieser Tragweite und Dynamik nicht gerecht werden kann. Aus diesem Grund haben wir entschieden, dieses Werk ab der 2. Auflage in ein Handbuch zu überführen, um einen Rahmen zu schaffen, die Geschichte der vierten industriellen Revolution fortzuschreiben. Der große Erfolg des „*Handbuch Industrie 4.0*“ und die rasanten technologischen Entwicklungen münden nun in einer 3. Auflage des Nachschlagewerks. Dieses Werk wird sowohl online als auch in gedruckter Form veröffentlicht und besteht aus einzelnen, in sich abgeschlossenen Beiträgen zu dem Thema Industrie 4.0 in Logistik, Produktion und Automatisierung. Die Online-Version kann, ähnlich einem Wiki, fortlaufend ergänzt und weiterentwickelt werden und bietet die Grundlage, in regelmäßigen Abständen eine neue Auflage der Druckversion zu verlegen.

Um dem Format eines Nachschlagewerks gerecht zu werden, sind nicht nur Beiträge aus der 2. Auflage übernommen und überarbeitet worden, sondern auch zahlreiche Beiträge hinzugekommen. Im vorliegenden Band Produktion sind das vor allem Beiträge aus den folgenden Themenbereichen:

- Digitale Transformation in der Produktion
- Digitalisierung, Virtualisierung, Vernetzung und Autonomisierung als Stufen der Digitalen Transformation
- Steuerung aus der Cloud
- Cyber-physische Systeme
- KI-Anwendungsfälle in der Produktion
- Autonome Produktion
- Produktionsarbeit 4.0
- Kompetenzentwicklung für Industrie 4.0
- KI-basierte Assistenzsysteme
- Ganzheitliche Produktionssysteme
- XaaS-Geschäftsmodelle für die Produktion
- Standardisierung

Zur Realisierung dieser umfassenden Erweiterung konnten wir, wie bereits in den ersten beiden Auflagen, zahlreiche Fachleute aus Forschung und Wirtschaft als Autoren gewinnen, um das Thema aus wissenschaftlicher und praktischer Sicht aufzubereiten. Erst die Betrachtung aus beiden Blickwinkeln ermöglicht es unserer Auffassung nach, den Überblick über das Mögliche und die Vision in einem Werk zu vereinen und Migrationspfade hinein in die vierte industrielle Revolution aufzuzeigen. In diesem Sinne ist das Handbuch Industrie 4.0 als ein lebendiges Nachschlagewerk für Forscher, Praktiker und Studierende gleichermaßen zu verstehen und richtet sich an alle Leserinnen und Leser, die sich mit diesem spannenden und schnelllebigen Thema beschäftigen wollen.

Diese Druckversion umfasst den Stand der Dinge im Frühjahr 2023 und ist in einem Team gleichberechtigter Partner entstanden. Wir danken allen Autoren, dem Verlag, dem Lektorat und all denen, die sonst noch zum Gelingen beigetragen haben, sehr herzlich. Ganz besonderer Dank gilt Gabriele McLemore vom Springer-Verlag und unseren Mitarbeitern Dr. Andreas Bildstein, Felix Feldmann und Michaela Franke, die durch ihren unermüdlichen Einsatz in Koordination und Organisation die Grundlage für die Aktualisierung des Handbuchs gelegt haben.

April 2023

Thomas Bauernhansl
Birgit Vogel-Heuser
Michael ten Hompel

Vorsprung durch Innovation.



MAXOLUTION® connected

Vernetzung vom Shopfloor bis zur IT-Ebene

Innovative Softwarelösungen für die digitale Transformation

- Connectivity der kompletten Wertschöpfungskette und Integration in die IT-Ebene via SEW Edge Devices
- digitaler Zwilling in hochauflösender 3D Visualisierung der Anlage – im gesamten Produktionszyklus und für jede Projektphase
- intelligente Sensorik (5G) und durchgängige Kommunikation zur Erfassung und Speicherung weitreichender Parameter zusätzlich zu den Prozessdaten
- maximale Planungssicherheit, durchgängige Prozesstransparenz und höchste Anlagenverfügbarkeit sowie umfassende Überwachungs- und Diagnosemöglichkeiten



www.sew-eurodrive.de/maxolution

Fahrt aufnehmen für Ihre Karriere!

www.sew-eurodrive.de/karriere

Inhaltsverzeichnis

Teil I Die 4 Stufen der Digitalen Transformation	1
Die Entwicklungsstufen der Digitalen Transformation	3
Thomas Bauernhansl	
Steuerung aus der Cloud	13
Armin Lechler und Jan Schlechtendahl	
Cyberphysische Systeme für die prädiktive Instandhaltung	27
Dominik Lucke, Marcus Defranceski und Thomas Adolf	
Von der Automatisierungspyramide zu Unternehmenssteuerungs- Netzwerken	45
Michael Kleinemeier	
Qualitätssicherung in der Produktion	53
Ira Effenberger, Hartmut Eigenbrod, Andreas Frommknecht, Christian Jauch, Julia Denecke und Marco Huber	
KI-Anwendungsfälle in der Produktion	71
Philipp Wagner, Tobias Nagel, Christoph Hennebold, Marco Huber und Werner Kraus	
Autonome Produktion	95
Simon Schumacher und Dennis Bauer	
Teil II Produktionsarbeit 4.0	123
Weiterbildung und Kompetenzentwicklung für die Industrie 4.0 in KMU	125
Wilhelm Bauer, Bernd Dworschak und Helmut Zaiser	
Produktionsarbeit der Zukunft – Das Innovationslabor Future Work Lab	149
Simon Schumacher, Henry Himmelstoß und Tobias Eusterwiemann	
Verkürzte Entscheidungsfindung in der Produktion	171
Marcus Defranceski	

Der Mensch in der Industrie – Innovative Unterstützung durch Augmented Reality	185
Jana Jost, Thomas Kirks und Benedikt Mättig	
KI-basierte Assistenzsysteme für die Industrie 4.0	209
Karsten Lensing	
Spielerisches Lernen zur Weiterentwicklung der Lean Production durch Digitalisierung	239
Ozan Yesilyurt, Viorel Petrut Draghici, Dennis Bauer und Laura Körting	
Teil III Digitale Transformation - Strategie und Umsetzung	259
Ganzheitliche Produktionssysteme	261
Simon Schumacher und Andreas Bildstein	
Everything-as-a-Service Geschäftsmodelle für die Industrie	277
Oliver Schöllhammer, Jan Lukas Schmitt, Stephan Nebauer und Thomas Bauernhansl	
Standardisierung für Industrie 4.0	295
Olga Meyer und Daniel Stock	
Use Case Production	321
Johann Soder	
Cloudbasiertes Intelligentes C-Teile-Management	343
Ozan Yesilyurt, Alexander Theologou und Andreas Schlereth	
Sachwortverzeichnis	355



Produktionsversorgung automatisch im Griff

Think Tomorrow.

Wie können Intralogistiklösungen nachträglich an neue Marktanforderungen angepasst und gleichzeitig Produktivitätssteigerungen und Kosteneinsparungen erzielt werden? Mit flexibel integrierbaren FTS und Robotik automatisieren und vernetzen wir Ihre innerbetrieblichen Materialflüsse individuell und zukunftsorientiert.

Autorenverzeichnis

Thomas Adolf Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Dennis Bauer Energieflexible Produktion & Energiedatenanalyse Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Wilhelm Bauer Fraunhofer IAO, Stuttgart, Deutschland

Thomas Bauernhansl Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Andreas Bildstein Kompetenzzentrum Digitale Werkzeuge in der Produktion, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Marcus Defranceski Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Julia Denecke Fakultät Maschinen und Systeme, Hochschule Esslingen, Esslingen a.N., Deutschland

Viorel Petrut Draghici Fraunhofer-Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA, Stuttgart, Deutschland

Bernd Dworschak Fraunhofer IAO, Stuttgart, Deutschland

Ira Effenberger Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Hartmut Eigenbrod Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Tobias Eusterwiemann Kompetenzzentrum Digitale Werkzeuge in der Produktion, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Andreas Frommknecht Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Christoph Hennebold Abteilung Cyber Cognitive Intelligence (CCI), Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Henry Himmelstoß Kompetenzzentrum Digitale Werkzeuge in der Produktion, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Marco Huber Abteilung Cyber Cognitive Intelligence (CCI), Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF, Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Christian Jauch Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Jana Jost Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund, Deutschland

Thomas Kirks Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund, Deutschland

Michael Kleinemeier SAP SE, SAP Service & Support, Walldorf, Deutschland

Laura Körting Fraunhofer-Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA, Stuttgart, Deutschland

Werner Kraus Abteilung Roboter- und Assistenzsystem, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Armin Lechler Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Karsten Lensing IngenieurDidaktik, TU Dortmund, Dortmund, Deutschland

Dominik Lucke Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

ESB Business School Hochschule Reutlingen, Reutlingen, Deutschland

Benedikt Mättig Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund, Deutschland

Olga Meyer Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Tobias Nagel Abteilung Cyber Cognitive Intelligence (CCI), Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Stephan Nebauer Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Jan Schlechtendahl Lohr am Main, Deutschland



Empowering the All Electric Society

Technische Lösungen für eine lebenswerte Welt

Eine globale Gesellschaft, in der regenerative und bezahlbare elektrische Energie im Überfluss vorhanden ist: Das ist die All Electric Society – das wissenschaftlich begründete Zukunftsbild einer CO₂-neutralen und sich nachhaltig entwickelnden Welt. Der Weg dorthin führt über die umfassende **Elektrifizierung, Vernetzung** und **Automatisierung** aller relevanten Lebens- und Arbeitsbereiche. Phoenix Contact befähigt seine Kunden mit zahlreichen Produkten, Lösungen und Anwendungsbeispielen, diese Transformation hin zu einer zukunftsfähigen Industriegesellschaft aktiv zu gestalten.

#allelectricsociety

Mehr Informationen unter [phoenixcontact.com/AES](https://www.phoenixcontact.com/AES)

Andreas Schlereth Fraunhofer-Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA, Stuttgart, Deutschland

Jan Lukas Schmitt Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Oliver Schöllhammer Unternehmensstrategie und – entwicklung, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Simon Schumacher Kompetenzzentrum Digitale Werkzeuge in der Produktion, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Johann Soder SEW-EURODRIVE GmbH & CO KG, Bruchsal, Deutschland

Daniel Stock Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Alexander Theologou Bossard Deutschland GmbH, Illerrieden, Deutschland

Philipp Wagner Abteilung Cyber Cognitive Intelligence (CCI), Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart, Deutschland

Ozan Yesilyurt Fraunhofer-Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA, Stuttgart, Deutschland

Helmut Zaiser Fraunhofer IAO, Stuttgart, Deutschland