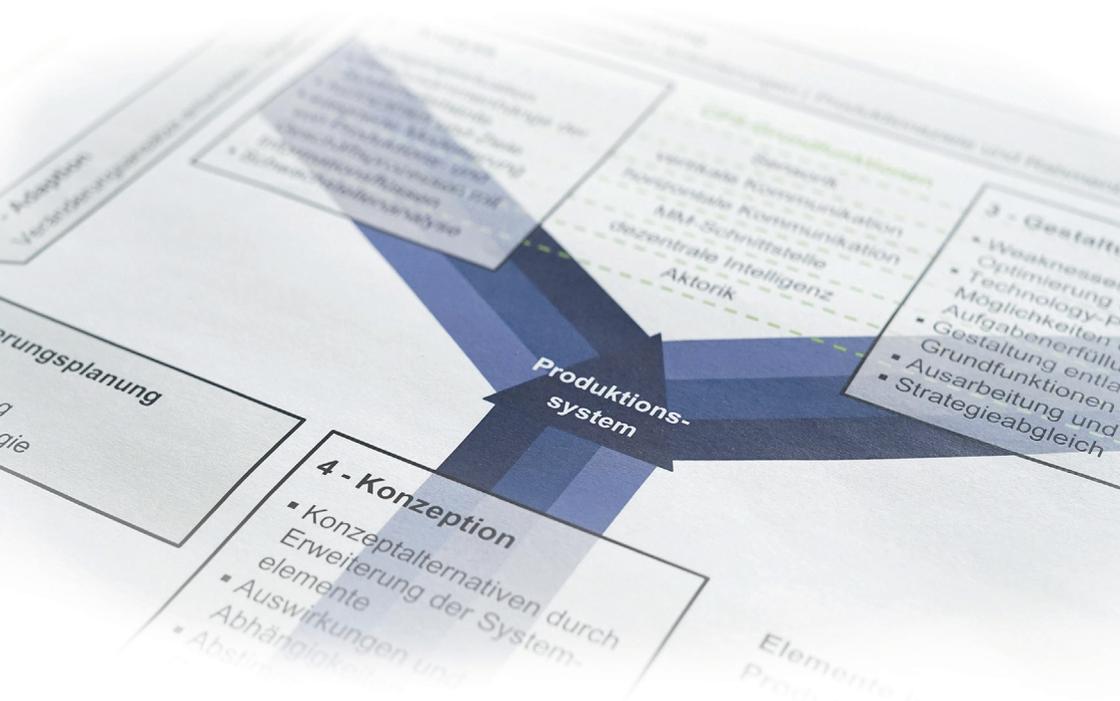


# Verfahren zur Planung des Einsatzes von Cyber-Physischen-Systemen in der Produktion

Christoph Taphorn



Verfahren zur Planung des Einsatzes von  
Cyber-Physischen-Systemen in der Produktion

Der Graduate School of Excellence  
advanced Manufacturing Engineering der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

von

Dipl.-Ing. **Christoph Werner Josef Taphorn**  
aus Cloppenburg

Hauptberichter:

**Prof. Dr.-Ing. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. mult. Engelbert Westkämper**

Mitberichter:

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihm**

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dieter Spath**

Tag der mündlichen Prüfung: 24.06.2019

Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME)  
der Universität Stuttgart

2019



Berichte aus der Fertigungstechnik

**Christoph Werner Josef Taphorn**

**Verfahren zur Planung des Einsatzes von  
Cyber-Physischen-Systemen in der Produktion**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag  
Düren 2019

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7028-6

ISSN 0945-0769

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort und Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand an der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) der Universität Stuttgart in Kooperation mit der agiplan GmbH. Da eine Dissertation nur mit viel Unterstützung aus dem Umfeld zum Erfolg werden kann, beginne ich diese Arbeit mit einer Danksagung an alle, die mir in den letzten Jahren so helfend zur Seite gestanden haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Engelbert Westkämper, der mich mit seiner wissenschaftlichen Expertise und seinen fundierten Kenntnissen zur Produktion bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt hat, mir dabei aber stets den nötigen Freiraum für eigene Ideen gewährt hat. Die regelmäßigen Diskussionen mit ihm haben mich gleichzeitig motiviert und herausgefordert. Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Wilfried Sihn und Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichts sowie ihre wertvollen Hinweise rund um die Themen Cyber-Physische-Systeme, Digitalisierung und Produktion.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen von der agiplan GmbH bedanke ich mich für die kollegiale und freundschaftliche Unterstützung der letzten Jahre. Ein besonders herzlicher Dank geht in diesem Zusammenhang an meinen Vorgesetzten Herrn Dr. Jürgen Bischoff. Mit seiner breiten Erfahrung rund um die Produktion war er immer zu wertvollen fachlichen Diskussionen bereit und hat so wesentlich zur Ausgestaltung der Arbeit beigetragen.

Für die engagierte Organisation und die Hilfsbereitschaft danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der GSaME. Die Möglichkeit, mich interdisziplinär zu qualifizieren und gleichzeitig Erfahrungen in der Wissenschaft und der industriellen Anwendung zu erlangen, empfand ich als echte Bereicherung. Insbesondere danke ich Herrn Dipl.-Ing. Hans-Friedrich Jacobi für die vertrauensvolle Zusammenarbeit, die intensiven Diskussionen und die kritischen Hinweise.

Den Doktorandinnen und Doktoranden an der GSaME, die meinen Weg begleitet haben, danke ich für den offenen fachlichen Austausch und die große Motivation und Aufmunterungen in den letzten Jahren. Die Diskussionen und Eindrücke aus verschiedenen Fachdisziplinen haben mir geholfen, „über den Tellerrand hinaus zu schauen“ und waren für die Erstellung einer interdisziplinären Arbeit zur Digitalisierung sehr wichtig.

Mein abschließender herzlicher Dank gebührt meiner Familie und meinen Freunden, ohne deren Zuspruch und Motivation diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Meinen Eltern Werner und Martina Taphorn danke ich für ihre Förderung und den Rückhalt, den sie mir stets gegeben haben und es mir so ermöglicht haben, meinen Weg zu gehen. Meiner Frau Myriam und meinen Kindern Emil und Klara danke ich für die Aufmunterung, die Rücksichtnahme und die Zeit, die sie mir für das Erstellen der Arbeit gegeben haben, und auch dafür, dass sie mich immer wieder bestärkt haben, meine Ziele zu verfolgen.



---

**Inhaltsverzeichnis**

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>IV</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>VII</b>
<b>KURZFASSUNG</b> .....	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation .....	2
1.2 Problemstellung.....	6
1.3 Zielsetzung und Aufgabenstellung.....	7
1.4 Eingrenzung Untersuchungsbereich.....	8
1.5 Vorgehen und Aufbau der Arbeit.....	9
<b>2 DIGITALISIERUNG DER PRODUKTION</b> .....	<b>11</b>
2.1 Strukturen der industriellen Fertigung.....	11
2.2 Produktionssysteme .....	14
2.3 Digitalisierung der Produktion.....	15
2.3.1 Industrie 4.0.....	15
2.3.2 Cyber-Physische Systeme.....	16
2.4 Cyber-Physische Produktionssysteme .....	18
2.4.1 Merkmale des CPPS .....	21
2.4.2 Strategische Bedeutung und Ziele von CPPS .....	22
2.5 Stand der Wissenschaft und Technik .....	25
2.5.1 Bestehende Ansätze zur Unterstützung des Digitalisierungsprozesses.....	26
2.5.2 Untersuchung von Systemelementen und Wirkzusammenhängen .....	33
2.5.3 Planung und Gestaltung von Transformationsprozessen .....	38
2.5.4 Synchronisation von Strategien .....	40
2.6 Abgeleitete Defizite und Handlungsbedarf.....	42
<b>3 GRUNDLAGEN</b> .....	<b>45</b>
3.1 Strategische Planung .....	45
3.1.1 Zielsystem der Produktion .....	47
3.1.2 Elemente einer Produktions- und IT-Strategie .....	48
3.1.3 Entwicklung einer Produktionsstrategie .....	50
3.2 Prozessanalyse .....	51
3.2.1 Benötigte Sichten auf den Prozess.....	52

3.2.2	Methoden zur Prozessanalyse.....	53
3.2.3	Kennzahlenanalyse .....	55
3.2.4	Schwachstellenanalyse .....	55
3.3	Prozess- und Innovationsmanagement bei der Digitalisierung .....	56
3.3.1	Arten von Innovationen / Auffinden von Innovationsansätzen .....	57
3.3.2	Kreativitätstechniken.....	59
3.4	Methoden zur strategisch-taktischen Bewertung .....	59
3.4.1	Bewertung und Auswahl unter Unsicherheit .....	60
3.4.2	Ermittlung von Aufwand und Nutzen.....	61
3.4.3	Strukturierung von Aufwand- und Nutzelementen.....	62
3.5	Vorgehen zur Realisierungsplanung.....	64
3.5.1	Projektmanagement.....	65
3.5.2	Methoden des Projektportfoliomanagements.....	66
3.6	Grundlagenfazit und Ableitung von Anforderungen an das Verfahren .....	68
<b>4</b>	<b>VERFAHREN ZUR PLANUNG DES EINSATZES VON CPS IN DER PRODUKTION....</b>	<b>71</b>
<b>5</b>	<b>DETAILLIERUNG DES VERFAHRENS.....</b>	<b>75</b>
5.1	Einflussgrößen, Anforderungen und Zielsetzung im Verfahren.....	75
5.1.1	Unternehmensstrategie und Anforderungen .....	77
5.1.2	Produktstrategie und abgeleitete Anforderungen an die Produktion .....	78
5.1.3	Formulierung von Produktionszielen und Rahmenbedingungen.....	78
5.2	Analyse der Produktionsprozesse inkl. der Informationsflüsse und -systeme .....	79
5.2.1	Analyse der Ausgangssituation.....	80
5.2.2	CPS-basierte Wirkzusammenhänge der Systemelemente .....	82
5.2.3	Datenerfassung und Speicherung .....	82
5.2.4	Vertikale Integration.....	83
5.2.5	Horizontale Integration.....	85
5.2.6	Einbindung der Mitarbeiterkommunikation.....	86
5.2.7	Planung und Steuerung .....	87
5.2.8	Regelung und Automatisierung der Prozesse.....	88
5.2.9	Kennzahlen und Zielerreichung .....	89
5.2.10	Prozessmodellierung .....	90
5.2.11	Schwachstellenanalyse .....	95
5.3	Gestaltungsansätze zur Digitalisierung der Produktion .....	97
5.3.1	Weaknesses-Pull: Optimierung der Prozesse.....	99
5.3.2	Technology-Push: neue Möglichkeiten der Aufgabenerfüllung .....	101
5.3.3	Gestaltungsausrichtung entlang der Grundfunktionen.....	103
5.3.4	Sensorik und Datenspeicher – Digitaler Zwilling der Produktion.....	105
5.3.5	Vertikale Kommunikation – durchgängige Integration der Unternehmens-IT .....	107

---

5.3.6	Horizontale Kommunikation – Transparenz über die Wertschöpfungsketten.....	109
5.3.7	MM-Schnittstelle – Wissen, Informationen, Mitarbeiterintegration .....	110
5.3.8	Dezentrale Intelligenz – Dezentralisierung und Selbstorganisation .....	113
5.3.9	Aktorik – Regelung und Automatisierung von Vorgängen.....	115
5.3.10	Einbringung der CPPS-Merkmale .....	116
5.3.11	Ausarbeitung, Clustering und Auswahl/Abgleich mit der Strategie .....	117
5.4	Konzepterstellung.....	118
5.4.1	Konzeptalternativen erstellen.....	119
5.4.2	Interdependenzen.....	121
5.4.3	Definition von Realisierungsprojekten.....	123
5.5	Realisierungsplanung.....	124
5.5.1	Bewertung der Realisierungsprojekte .....	125
5.5.2	Strategieplanung mit dem Technologiekalender.....	127
5.5.3	Bewertung und Auswahl der Realisierungsstrategien.....	129
5.6	Realisierungsbegleitung und Adaption .....	131
5.6.1	Hybrides Projektmanagement in der Umsetzung.....	132
5.6.2	Entwicklung von neuen Ansätzen und Anpassungsbedarfe .....	133
5.6.3	Dokumentation .....	134
5.6.4	Auswirkungsbewertung und Sortierung .....	135
<b>6</b>	<b>VALIDIERUNG DES ENTWICKELTEN VERFAHRENS .....</b>	<b>137</b>
6.1	Aufnahme der Ausgangssituation mit Prozessen, Anforderungen und Zielen .....	137
6.2	Identifikation von Einsatzmöglichkeiten von CPS im Unternehmen.....	140
6.3	Konzepterstellung in der praktischen Anwendung.....	141
6.4	Realisierungsplanung und -begleitung .....	144
6.5	Fazit der Validierung .....	147
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>149</b>
<b>8</b>	<b>SUMMARY .....</b>	<b>153</b>
<b>9</b>	<b>GLOSSAR.....</b>	<b>157</b>
<b>10</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>161</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Entwicklung von Marktanforderungen und Technik.....	3
Abbildung 1-2: Entwicklung privater und gewerblicher Nutzung von mobilem Internet.....	4
Abbildung 1-3: Investitionen in DV und elektrische Ausrüstung .....	4
Abbildung 1-4: Top 5 Hemmnisse bei der digitalen Transformation .....	5
Abbildung 1-5: Ausgangssituation und Zielsetzung der Arbeit .....	8
Abbildung 1-6: Forschungsvorgehen und Aufbau der Arbeit.....	10
Abbildung 2-1: Fabriken sind komplexe Systeme .....	12
Abbildung 2-2: Skalierung von Prozessen im Unternehmen .....	13
Abbildung 2-3: Elemente eines Produktionssystems .....	14
Abbildung 2-4: Grundfunktionen von CPS .....	17
Abbildung 2-5: Elemente und Merkmale von CPPS .....	19
Abbildung 2-6: dynamische, wissensbasierte Prozesse.....	23
Abbildung 2-7: Vergleich vorhandener Ansätze zur Unterstützung der Digitalisierung.....	32
Abbildung 2-8: Entwicklungsstufen intelligenter Produkte .....	34
Abbildung 2-9: Auswirkungen der Veränderungen auf Mitarbeiter .....	36
Abbildung 2-10: Strategic Alignment-Model .....	42
Abbildung 3-1: Grundlagen und Einsatz im Verfahren .....	45
Abbildung 3-2: Strategie als Antwort auf Ziele und Einflussfaktoren .....	46
Abbildung 3-3: Ziele von Bearbeitungsprozessen, Produktionsbereichen und Logistik.....	48
Abbildung 3-4: Strukturelemente der IT- und Produktionsstrategie.....	50
Abbildung 3-5: Aufbau des Technologiekalenders .....	51
Abbildung 3-6: Analysesichten im Verfahren.....	53
Abbildung 3-7: Grundfragen der eEPK.....	54
Abbildung 3-8: Prozessgestaltung auf Basis der Entwicklungen in Technik und Umfeld.....	58
Abbildung 3-9: Bewertungsraaster zu Aufwand und Nutzen in IT- und Produktionsprojekten .....	63
Abbildung 4-1: Verfahren zur Planung des Einsatzes von CPS in der Produktion .....	71
Abbildung 5-1: Anforderungen und Zielsetzung im Verfahren .....	76

---

Abbildung 5-2: strategische Ausrichtungsmöglichkeiten von Unternehmen .....	77
Abbildung 5-3: Anforderungen und Zielsetzung an die Planung .....	79
Abbildung 5-4: Schrittfolge der Prozessanalyse .....	80
Abbildung 5-5: Strukturierung des Untersuchungsbereichs .....	81
Abbildung 5-6: Auswahl von Aufgaben nach Prozessarten .....	81
Abbildung 5-7: Datenbezogene Wirkbeziehungen im Produktionssystem .....	83
Abbildung 5-8: vertikale Wirkbeziehungen der physischen Produktion und den IT-Systemen .....	84
Abbildung 5-9: horizontale Wirkbeziehungen zwischen den Prozessschritten .....	85
Abbildung 5-10: Wirkbeziehungen zwischen Mitarbeitern in der Produktion .....	87
Abbildung 5-11: Planungs- und steuerungsrelevante Wirkbeziehungen .....	88
Abbildung 5-12: Regelungsbezogene Wirkbeziehungen im Produktionssystem .....	89
Abbildung 5-13: ausgewählte Kennzahlen von Bearbeitungs-, Logistik- und Prüfprozessen .....	90
Abbildung 5-14: Modellierungsinhalte – integrierte Prozessbetrachtung .....	92
Abbildung 5-15: integrierte Darstellung direkter und indirekter Prozesse mit Informationsfluss .....	94
Abbildung 5-16: Ansatzpunkte und Aufbaustruktur der Schwachstellenanalyse .....	96
Abbildung 5-17: Vorgehen bei der Erstellung der Gestaltungsansätze .....	98
Abbildung 5-18: Strukturierungsmatrix "Weaknesses-Pull" .....	100
Abbildung 5-19: Untersuchungsgegenstand im „Technology-Push“-Ansatz .....	101
Abbildung 5-20: Strukturierungsmatrix „Technology-Push“ .....	103
Abbildung 5-21: Auswirkungen der Grundfunktionen auf die Produktion .....	104
Abbildung 5-22: Einbringung der CPPS-Merkmale auf die Systemlevel .....	116
Abbildung 5-23: exemplarische Dokumentationsvorlage für Gestaltungsansätze .....	118
Abbildung 5-24: Digital Alignment .....	120
Abbildung 5-25: Konzeptinterne und -übergreifende Interdependenzen .....	122
Abbildung 5-26: Analyse der gemeinsamen Grundlagen der Konzepte .....	123
Abbildung 5-27: Konzeptelemente und Realisierungsvorhaben .....	124
Abbildung 5-28: Portfolio der Einzelprojektbewertung .....	127
Abbildung 5-29: Realisierungsplanung im Technologiekalender .....	128

---

Abbildung 5-30: Kapazitätsausgleich im Zeitverlauf .....	129
Abbildung 5-31: Aufwand und Nutzen der Realisierung im Zeitverlauf.....	130
Abbildung 5-32: Bestimmung des Kapitalwerts (mit Abbruchoption).....	131
Abbildung 5-33: neue Ansätze der Digitalisierung und Anpassungsbedarfe .....	134
Abbildung 6-1: Darstellung der Material- und Informationsflüsse im Ausgangszustand .....	138
Abbildung 6-2: Untersuchung der Wirkbeziehungen im Montageprozess .....	139
Abbildung 6-3: Übersicht über identifizierte Gestaltungsansätze .....	141
Abbildung 6-4: Konzeptionelle Abstimmung der Systemelemente, Prozesse und IT-Systeme .....	142
Abbildung 6-5: Zielprozesse der digitalisierten Produktion.....	143
Abbildung 6-6: Realisierungsplanung im Technologiekalender.....	145
Abbildung 6-7: Konzeptbewertung .....	146
Abbildung 6-8: Bewertung des konzipierten Verfahrens.....	147

*Hinweis - geschlechtsneutrale Formulierungen:*

In der vorliegenden Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit ausschließlich die gewohnte männliche Sprachform verwendet. Diese sprachlichen Vereinfachungen bei personenbezogenen Bezeichnungen sind geschlechtsneutral zu verstehen.

---

**Abkürzungsverzeichnis**

Abb.	Abbildung
App	Applikation
BI	Business Intelligence
BPMN	Business Process Modeling and Notation
Bsp.	Beispiel
bspw.	Beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CPPS	Cyber-Physische-Produktionssysteme
CPS	Cyber-Physische Systeme
DLZ	Durchlaufzeit
DV	Datenverarbeitung
EDV	elektronische Datenverarbeitung
eEPK	erweiterte ereignisgesteuerte Prozesskette
elektr.	elektronisch
EPEI	Every Part Every Intervall
EPK	Ereignisgesteuerte Prozesskette
ERP	Enterprise-Resource-Planning
et al.	et alii (und andere)
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
Fert.	Fertigung
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis (Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse)
ggf.	gegebenenfalls
GK	Gemeinkosten
IfM	Institut für Mittelstandsforschung Bonn
inkl.	inklusive
IT	Informationstechnik
Kap.	Kapitel
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
Komp.	Komponente(n)

KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
MA	Mitarbeiter / Mitarbeiterinnen
MES	Manufacturing Execution System
Mio.	Millionen
MM	Mensch-Maschine
Mrd.	Milliarden
MTO	Mensch, Technik, Organisation
NPV	Net Present Value (Kapitalwert)
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OEE	Overall Equipment Effectiveness (Gesamtanlageneffektivität)
opt.	optisch
PLC	Product life cycle (Produktlebenszyklus)
Prod.	Produkt
QM	Qualitätsmanagement
RFID	radio-frequency identification
SMD	Surface-mount device (Bestückung mit oberflächenmontierten Bauelementen)
TP	Technologie Push
u.	und
u.a.	unter anderem
UML	Unified Modeling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
WP	Weaknesses Pull
z. B.	zum Beispiel
zw.	zwischen

---

## **Kurzfassung**

Die Einbettung von Informationstechnik in Produkte und Betriebsmittel führt zur Entstehung von Cyber-Physischen Systemen (CPS). Durch deren Einsatz in der Produktion und durch die Einbindung der Mitarbeiter in die digitale Umgebung ergeben sich Potenziale zur Steigerung von Effizienz und Flexibilität. Insbesondere mittelständische Unternehmen stehen jedoch aufgrund der Komplexität des Themas vor Herausforderungen bei deren Erschließung.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren entwickelt, das den Einsatz von CPS in der Produktion analysiert, gestaltet und die Einführung plant und so die Erschließung der Potenziale in der Produktion unterstützt. Dazu wird die Produktion gemeinsam mit den zugehörigen IT-Systemen untersucht und Methoden der Material- und Informationsflussanalyse sowie der Gestaltung und Umsetzungsplanung zu einem durchgängigen Vorgehen kombiniert. Betrachtungsschwerpunkte bei diesem Verfahren sind die Elemente und Prozesse in der Produktion. Die Wirkbeziehungen im Produktionssystem werden analysiert und anschließend mit CPS-Funktionen variiert. Auf diese Weise werden Einsatzmöglichkeiten von CPS identifiziert und unter Einbezug von Prozessen und deren Zielstellungen in Implementierungsansätze überführt. Für die Bewertung und Realisierungsplanung wird ein zyklisches Vorgehen erarbeitet, das Strukturen, Prozesse und IT – ausgehend von der Gestaltung der Systemelemente – plant. Die Validierung des entwickelten Verfahrens erfolgt durch Anwendung und Verifizierung der Durchführbarkeit bei einem Elektronikhersteller.

## **Abstract**

Cyber-physical systems (CPS) are formed by embedding information technology into products and equipment. Using CPS in production and the integration of employees in the digital environment opens up possibilities for increasing efficiency and flexibility. However, the complex topic challenges medium-sized companies in accessing these potentials.

The research develops a procedure that supports companies in accessing the potential by analyzing, designing, and planning the use of CPS in production. For this purpose, the production is examined together with the associated IT systems. Moreover, the methods for material and information flow analysis, design, and implementation planning are combined into an integrated procedure. The central focus is on the elements and processes in the production system. The interdependencies in the production system are analyzed and then varied with CPS functions. Taking processes and their tasks into consideration, possible applications of CPS are identified and transferred into approaches for implementation. For evaluation and implementation planning, a cyclical approach is developed that plans the structures, processes, and IT based on the design of the system elements. The developed procedure is validated by applying it and verifying the feasibility at an electronics manufacturer.