Alexander Christ

Integration von Kommunikations-fähigkeiten in cyber-physische Systemkomponenten

Integration von Kommunikationsfähigkeiten in cyber-physische Systemkomponenten

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Alexander Christ, M.Sc.
aus Frankfurt am Main

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Michael Abramovici
Tag der Einreichung:	28.11.2016
Tag der mündlichen Prüfung:	14.03.2017

Darmstadt 2017
D17

Forschungsberichte aus dem Fachgebiet
Datenverarbeitung in der Konstruktion

Band 59

Alexander Christ

Integration von Kommunikationsfähigkeiten in cyber-physische Systemkomponenten

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5616-7
ISSN 1435-1129

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Geleitwort des Herausgebers

Die moderne Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) bietet vielfältige Innovations- und Leistungspotenziale, die im Entstehungsprozess neuer Produkte auszuschöpfen sind. Dies setzt jedoch voraus, dass die wissenschaftlichen Grundlagen zum Einsatz der modernen IKT in der Produktentstehung vorliegen und neue Methoden wissenschaftlich abgesichert sind. Darüber hinaus stellen die wissenschaftliche Durchdringung und die Bereitstellung wissenschaftlicher Forschungsergebnisse eine abgestimmte Kooperation zwischen Forschung und Industrie dar.

Vor diesem Hintergrund informiert diese Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Fachgebiets Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) des Fachbereichs Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt.

Ziel der Forschungsarbeiten ist die wissenschaftliche Durchdringung innovativer, interdisziplinärer und integrierter Produktentstehungsprozesse und darauf aufbauend die Konzeption neuer Methoden für die Entwicklung, Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Herstellung neuer Produkte.

Die steigende Digitalisierung von Systemkomponenten sowie die zunehmende Einbindung der modernen IKT in den Produktentstehungsprozess ermöglichen die Herstellung intelligenter, vernetzter Produkte. Als technologische Grundlagen fungieren cyber-physische Systeme (CPS) sowie deren Vernetzung und Kommunikation über Internettechnologien. Durch die methodische Abbildung von Kommunikationsfähigkeiten und deren informationstechnische Integration in cyber-physische Systemkomponenten (Aktoren, Sensoren und Kommunikationsschnittstellen) werden diese zu proaktiven Teilnehmern der internetbasierten Kommunikation. Dies bildet eine wichtige Säule für das autonome Handeln von CPS-Komponenten in Produktentstehung und -nutzung.

Herr Alexander Christ entwickelt im Rahmen seiner Dissertation die methodischen Grundlagen und die informationstechnischen Datenstrukturen für die internetbasierte

Kommunikation von CPS-Komponenten. Den wissenschaftlichen Kern bildet ein innovatives Modell zur Auslegung und virtuellen Absicherung der internetbasierten CPS-Kommunikation in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses. Hierfür erhalten die CPS-Komponenten eine digitale Repräsentation, welche die Integration ihrer individuellen Kommunikationsfähigkeiten und deren Operationalisierung innerhalb der CPS-Kommunikation erlaubt. Das entwickelte Modell erweitert die Methodik des Model Based Systems Engineerings im Sinne des V-Modells mit Fokus auf der Modellbildung und -analyse sowie der Eigenschaftsabsicherung für die internetbasierte CPS-Kommunikation. Damit leistet die vorliegende Dissertation einen Beitrag für die Entwicklung intelligenter, vernetzter Produkte.

Reiner Anderl

Vorwort des Autors

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl, Leiter des Fachgebiets DiK. Seine wertvollen Anregungen und Empfehlungen, die vielen fachlichen Diskussionen, sowie das Gewähren wissenschaftlicher Freiräume haben meine Zeit am DiK geprägt und einen wichtigen Beitrag in der Entstehung dieser Dissertation geleistet. Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Abramovici, Leiter des Lehrstuhls für Maschinenbauinformatik der Ruhr-Universität Bochum, danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Ich bedanke mich bei allen ehemaligen und aktuellen Kolleginnen und Kollegen des Fachgebiets DiK für die freundschaftliche und kreative Arbeitsatmosphäre, die stets fruchtbare Zusammenarbeit und die zahlreichen fachlichen Impulse, die einen wesentlichen Anteil zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben. Besonderer Dank gilt Herrn Christian Steinmetz, Frau Brigitte Geissler-Burschil und meiner Frau Melanie für die Durchsicht meiner Dissertation.

Ganz herzlich danken möchte ich abschließend meiner Familie, die mich auf meinem Weg zur Dissertation stets unterstützt und treu begleitet hat. Sie war mein Rückhalt in schwierigen Zeiten und zugleich eine Quelle der Freude und Inspiration. Ihr, insbesondere meiner Frau Melanie und meiner Tochter Emilia, ist diese Dissertation gewidmet.

Oberursel, im Juni 2017 *Alexander Christ*

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis v

Tabellenverzeichnis vii

Abkürzungsverzeichnis ix

1 Einleitung 1

1.1 Motivation 2

1.2 Zielsetzung 4

1.3 Aufbau der Dissertation 6

2 Stand der Technik 9

2.1 Cyber-physische Systeme 9

2.1.1 Systemtheorie 9

2.1.2 Vom mechatronischen zum cyber-physischen System 10

2.1.3 Komponenten cyber-physischer Systeme 13

2.1.4 Industrie 4.0-Komponente 18

2.1.5 Fähigkeiten cyber-physischer Systeme 21

2.2 Informations- und Kommunikationstechnologie 24

2.2.1 Informations- und Kommunikationstheorie 24

2.2.2 Vernetzung über Internettechnologien 29

2.2.3 Serviceorientierte Architektur 32

2.3 Virtuelle Produktentwicklung 35

2.3.1 Produkt und Produktstruktur 35

2.3.2 Produktlebenszyklus 37

2.3.3 Produktentwicklungsprozess 38

2.3.4 Geometrische Modellierung 41

2.4 Handlungsbedarf in der Entwicklung cyber-physischer Systeme 46

2.4.1 Das V-Modell als methodische Grundlage 46

2.4.2 Model Based Systems Engineering 47

2.4.3 Ausgewählte bestehende Forschungsansätze 49

2.5 Fazit ... 51
3 Anforderungsprofil ... 53
3.1 Zieldefinition ... 53
3.2 Betrachtete Anwendungsfälle ... 57
3.2.1 Anwendungsfälle zur Integration der Kommunikationsfähigkeiten ... 57
3.2.2 Anwendungsfälle zur Vernetzung und Kommunikationsplanung ... 61
3.3 Anforderungen ... 66
3.3.1 Anforderungen an die Modellspezifikation ... 66
3.3.2 Anforderungen an die Integration der Kommunikationsfähigkeiten ... 68
3.3.3 Anforderungen an die Vernetzung und CPS-Kommunikation ... 70
3.3.4 Anforderungen an das Kommunikationssystem ... 71
3.4 Übersicht des Anforderungsprofils ... 73
4 Konzept ... 75
4.1 Konzeptioneller Ansatz ... 77
4.2 Einführung des TASK-Modells ... 79
4.2.1 Das TASK-Modell ... 80
4.2.2 Die TASK-Elemente als Konnektoren ... 81
4.2.3 Informationstechnische Abbildung der TASK-Elemente ... 85
4.3 Definition der Kommunikationsfähigkeiten ... 87
4.3.1 TASK-Punktekarten zur Definition der Kommunikationsfähigkeiten ... 88
4.3.2 Auswertung der TASK-Punktekarten ... 97
4.3.3 Dokumentation im TASK-Berichtsbogen ... 100
4.4 Repräsentation der Kommunikationsfähigkeiten ... 103
4.4.1 Modellierung der Kommunikationsfähigkeiten ... 104
4.4.2 Zuordnung der Kommunikationsfähigkeiten zum 3D-Produktmodell ... 105
4.4.3 3D-Modellierung der CPS-Komponenten ... 107
4.5 Integration der Kommunikationsfähigkeiten in die Produktstruktur ... 110
4.5.1 Einführung der Produktstruktur-TASK-Matrix ... 111
4.5.2 Vernetzung innerhalb der Produktstruktur-TASK-Matrix ... 113
4.5.3 Persistierung der Vernetzung und TASK-Beziehungen ... 115
4.6 Kommunikation der CPS-Komponenten ... 118
4.6.1 Beschreibung des Kommunikationskonzepts ... 118
4.6.2 Modellierung der CPS-Kommunikation ... 121

4.6.3 Adressierung der TASK-Elemente 124
4.7 Fazit 127
5 Prototypische Implementierung 131
5.1 Struktur der prototypischen Implementierung 131
5.2 Beschreibung der eingesetzten Strukturelemente 133
5.2.1 3D-CAD-Autorensystem 133
5.2.2 Softwareplattform und Entwicklungsumgebung 133
5.2.3 Medien zur Datenhaltung 134
5.2.4 Vernetzung und Auslegung der Kommunikation 135
5.2.5 Kommunikationssystem 135
5.3 Technische Umsetzung als TASK-Assistenzsystem 136
6 Validierung und Verifikation 149
6.1 Hardware und Software für die Validierung 149
6.2 Anwendungsfälle zur Validierung 151
6.2.1 Anwendungsfall 1: Simulation 152
6.2.2 Anwendungsfall 2: Prototypenbau 155
6.2.3 Anwendungsfall 3: Kommunikationsgesteuerte Wartung 159
6.3 Fazit und Verifikation 162
7 Ausblick 171
8 Zusammenfassung 177
Literaturverzeichnis 183