

# Kommunikationsgesteuerte cyber- physische Montagemodelle

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt

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

Dissertation

vorgelegt von

**Daniel Strang, M.Sc.**  
aus Wiesbaden

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. R. Anderl
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. E. Abele
Tag der Einreichung:	17.02.2016
Tag der mündlichen Prüfung:	17.05.2016

Darmstadt 2016

D17



Forschungsberichte aus dem Fachgebiet  
Datenverarbeitung in der Konstruktion

Band 56

**Daniel Strang**

**Kommunikationsgesteuerte cyber-physische  
Montagemodelle**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**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., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4594-9

ISSN 1435-1129

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

In der virtuellen Produktentstehung stellt die durchgängig digitale Verarbeitung von Produktdaten eine entscheidende Säule für die wirtschaftliche Herstellung von Produkten dar. Ziel der virtuellen Produktentstehung ist die Abbildung und Weiterverarbeitung aller relevanten Produkteigenschaften in einem integrierten Produktdatenmodell. Geprägt durch die Innovationen auf dem Gebiet der cyber-physischen Produktionssysteme ergeben sich neue Möglichkeiten, individuelle Informationen einzelner Bauteile im Produktentstehungsprozess in Datenmodellen abzubilden und diese zur effizienten, flexiblen Prozesssteuerung in Produktionsprozessen nutzbar zu machen.

Hierzu entwickelt Herr Daniel Strang im Rahmen seiner Dissertation ein Konzept zur Abbildung von flexiblen, cyber-physischen Montageprozessen und zu deren kommunikationsgesteuerten Ausführung in cyber-physischen Montagesystemen. Die vorliegende Dissertation stellt dabei eine Beschreibungsmethode zur Abbildung von Montageprozessvarianten vor und zeigt auf, wie aus dieser

Montageaktivitäten abgeleitet werden und eine Kommunikation zwischen Montageprozesssteilnehmern strukturiert aufgebaut wird. Das von Herrn Strang entwickelte Kommunikationsschema, mit einer allgemeinen und einer aktivitätsindividuellen Kommunikation, definiert, wann Bauteile autonom spezifische Informationen mit Montagestationen und Montagemitteln austauschen. Die prozesssteuernden Entscheidungen im Montageprozess basieren auf dieser Kommunikation und den darin ausgetauschten Informationen. Durch einen Abgleich zwischen Anforderungen an Montageaktivitäten und Spezifikationen sowie Charakteristiken der Montagemittel kann eine automatische Entscheidung für Montagestationen zur Ausführung des cyber-physischen Montageprozesses getroffen werden. Diese Dissertation legt damit die wissenschaftliche Grundlage zur Ausführung flexibler, kommunikationsgesteuerter, cyber-physischer Montageprozesse.

Darmstadt, Juni 2016

*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 Herrn Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl, Leiter des Fachgebiets DiK. Seine wertvollen Anregungen, die fachlichen Diskussionen sowie die gewährten wissenschaftlichen Freiräume haben zur Erstellung dieser Dissertation beigetragen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele, Leiter des Fachgebiets Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), danke ich für die Übernahme des Korreferats und die kritische Durchsicht meiner Dissertation.

Meinen Kolleginnen und Kollegen des Fachgebiets DiK danke ich für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre, die gute Zusammenarbeit und die vielen konstruktiven Diskussionen. Besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. André Picard, der jederzeit für kritische Diskussionen und Ratschläge zur Verfügung stand. Auch bei Frau Nadia Galaske, Herrn Dr.-Ing. Anselm Schüle, Herrn Steffen Ochs und Herrn Martin Michler möchte ich mich herzlichst für die Durchsicht und Korrektur meiner Dissertation bedanken.

Mein Dank gilt auch meinen Eltern, die mich auf dem Weg zu meiner Dissertation stets gefördert und unterstützt haben. Steffi danke ich für die vielen Stunden, in denen sie Texte über cyber-physische Montagesysteme bzw. -prozesse lesen oder Erzählungen darüber überstehen musste. Ich danke ihr für ihre Geduld und ihr Verständnis in den letzten Monaten.

Darmstadt, Juni 2016

*Daniel Strang*



# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	XI
Symbolverzeichnis.....	XV
1 Einleitung .....	1
1.1 Motivation .....	3
1.2 Zielsetzung.....	4
1.3 Aufbau der Dissertation .....	6
2 Stand der Technik und Forschung .....	9
2.1 Cyber-physische Systeme .....	9
2.2 Internettechnologien.....	12
2.2.1 Internetprotokolle.....	12
2.2.2 Internet der Dinge .....	14
2.3 Cyber-physische Produktionssysteme.....	17
2.4 Montage.....	24
2.4.1 Bedeutung der Montage .....	25
2.4.2 Organisation und Anordnung der Montage .....	27
2.5 Montageprozessplanung und -steuerung .....	30
2.5.1 Montageprozessplanung .....	31
2.5.2 Montageprozesssteuerung .....	35
2.5.3 Abbildung von Montageprozessen .....	39
2.6 Produkt- und Bauteildaten.....	46
2.6.1 Technische Produkte und Bauteile.....	46
2.6.2 Produktdatenmodell .....	49

2.6.3	Semantisches Produktgedächtnis .....	49
2.6.4	Bauteildatenmodell.....	51
2.7	Zusammenfassung und Fazit.....	53
3	Anforderungsprofil.....	55
3.1	Ableitung des Handlungsbedarfs .....	55
3.2	Zieldefinition .....	56
3.3	Anwendungsfälle zur Definition cyber-physischer Montageprozesse ...	57
3.4	Anforderungen.....	60
3.4.1	Anforderungen an die Definition zu cyber-physischen Montagesystemen .....	60
3.4.2	Anforderungen an die Definition zu cyber-physischen Montageprozessen .....	61
3.4.3	Anforderungen an die modellhafte Prozessbeschreibung .....	62
3.4.4	Anforderungen an das Informationsmodell .....	64
3.4.5	Anforderungen an die Implementierung.....	66
3.4.6	Zusammenfassung der Anforderungen .....	67
4	Konzept.....	71
4.1	Überblick über das Konzept .....	71
4.2	Cyber-physisches Montagesystem .....	73
4.2.1	Virtuelle Komponenten im cyber-physischen Montagesystem.....	73
4.2.2	Physische Komponenten im cyber-physischen Montagesystem.....	77
4.2.3	Kopplung zwischen virtuellen und physischen Komponenten.....	78
4.2.4	Organisation und Regeln für cyber-physische Montagesysteme.....	81
4.2.5	Ausprägung cyber-physischer Montagesysteme .....	83
4.3	Cyber-physische Montageprozesse .....	86
4.3.1	Definition.....	87
4.3.2	Treiber des cyber-physischen Montageprozesses .....	90
4.4	Prozessplanung und -beschreibung .....	93
4.4.1	Beschreibungsmethode .....	93

4.4.2	Montageprozessgraphen .....	95
4.4.3	Kommunikation und Entscheidung im Prozess .....	100
4.5	Informationsmodell für cyber-physische Montageprozesse .....	107
4.5.1	Architektur des Informationsmodells .....	108
4.5.2	Teilmodell der Ressourcen .....	109
4.5.3	Teilmodell des Erzeugnisses .....	112
4.5.4	Teilmodell des Montageprozesses .....	114
4.5.5	Teilmodell des Störungsmanagements .....	116
4.5.6	Aggregation der Teilmodelle .....	117
4.6	Zusammenfassung und Fazit .....	119
5	Prototypische Implementierung und Validierung .....	123
5.1	Implementierung der cyber-physischen Montageprozesse .....	123
5.1.1	Aufbau der Implementierung .....	123
5.1.2	Cyber-physisches Montagesystem .....	124
5.1.3	Bauteil im cyber-physischen Montagesystem .....	126
5.1.4	Informationspräsentation .....	132
5.1.5	Ausführung eines cyber-physischen Montageprozesses .....	133
5.2	Validierung anhand eines repräsentativen Beispiels .....	135
5.2.1	Bauteile und Erzeugnis .....	135
5.2.2	Montagesystem .....	137
5.2.3	Montageprozessgraph .....	140
5.2.4	Szenarien .....	144
5.2.5	Auswertung .....	146
5.3	Verifizierung der Anforderungen und Fazit .....	152
5.3.1	Verifizierung der Anforderungen .....	152
5.3.2	Zusammenfassung und Fazit .....	155
6	Ausblick .....	157
7	Zusammenfassung .....	161
8	Literaturverzeichnis .....	165

Anhang.....	183
Unified Modeling Language (UML) .....	183
Extensible Markup Language (XML) .....	185
Gesamtmodell.....	187