

Nadia R. Galaske



Modellierung von Zusammenbau- bedingungen zur Reihenfolgebildung im cyber-physischen Montagesystem

**SHAKER
VERLAG**

Modellierung von Zusammenbaubedingungen zur Reihenfolgebildung im cyber-physischen Montagesystem

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Nadia Raisya Galaske, M.Sc.

aus Jakarta, Indonesien

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Klaus-Dieter Thoben

Tag der Einreichung: 22.05.2018
Tag der mündlichen Prüfung: 24.07.2018

Darmstadt 2018

D17

Forschungsberichte aus dem Fachgebiet
Datenverarbeitung in der Konstruktion

Band 63

Nadia R. Galaske

**Modellierung von Zusammenbaubedingungen
zur Reihenfolgebildung im cyber-physischen
Montagesystem**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2018

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 978-3-8440-6523-7

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

Vorwort 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 dieser Forschungsarbeiten ist die wissenschaftliche Durchdringung innovativer, interdisziplinärer und integrierter Produktentwicklungsprozesse und darauf aufbauend die Konzeption neuer Methoden für die Entwicklung und Konstruktion von Produkten sowie für die Zusammenarbeit in virtuellen Produktentwicklungsprozessen.

Im Rahmen der virtuellen Produktentstehung stellt die Definition, Repräsentation und Präsentation von Produktdaten in einem integrierten Produktdatenmodell eine wichtige Säule für die Entwicklung und Herstellung von Produkten dar. Das Ziel der virtuellen Produktentstehung ist die durchgängige Bereitstellung und Verarbeitung von Produktinformationen durch die Abbildung in einer strukturierten und rechnerverarbeitbaren Darstellungsform. Durch die Fortschritte in Informations- und Kommunikationstechnologien sowie Innovationen auf dem Gebiet der cyber-physischen Produktionssysteme ergeben sich neue Möglichkeiten, um Bauteile zu Informationsträgern zu machen und Prozessabläufe individualisierbar zu machen.

Hierzu entwickelt Frau Nadia Galaske im Rahmen ihrer Dissertation ein Konzept zur Modellierung und Verarbeitung von Zusammenbaubedingungen zur Generierung von produktindividuellen Montagereihenfolgen in einem cyber-physischen Montagesystem. Die vorliegende Dissertation stellt dabei die Verknüpfungs- und Reihenfolgebeziehungen aus den Zusammenbaubedingungen eines Produktes in einer graphenbasierten Form dar und zeigt auf, wie daraus mögliche Montagereihenfolgen für jedes Produkt automatisiert generiert werden können. Die produktindividuellen Montagereihenfolgen dienen als Grundlagen für eine dynamische und autonome Entscheidung hinsichtlich der Auswahl der Montageoperationen und der Montageressourcen während der Montagedurchführung im cyber-physischen Montagesystem. Somit leistet Frau Galaske einen wichtigen Beitrag zur digitalen Repräsentation von Zusammenbaubedingungen zur Generierung von Montagereihenfolgen.

Darmstadt, im November 2018

Reiner Anderl

Vorwort des Autors

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

Mein besonderer Dank für die wohlwollende Betreuung meiner Dissertation gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl, dem Leiter des Fachgebiets DiK. Seine durchgängige Unterstützung und stets wertvollen Anregungen sowie die mir gewährten wissenschaftlichen Freiräume haben zur erfolgreichen Erstellung meiner Dissertation beigetragen. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dieter Thoben, dem Leiter des BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik an der Universität Bremen, bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferats und die kritische Durchsicht meiner Dissertation ganz herzlich.

Meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet DiK danke ich für die freundschaftliche und kollegiale Arbeitsatmosphäre sowie die zahlreichen konstruktiven Diskussionen. Ganz besonders möchte ich Herrn Simon Frisch danken, der mit seiner freundschaftlichen Art für den Zusammenhalt vieler Kollegen sorgte und für die während der stressigen Zeiten nötigen Spaziergänge stets zur Verfügung stand. Herrn Dr.-Ing. Daniel Strang danke ich für die angenehme Zusammenarbeit sowie den fachlichen Austausch, insbesondere während der Themenfindungsphase meiner Dissertation. Für die kritische Durchsicht sowie die stets wertvollen Impulse und produktiven Diskussionen während der Erstellung meiner Dissertation danke ich Herrn Christian Steinmetz und Herrn Erdal Tantik sehr herzlich. Zusätzlich danke ich Herrn Abhijit Singh für seine Unterstützung bei dem programmiertechnischen Teil meiner Dissertation und sein großes Engagement.

Die Entstehung der Dissertation wäre ohne Unterstützung meiner Familie nicht möglich gewesen. Meinen Eltern und meiner Großmutter danke ich für ihren Zuspruch und das Vertrauen an meinem Vorhaben. Ebenfalls möchte ich mich bei der Familie Sjahrn herzlichst bedanken, dass wir uns trotz der großen Entfernung nicht aus den Augen verloren haben. Mein größter Dank gilt meinem Mann Dr.-Ing. Patrick Galaske für die endlose Geduld und die andauernde Motivation. Seine großzügige Unterstützung sowie die Selbstverständlichkeit, dass er meine Ziele genauso wie seine verfolgt, haben mir den Rückhalt zur Finalisierung der Dissertation gegeben.

Wiernsheim, im November 2018

Nadia R. Galaske

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	IX
Algorithmenverzeichnis.....	XI
Prozedurverzeichnis.....	XI
Abkürzungsverzeichnis.....	XIII
Symbolverzeichnis.....	XVII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Dissertation.....	5
2 Stand der Technik und Forschung	9
2.1 Informations- und Kommunikationstechnologien	10
2.1.1 Internet der Dinge und Dienste	10
2.1.2 Serviceorientierte Architektur	13
2.1.3 Web Services	16
2.1.4 Fazit zum Kapitel.....	18
2.2 Intelligente, vernetzte Produktion.....	18
2.2.1 Cyber-physische Systeme.....	19
2.2.2 Cyber-physische Produktionssysteme	20
2.2.3 Bauteile als Informationsträger	23
2.2.4 Selbststeuerung und Selbstorganisation.....	27
2.2.5 Digitale Fabriksimulation	28

Inhaltsverzeichnis

2.2.6	Fazit zum Kapitel.....	29
2.3	Planung und Steuerung cyber-physischer Montage.....	30
2.3.1	Montage	30
2.3.2	Einfluss der Montage auf den Produktentstehungsprozess.....	33
2.3.3	Montageplanung und Montagesteuerung.....	35
2.3.4	Cyber-physische Montage.....	39
2.3.5	Modellierung cyber-physischer Montageabläufe	42
2.3.6	Fazit zum Kapitel.....	44
2.4	Grundlagen des Störungsmanagements	46
2.4.1	Störungen.....	46
2.4.2	Robustheit und Resilienz.....	47
2.4.3	Störungsmanagement in der Montageablaufsteuerung	49
2.4.4	Fazit zum Kapitel.....	50
2.5	Graphentheoretische Grundlagen.....	51
2.5.1	Algorithmen zur Traversierung von Graphen	53
2.5.2	Algorithmen für Zuordnungs- und Optimierungsprobleme	55
2.5.3	Fazit zum Kapitel.....	57
3	Anforderungsprofil.....	59
3.1	Ableitung des Handlungsbedarfs.....	59
3.2	Zieldefinition.....	61
3.3	Anforderungen	63
3.3.1	Anforderungen an das Informationsmodell.....	63
3.3.2	Anforderungen an die Montageablaufplanung.....	65
3.3.3	Anforderungen an die Montageablaufsteuerung	66
3.3.4	Anforderungen an die prototypische Implementierung	69
3.4	Zusammenfassung & Fazit.....	71
4	Konzept.....	75
4.1	Aufbau und Struktur des Gesamtkonzepts	75

4.2	Definition der cyber-physischen Montage	79
4.2.1	Merkmale und Eigenschaften eines CPMS.....	80
4.2.2	Beschreibung der Architektur und Systemkomponenten.....	84
4.3	Planung des Montageablaufs in cyber-physischen Montagesystemen ..	86
4.3.1	Anwendungsfallbeschreibung.....	86
4.3.2	Modellierung von Zusammenbaubedingungen.....	88
4.3.3	Automatische Generierung der Montagereihenfolgen	91
4.4	Steuerung des Montageablaufs in cyber-physischen Montagesystemen	96
4.4.1	Anwendungsfallbeschreibung.....	96
4.4.2	Kommunikationsschema zur dynamischen, autonomen Ressourcenzuordnung	98
4.4.3	Integration von Entscheidungslogiken für die Ressourcenzuordnung	103
4.5	Informationsmodell des cyber-physischen Montagesystems.....	110
4.5.1	Partialmodell des Montageobjekts.....	111
4.5.2	Partialmodell der Montageressourcen	113
4.5.3	Partialmodell des Montageprozesses	114
4.5.4	Partialmodell der Montageorganisation	115
4.6	Zusammenfassung & Fazit.....	117
5	Prototypische Implementierung	119
5.1	Verwendete Technologien	119
5.1.1	Auswahl der Programmierumgebung	119
5.1.2	Auswahl der Architektur der Datenhaltung	120
5.1.3	Auswahl des Präsentationsformats	121
5.2	Architektur der prototypischen Implementierung	122
5.3	Technische Umsetzung	125
5.3.1	Umsetzung des Aktoren-Modells	125
5.3.2	Gestaltung der Benutzungsoberfläche	128

Inhaltsverzeichnis

5.4 Zusammenfassung & Fazit.....	131
6 Validierung	133
6.1 Auswahl des repräsentativen Anwendungsbeispiels	133
6.1.1 Beschreibung des Produkts.....	133
6.1.2 Beschreibung des Montageprozesses	135
6.2 Durchführung der Validierung	136
6.2.1 Modellierung der Zusammenbaubedingungen und Generierung der Montagereihenfolgen.....	136
6.2.2 Durchführung der Montageablaufsimulation	142
6.2.3 Auswertung der Simulationsergebnisse	147
6.3 Zusammenfassung & Fazit.....	150
7 Ausblick	159
8 Zusammenfassung	161
Literaturverzeichnis.....	165
Anhang.....	189
REST-konforme Web Services	189
Montagereihenfolgen des Pneumatikzylinders.....	191
Ergebnisse der Montageablaufsimulation	195