

Forschungsberichte Montagetechnik und -organisation

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller

Leenhard Hörauf

Band 4

Software-gestützte Planung cyber-physischer Montagesysteme mittels durchgängiger Informationsnutzung



**Software-gestützte Planung
cyber-physischer Montagesysteme
mittels durchgängiger Informationsnutzung**

**Software-supported Planning of
Cyber-Physical Assembly Systems through
Continuous Use of Information**

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Leenhard Hörauf

Berichter: Honorarprofessor Dr.-Ing. Rainer Müller
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt

Tag der mündlichen Prüfung: 12.02.2019

Forschungsberichte Montagetechnik und -organisation

Band 4

Leenhard Hörauf

**Software-gestützte Planung cyber-physischer
Montagesysteme mittels durchgängiger
Informationsnutzung**

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 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 978-3-8440-6674-6

ISSN 2512-6369

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 • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) in Saarbrücken.

Mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und die großzügige Unterstützung für meine Promotion gilt Professor Rainer Müller, Lehrstuhlleiter und wissenschaftlicher Geschäftsführer des ZeMA. Ich bedanke mich sehr herzlich bei Herrn Professor Robert Heinrich Schmitt vom Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen für die Übernahme des Korreferates. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich Herrn Professor Burkhard Corves, dem Leiter des Instituts für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik (IGMR) der RWTH Aachen.

Für die fachliche Unterstützung sowie die konstruktiven Gespräche während meiner Promotionszeit danke ich vor allen den Herren Dr. Matthias Vette-Steinkamp sowie Christoph Speicher. Ihr fortwährender persönlicher Einsatz und ihre Unterstützung haben zum Gelingen dieser Arbeit maßgeblich beigetragen.

Ein Großteil der Forschungsarbeiten entstanden im BMBF geförderten Forschungsprojektes SmartF-IT (Cyber-physische IT-Systeme zur Komplexitätsbeherrschung einer neuen Generation multiadaptiver Fabriken). Den Projektpartnern danke ich für die gute Zusammenarbeit und den hilfreichen Gedankenaustausch. Stellvertretend erwähnen möchte ich Dr. Dietmar Dengler, Dr. Anselm Blocher, Günter Krenz, Martin Geist, Boris Friedrich, Dr. Johannes Wrehde, Rouven Vierfuss, Dr. Jan Eilers, Lukas Herrmanns und insbesondere Prof. Wolfgang Wahlster und Dr. Karl-Werner Witte.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei meinen Wegbegleitern am ZeMA sowie Projektpartnern aus weiteren Industrie- und Forschungsprojekten nicht nur für die vielen fachlichen Diskussionen und Ratschläge, sondern auch die freundliche und inspirierende Atmosphäre. Der Dank gilt insbesondere Christopher Simon, Leonie Schirmer, Ortwin Mailahn und Johannes Obele. Für die kritische Durchsicht der Arbeit und konstruktiven Hinweise danke ich Michael Lorenz und Verena Milde.

Danken möchte ich auch meinen studentischen Mitarbeitern, die ihren Beitrag zum Erfolg geleistet und während meiner Promotionszeit begleitet haben. Stellvertretend erwähnen möchte ich Julian Koch, Rebecca Eifler, Dirk Burkhard, Attique Bashir, Johannes Wocker sowie insbesondere Dennis Wachter.

Diese Arbeit konnte nur durch die Unterstützung meiner Familie entstehen, welche mir während meiner gesamten Ausbildung zur Seite stand und dadurch den Weg zur Promotion ermöglichte. Nicht zuletzt und in besonderem Maße danke ich meiner lieben Freundin Friederike für Ihr Verständnis und die große Unterstützung.

Kurzfassung

Um die individuellen Kundenbedürfnisse zu befriedigen, bringen Unternehmen eine zunehmende Anzahl von Produktvarianten in immer kürzer werdenden Zeiträumen auf den Markt. Insbesondere die Montage und die Planung von Montagesystemen werden dadurch vor Herausforderungen gestellt, da die Produktvarianz meist erst in der Montage entsteht. Daher sind Montagesysteme so zu gestalten, dass verschiedene Produktvarianten hergestellt werden können und die Anlaufzeit bei Produktänderungen möglichst gering ist. Multivariantenlinien und cyber-physische Montagesysteme bieten prinzipiell die Möglichkeit, mehrere Varianten mit maximaler Flexibilität herzustellen. Allerdings führt die Vielzahl der zu berücksichtigenden Parameter auf Seiten des Produktes sowie die Anforderung an die Anpassungsfähigkeit der Betriebsmittel zu einer zunehmenden Komplexität bei der Planung sowie beim Betrieb dieser Montagesysteme. Zwar versuchen Montageplanungsansätze und Softwaretools aus dem Bereich der Digitalen Fabrik die Komplexität zu beherrschen, jedoch agieren diese meist als Insellösungen und betrachten nicht die Vernetzungsmöglichkeiten zwischen physischen Montagesystemmodulen und ihrem virtuellen Abbild.

Das Defizit der durchgängigen Informationsnutzung und der fehlenden Unterstützung greift die vorliegende Arbeit auf, indem eine Methodik für die Planung von cyber-physischen Montagesystemen und zur Unterstützung des Montageplaners entwickelt wird. Die Methodik beschreibt das Vorgehen bei der Planung über mehrere Phasen, wobei ihr ein Referenzmodell zur einheitlichen Beschreibung von Zusammenhängen zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel zugrunde liegt. Durch Anwendung der Methodik erfolgen eine virtuelle Einplanung der Montageoperationen und eine Absicherung der Produktmontierbarkeit mittels eines Anforderungsfähigkeitsabgleichs in Softwaretools. Weiterhin werden die erfassten Planungsdaten als Montagegedächtnis abgeleitet und zur Ansteuerung von Montagemodulen in der realen Anlage genutzt, sodass eine schnelle Einführung neuer Produktvarianten möglich ist. Veränderungen am Montagesystem werden wiederum sensorisch erfasst und in die virtuelle Planungs-umgebung zurückgeführt, damit dem Montageplanungsmitarbeiter stets eine aktuelle Planungsgrundlage zur Verfügung steht. Dadurch ergibt sich ein geschlossener Informationskreis, welcher eine Kopplung zwischen realer und virtueller Montage beschreibt. Dieses ermöglicht ein effizienteres und vereinfachtes Planungsvorgehen, da dem Montageplaner mögliche Konflikte angezeigt werden.

Der Praxisbezug und die Anwendbarkeit der Planungsmethodik werden am Beispiel einer Anlagenneuplanung und einer Integrationsplanung für eine elektronische Steuereinheit gezeigt.

Schlagwörter: Montage, Planung, Methodik, Modell, Digitale Fabrik, Simulation, Cyber-physische Montagesystem, Objektlokalisierung

Abstract

In order to satisfy individual customer needs, companies are launching an increasing number of product variants in ever shorter time frames. In particular, the assembly and the planning of assembly systems are thereby faced with challenges, since the product variance especially arises during assembly. Therefore, assembly systems have to enable the production of different product variants and minimize ramp up time after product changes. In principle, multi-variant lines and cyber-physical assembly systems offer the possibility of producing several variants with maximum flexibility. However, the large number of product parameters to be considered as well as the requirements for the equipment adaptability lead to an increasing complexity in terms of planning and operation of these systems. Although assembly planning approaches as well as software tools from the digital factory try to master this complexity, they mostly act as isolated solutions and do not consider the possibilities of networking between physical assembly system modules and their virtual images.

To overcome the lack of end-to-end information use and missing planning support, this work proposes a methodology to plan cyber-physical assembly systems and to support the assembly planner. The methodology describes the planning procedure over several phases, based on a reference model for the uniform description of relationships between product, process and equipment. The application of the methodology provides a virtual scheduling of the assembly operations as well as a validation of the product assemblability by means of a requirements capability comparison in software tools. Furthermore, the acquired planning data is derived as an assembly memory, which is used to control assembly modules in the real system in order to enable a faster introduction of new product variants. Changes to the assembly system are identified by sensors and returned to the virtual planning environment, so that the latest version of the assembly system is always available as planning basis. This results in a closed information loop, which describes a coupling between real and virtual assembly. Accordingly, a more efficient and simplified planning procedure is given, as potential conflicts are indicated to the assembly planner.

The practical relevance and applicability of the planning methodology is demonstrated by means of an assembly system development for an electronic control unit. The validation involves a system development starting from scratch as well as an integration planning of a new product variant.

Keywords: Assembly, Planning, Methodology, Model, Digital Factory, Simulation, Cyber-Physical Assembly System, Object Localization

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Benennungen und Abkürzungen	VII
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Ausgangssituation und Bedarf für die digitalisierte Planung.....	1
1.2 Zielsetzung und Fokus der Arbeit.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen des Betrachtungs- und Gestaltungsbereichs	5
2.1 Montagesystemtechnik und Industrie 4.0	5
2.1.1 Eingliederung und Definition der Montage	5
2.1.2 Planung von Montagesystemen	8
2.1.3 Digitale Fabrik	10
2.1.4 Simulation und Optimierung	13
2.1.5 Industrie 4.0 und cyber-physische Systeme in der Montage	16
2.1.6 Referenzarchitekturen und objektorientierte Beschreibung.....	18
2.1.7 Anlagensteuerung mittels Produktgedächtnis	21
2.1.8 Kopplung von Modell und Realität sowie Objektlokalisierung	24
2.2 Bestehende Ansätze zur Unterstützung der Montageplanung	27
2.2.1 Allgemeine Methoden zur Montageplanung	28
2.2.2 Methoden mit Fokus auf Rekonfiguration und Modularisierung	31
2.2.3 Methoden mit Fokus auf Digitale Fabrik.....	36
2.3 Zwischenfazit	39
3 Planungsmethodik für cyber-physische Montagesysteme	41
3.1 Anforderungen an die Planungsmethodik	41
3.1.1 Unterstützung des Montageplaners	42
3.1.2 Übertragung von Planungsständen in den Montagesystembetrieb	44
3.1.3 Rückführung der Montagesystemkonfiguration	45
3.1.4 Softwaretechnische Umsetzbarkeit	45
3.2 Referenzmodell für cyber-physische Montagesysteme.....	46
3.2.1 Beschreibungsmodell des Produktes	48
3.2.2 Beschreibung von Montageprozessen	50
3.2.3 Betriebsmittelseitige Beschreibung	54
3.2.4 Kombination der einzelnen Modelle zum Gesamtmodell	58
3.3 Phasen der Planungsmethode	60
3.3.1 Produkt- und Prozessanalyse zur Montageanforderungsdefinition	63

3.3.2	Einplanung von Montageoperationen und -modulauswahl.....	69
3.3.3	Simulation, Bewertung und Optimierung des Planungsstandes.....	79
3.3.4	Verwendung der Montagedaten zur Anlagensteuerung	82
3.3.5	Identifikation des Montagesystemkonfigurationszustandes	87
3.3.6	Integrationsplanung und Veränderungen am Montagesystem	90
4	Software- und steuerungstechnische Umsetzung der Methodik	93
4.1	Softwarearchitektur und eingesetzte Systeme im Überblick.....	93
4.2	Virtuelle Planungs- und Simulationsumgebung	96
4.2.1	Referenzmodellimplementierung und Objekterstellung	96
4.2.2	Betriebsmittelabbildung und Planungsunterstützung	102
4.2.3	Erstellung von Simulationsmodellen und Simulation	108
4.2.4	Optimierung des Planungsergebnisses.....	113
4.3	Kopplung von Montageplanung und Anlagensteuerung.....	117
4.3.1	Datenübertragung in den Montagebetrieb.....	118
4.3.2	Konfiguration und Ansteuerung der Montagemodule	121
4.4	Identifikation des Montagesystemkonfigurationszustandes	125
4.4.1	Klassifizierung und Erstellung von Anweisungen	125
4.4.2	Durchführung der Identifikation	126
4.4.3	Datenrückführung und Aktualisierung der Planung	128
5	Validierung der Planungsmethodik.....	132
5.1	Szenario 1: Neuplanung eines Montagesystems	132
5.1.1	Zieldefinition, Produkt- und Montageprozessanalyse.....	132
5.1.2	Einplanung und Absicherung der Montierbarkeit.....	134
5.1.3	Aufbau und Konfiguration des Montagesystems	137
5.2	Szenario 2: Systemidentifikation, Produktneueinführung und -änderung ..	141
5.2.1	Identifikation von Veränderungen.....	141
5.2.2	Aufnahme der Produktanforderungen und Restriktionen	142
5.2.3	Integration der Anpassungen	143
5.3	Fazit zur Validierung der Methodik.....	146
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	148
6.1	Zusammenfassung.....	148
6.2	Ausblick.....	150
7	Literaturverzeichnis.....	152
A	Anhang	166
B	Liste der veröffentlichten Teilergebnisse	176
C	Betreute wissenschaftliche Abschlussarbeiten.....	178
D	Lebenslauf.....	179