

Reihe 22

Mensch-Maschine-  
Systeme

Dipl.-Ing. Florian Mohr,  
Eckersweiler

Nr. 38

## Methode zur Interaktions- modellierung heterogener Teilnehmer in Produktionsnetzwerken

**WS KL** Werkzeugmaschinen  
und Steuerungen  
TU KAISERSLAUTERN



DISSERTATION

**Methode zur Interaktionsmodellierung  
heterogener Teilnehmer  
in Produktionsnetzwerken**

Dem Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

vorgelegte

**Dissertation**

vorgelegt von

**Diplom-Ingenieur Florian Mohr**

aus Eckersweiler

Betreuer der Dissertation: Prof. Dr.-Ing. Martin Ruskowski



# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 22

Mensch-Maschine-  
Systeme

Dipl.-Ing. Florian Mohr,  
Eckersweiler

Nr. 38

Methode zur Interaktions-  
modellierung heterogener  
Teilnehmer in  
Produktionsnetzwerken



Mohr, Florian

## **Methode zur Interaktionsmodellierung heterogener Teilnehmer in Produktionsnetzwerken**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 22 Nr. 38. Düsseldorf: VDI Verlag 2020.

234 Seiten, 126 Bilder, 0 Tabellen.

ISBN 978-3-18-303822-0, ISSN 1439-958X,

€ 81,00/VDI-Mitgliederpreis € 72,00.

**Für die Dokumentation:** Industrie 4.0 – Internet of Things, Services & People – heterogene Teilnehmer – Interaktionsmodellierung – Methodenentwicklung – Autonome Produktion – Wertschöpfungsnetzwerke – Produktionsnetzwerke – Mensch-Maschine Interaktion – Prozessentwicklung

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler im Bereich der industriellen Produktion. Sie befasst sich mit der Entwicklung einer adäquaten Methode, um die Interaktionen von heterogenen Teilnehmern – Maschinen, Menschen und IT-Services – innerhalb eines autonomen Produktionsnetzwerk entwickeln und modellieren zu können. Die Methode bietet ein ganzheitliches Verständnis der komplexen Problemstellung. Sie adressiert in der sukzessiven Entwicklung sowohl die Anwender in den Phasen der Produktionsentwicklung als auch – durch die Verschiebung der Arbeitsinhalte – die Anwender direkt auf dem Shopfloor. Das übergeordnete Ziel der Methodenentwicklung stellen die adäquate Interaktionsmodellierung und -zuordnung in Anbetracht der Heterogenität der Teilnehmer und der Anforderungen des Zukunftsszenarios autonome, agile Fertigung dar.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

Dissertation Technische Universität Kaiserslautern

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 1439-958X

ISBN 978-3-18-303822-0

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Menschen danken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Ich möchte meinen Doktorvater Prof. Dr. Ruskowski für die Betreuung und die Begutachtung meiner Arbeit sowie der Bereitstellungen der Möglichkeiten in der *SmartFactory<sup>KL</sup>* und dem verbundenen Forschungsbereich *Innovative Fabriksysteme* am *DFKI* danken. Ebenso gebührt mein Dank Herrn Prof. Dr. Zühlke, der mir erst den Einstieg in die *SmartFactory<sup>KL</sup>* ermöglicht und mir von Beginn an interessante und fordernde Aufgaben anvertraut hat.

Weiteren Dank möchte ich an Herrn Prof. Dr. Seewig für den Vorsitz der Prüfungskommission und Herrn Prof. Dr. Göbel für die Begutachtung meiner Arbeit aussprechen.

All meinen aktuellen und ehemaligen Kollegen am Forschungsbereich *IFS*, am Lehrstuhl *WSKL* sowie aus der *SmartFactory<sup>KL</sup>* möchte ich für die großartige und oft freundschaftliche Zusammenarbeit innerhalb und außerhalb der unterschiedlichsten Projekte danken. Besonderer Dank gebührt dabei Jesko, Max und Patrick, die mir immer wieder andere Sichtweisen auf die Fragestellungen der Arbeit ermöglichten und aktiv für die Motivation in unserem Team sorgten.

Ebenfalls möchte ich meinen Freunden für die Unterstützung danken – gerade zum Ende der Erstellung und bei der Korrektur der Arbeit.

In besonderem Maße danke ich meiner Familie – meinen Eltern, Schwiegereltern, meiner Schwester und Schwägerin – für die direkte und indirekte Hilfe und vor allem für das Verständnis, welches ihr zu jeder Zeit für mich hattet.

Meinen Kindern – Marlene, Charlotte, Henrietta, Julius und Carlo – danke ich für das Akzeptieren aller Schwierigkeiten, die stetige Aufmunterung und die Freiheiten, die ihr mir gewährt habt.

Mein größter Dank gilt meiner Ehefrau Rafaela, die zu jeder Zeit hinter mir gestanden und mir den Rücken freigehalten hat. Ohne die Zugeständnisse, die du eingegangen bist und ohne deine Unterstützung auf allen Ebenen hätte ich diese Arbeit unter den bestehenden Gegebenheiten wohl nicht erstellen können. Danke!

Florian Mohr



# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Kurzfassung</b> .....  | <b>IX</b> |
| <b>Abstract</b> .....   | <b>X</b>  |
| <b>1 Einleitung</b> .....   | <b>1</b>  |
| 1.1 Problemstellung .....   | 2         |
| 1.2 Zielsetzung .....   | 4         |
| 1.3 Vorgehensweise der Arbeit.....                                      | 5         |
| <b>2 Grundlagen</b> .....   | <b>8</b>  |
| 2.1 Entwicklungstendenzen der Produktion der Zukunft.....               | 8         |
| 2.1.1 Architektur der modularen Fabrik .....                            | 8         |
| 2.1.2 Referenzarchitekturen .....                                       | 12        |
| 2.1.3 Industrial Internet of Things, Services und People .....          | 13        |
| 2.1.4 Ausgewählte Kommunikationsprotokolle.....                         | 14        |
| 2.1.5 Repräsentationskonzepte für Industrie 4.0 .....                   | 18        |
| 2.1.6 Digitale Fabrik.....  | 20        |
| 2.1.7 Rollen und Bedarfe in der Produktion .....                        | 22        |
| 2.1.8 Zwischenfazit.....  | 24        |
| 2.2 Interaktionen .....   | 25        |
| 2.2.1 Maschine-zu-Maschine-Interaktion .....                            | 25        |
| 2.2.2 Mensch-Maschine-Interaktion .....                                 | 29        |
| 2.2.3 Interaktion außerhalb des Produktionsumfelds .....                | 31        |
| 2.2.4 Zwischenfazit und Definition des Interaktionsbegriffs .....       | 35        |
| 2.3 Prozessmodellierung im Produktionsumfeld.....                       | 36        |
| 2.3.1 Ereignisgesteuerte Prozesskette.....                              | 37        |
| 2.3.2 UML .....   | 38        |
| 2.3.3 SysML .....   | 39        |
| 2.3.4 BPMN 2.0.....   | 40        |
| 2.3.5 Intentionsorientierte Modelle am Beispiel des i*-Frameworks ..... | 41        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.3.6    | Zwischenfazit .....   | 43        |
| 2.4      | Entwicklungsmethoden .....  | 44        |
| 2.4.1    | Methoden zur Produkt- und Prozessentwicklung .....  | 45        |
| 2.4.2    | Methoden zur Geschäftsmodellentwicklung .....   | 50        |
| 2.4.3    | Kreativmethoden .....   | 53        |
| 2.4.4    | Zwischenfazit .....   | 54        |
| <b>3</b> | <b>Methode zur Interaktionsmodellierung .....</b>   | <b>55</b> |
| 3.1      | Referenzmodell zur Methodenentwicklung .....  | 55        |
| 3.2      | Beschreibung der Ausgangssituation .....  | 58        |
| 3.3      | Analyse der späteren Methodenanwendung .....  | 60        |
| 3.3.1    | Analyse der Prozessnahtstellen .....  | 60        |
| 3.3.2    | Analyse wesentlicher Komplexitätsursachen .....   | 64        |
| 3.3.3    | Definition der operativen Gesamtaufgabenstellung .....  | 67        |
| 3.4      | Definition der passiven und aktiven Informationsakquise .....                                       | 68        |
| 3.4.1    | Entwurf eines initialen Prozessmodells .....  | 68        |
| 3.4.2    | Festlegung von akquisitionsorientierten Aufbereitungsschritten .....                                | 69        |
| 3.4.3    | Festlegung von Akquisitionsschritten .....  | 71        |
| 3.5      | Entwurf von synthesebezogenen Vorgehensweisen und des nutzwertorientierten Interaktionscanvas ..... | 72        |
| 3.5.1    | Festlegung von syntheseorientierten Aufbereitungsschritten .....                                    | 73        |
| 3.5.2    | Festlegung von Syntheseschritten .....  | 81        |
| 3.6      | Aufbereitung der Methodenausgangsinformationen .....  | 85        |
| 3.6.1    | Detailanalyse der Prozessnahtstellen der Folgeprozesse .....  | 86        |
| 3.6.2    | Festlegung von Aufbereitungsschritten .....   | 87        |
| 3.7      | Finalisierung der Methodenentwicklung durch Strukturierung der entworfenen Methodenelemente .....   | 89        |
| 3.7.1    | Entwurf eines tätigkeitsorientierten Prozessmodells .....   | 90        |
| 3.7.2    | Informationsflussorientierte Strukturierung .....   | 93        |
| <b>4</b> | <b>Interaktionsmodellierung in der autonomen Produktion .....</b>                                   | <b>97</b> |
| 4.1      | Analyse der angepassten Anwendungsbedingungen .....   | 98        |
| 4.1.1    | Analyse des Anwendungsszenarios .....   | 99        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.1.2    | Ziel der Methodenanpassung und operativen Aufgabenstellung .....  | 100        |
| 4.1.3    | Anforderung an die Methodenanpassung .....  | 101        |
| 4.1.4    | Definition globaler Anforderungen .....   | 102        |
| 4.2      | Entwicklung von Vorgehensweisen und Repräsentations-systemen zur adäquaten Informationsbereitstellung.....            | 106        |
| 4.2.1    | Strukturierte Beschreibung des Produktionsprozesses .....   | 108        |
| 4.2.2    | Teilnehmermodell der heterogenen Teilnehmer .....   | 113        |
| 4.2.3    | Strukturierte Beschreibung der Interaktionen.....   | 119        |
| 4.3      | Aufbereitung informationeller Inhalte sowie Weiterentwicklung derer Repräsentationssysteme .....                      | 123        |
| 4.3.1    | Erstellung eines Interaktionsmusterkatalogs.....  | 128        |
| 4.3.2    | Erweiterung der Prozessinformationen durch semantische Informationsbeschreibung des Nutzwerts einer Interaktion ..... | 130        |
| 4.3.3    | Informationsrepräsentation im elektronischen Interaktionscanvas .....   | 132        |
| 4.4      | Entwicklung der Richtlinien zur automatisierten Interaktionsmusteranalyse .....                                       | 135        |
| 4.5      | Entwicklung von Ablaufstrukturen zur automatisierten Methodenanwendung ..   | 138        |
| 4.5.1    | Aufbereitung der Ausgangsinformationen .....  | 138        |
| 4.5.2    | Tätigkeitsorientierte Strukturierung .....  | 139        |
| 4.5.3    | Ressourcenorientierte Ablaufstrukturierung.....   | 142        |
| 4.6      | Entwicklung der funktionsorientierten Systemstruktur .....  | 149        |
| <b>5</b> | <b>Prototypische Implementierung .....</b>  | <b>156</b> |
| 5.1      | Demonstrator .....  | 156        |
| 5.2      | Interaktions-Match-Maker.....   | 158        |
| 5.3      | Interaktionskonnektor .....   | 161        |
| 5.4      | Modellierung des Interaktionscanvas.....  | 163        |
| 5.5      | Darstellung der Systemfunktionen .....  | 165        |
| 5.5.1    | Anwendungsfall 1: mehrwertorientierte Ad-hoc-Maschinendatenakquise<br>165   |            |
| 5.5.2    | Anwendungsfall 2: Ad-hoc-Wechsel der Interaktionsteilnehmer .....   | 169        |
| 5.5.3    | Anwendungsfall 3: Vorgehensweise zur proaktiven Hemmnisumgehung   | 171        |
| 5.5.4    | Anwendungsfall 4: Interaktionsmusterzuordnung ohne menschliche Teilnehmer .....                                       | 174        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>6</b> | <b>Evaluation .....</b>                         | <b>177</b> |
| 6.1      | Evaluation der technischen Systemelemente ..... | 180        |
| 6.1.1    | Interaktions-Match-Maker .....                  | 180        |
| 6.1.2    | Interaktionskonnektor .....                     | 182        |
| 6.1.3    | Interaktionscanvas-Modeler .....                | 183        |
| 6.1.4    | Informationsrepräsentationssysteme .....        | 183        |
| 6.2      | Evaluation des Gesamtsystems .....              | 188        |
| 6.3      | Evaluation der Methodenanpassung .....          | 190        |
| 6.4      | Evaluation der Methodenentwicklung.....         | 193        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung.....</b>                     | <b>196</b> |
| 7.1      | Ausblick.....                                   | 198        |
| 7.2      | Abschließende Bewertung .....                   | 199        |
|          | <b>Literaturverzeichnis.....</b>                | <b>201</b> |

## Kurzfassung

Der aktuelle digitale Wandel innerhalb der Produktion ist als Antwort auf die veränderten Anforderungen durch neue Kundenbedürfnisse und Umweltbedingungen zu sehen. Die flächendeckende Verbreitung intelligenter und vernetzter Produktionsanlagen ermöglicht hierbei eine komplementäre Vernetzung und flexible Anpassbarkeit auf der operativen Produktionsebene. Der Wandel in der Produktion wird von einem sich verändernden Rollenprofil und Aufgabenspektrum der Mitarbeiter begleitet. Die Beschäftigten bilden mit den involvierten Maschinen und unterstützenden IT-Services ein wandelbares Produktionsnetzwerk, welches somit aus heterogenen Teilnehmern besteht. Zur Bewältigung der Produktionsaufgaben und Sicherstellung der effektiven Aufgabenverteilung in den agilen Produktionsprozessanpassungen wird in dieser Arbeit eine *Methode zur Interaktionsmodellierung heterogener Teilnehmer im Produktionsnetzwerk* entwickelt. Die Methode bietet ein ganzheitliches Verständnis der komplexen Problemstellung. Sie adressiert in der sukzessiven Entwicklung sowohl die Anwender in den Phasen der Produktionsentwicklung als auch – durch die Verschiebung der Arbeitsinhalte – die Anwender direkt auf dem Shopfloor. Das übergeordnete Ziel der Methodenentwicklung stellen die adäquate Interaktionsmodellierung und -zuordnung in Anbetracht der Heterogenität der Teilnehmer dar. Das Zukunftsszenario der autonomen, agilen Fertigung erfordert eine automatisierte Interaktionsmusterzuordnung, welche durch ein in dieser Arbeit neu entwickeltes IT-Tool unterstützt wird. In der abschließenden prototypischen Implementierung der automatisierten Methodenanwendung werden neben dem funktionalen Gesamtsystem die notwendigen semantischen Informationsrepräsentationssysteme, ein übergreifendes Teilnehmermodell sowie eine semantisch erweiterte Methode zur Prozessbeschreibung entworfen.

# Abstract

The current digital change within production can be perceived as the answer to the changed customer needs and environmental conditions. The comprehensive expansion of intelligent and networked production facilities enables complementary networking and agile adaptability at the operative production level. The change in production is accompanied by a changing role profile and task spectrum of the employees. The staff together with the involved machines and supporting IT services create a changeable production network, which thus is composed of heterogeneous participants. In order to master the production tasks and to ensure the effective work distribution within the agile production process modifications, a method for *interaction modelling of heterogeneous participants in the production network* is developed in this thesis. The method offers a holistic understanding of the complex problem: In its successive development, it addresses both the users in the engineering phases as well as – after the transfer of the work items – the users directly on the shop floor. The main goal of the method development is the adequate interaction modelling and allocation in the light of the heterogeneity of the participants. The future scenario of autonomous agile manufacturing demands an automated interaction pattern assignment which is supported by an IT tool newly designed in this study. Finally, the automated method application is prototypically implemented: In addition to the functional overall system structure, the required semantic information representation frameworks, a generic participant model and a semantically extended method for process description are presented.