

Reihe 22

Mensch-Maschine-  
Systeme

Nr. 40

Dipl.-Ing. Patrick Bertram,  
Kaiserslautern

## Entwicklung eines kontextsensitiven, modularen Assistenz- systems für manuelle Tätigkeiten



Werkzeugmaschinen  
und Steuerungen  
TU KAISERSLAUTERN



# Entwicklung eines kontextsensitiven, modularen Assistenzsystems für manuelle Tätigkeiten

Vom Fachbereich Maschinenwesen und Verfahrenstechnik  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Erlangung des akademischen Grades

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

genehmigte

**Dissertation**

von

Herrn

**Dipl.-Ing. Patrick Bertram**

aus Rockenhausen

Tag der mündlichen Prüfung: 10.11.2020

Dekan: Prof. Dr.-Ing. Tilmann Beck

Promotionskommission:

Vorsitender: Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Martin Ruskowski

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Antonio Krüger

D 386



# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 22

Mensch-Maschine-  
Systeme

Dipl.-Ing. Patrick Bertram,  
Kaiserslautern

Nr. 40

Entwicklung eines  
kontextsensitiven,  
modularen Assistenz-  
systems für manuelle  
Tätigkeiten



Bertram, Patrick

## **Entwicklung eines kontextsensitiven, modularen Assistenzsystems für manuelle Tätigkeiten**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 22 Nr. 40. Düsseldorf: VDI Verlag 2020.

176 Seiten, 85 Bilder, 12 Tabellen.

ISBN 978-3-18-304022-3, ISSN 1439-958X,

€ 62,00/VDI-Mitgliederpreis € 55,80.

**Für die Dokumentation:** Industrie 4.0 – Assistenzsysteme – Manuelle Tätigkeiten – Reparatur und Nacharbeit – Mensch-Maschine Interaktion – Intentionserkennung – Kontextsensitivität – Modulare, verteilte Systeme

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler im Bereich der industriellen Produktion. Sie beschäftigt sich mit der Entwicklung eines kontextsensitiven und modularen Assistenzsystems, um Werker im Bereich der Reparatur und Nacharbeit zu unterstützen. Das Assistenzsystem fokussiert flexibel bearbeitbare und wechselnde Arbeitsprozesse, bei denen weder der Arbeitsweg noch das Arbeitsziel im Voraus bekannt sind. Grundlage hierfür sind - neben des modularen und kontextsensitiven Aufbaus – die Betrachtung von deterministischen und probabilistischen Bereichen eines Arbeitsprozesses. Das System kann sich so flexible an individuelle Arbeitsweisen oder Situationen anpassen. Um die Vorteile der flexiblen Assistenz auch in bestehenden Systemen zu erreichen wurde bei der Entwicklung eine wiederverwendbare und übertragbare Systemarchitektur konzipiert.

### **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 978-3-18-304022-3

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen meinen großen Dank aussprechen, die mich bei der Erstellung meiner Dissertation und auf dem gesamten Weg dorthin unterstützt haben. Die vorliegende Arbeit entstand begleitend zu meinen Tätigkeiten bei der *SmartFactory*<sup>KL</sup> und dem Forschungsbereich *Innovative Fabrikssysteme* des *DFKI*.

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Martin Ruskowski möchte ich daher nicht nur für die Betreuung und die Begutachtung meiner Arbeit danken, sondern auch für die übertragene Verantwortung und Freiräume bei meinen Projektarbeiten. Gerade diese Möglichkeiten haben die Erstellung dieser Arbeit und die damit verbundenen praktischen Umsetzungen erst möglich gemacht. Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Zühlke dafür danken, dass er meinen Einstieg in die *SmartFactory*<sup>KL</sup> ermöglicht und durch die Übertragung vieler fordernder und fördernder Aufgaben maßgeblich zu meiner Entwicklung und Erarbeitung dieser Dissertation beigetragen hat.

Ebenso gebührt mein Dank Herrn Prof. Dr. Antonio Krüger für die Begutachtung meiner Dissertation, das Interesse an meiner Arbeit und an weiterführenden gemeinsamen Forschungsarbeiten in diesem Themenbereich sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig für den Vorsitz bei der Prüfungskommission.

Weiterhin danke ich all meinen Kollegen - seien es aktuelle oder ehemalige, seien es Mitarbeiter am Lehrstuhl WSKL, an der *SmartFactory*<sup>KL</sup> oder dem Forschungsbereich IFS - für die großartige Zeit, die vielen gemeinsamen Momente sowie die stets überragende Zusammenarbeit und Unterstützung in allen Projekten. Namentlich möchte ich hier Fabian sowie die Mitarbeiter des Teams Konstruktion und Entwicklung - Federico, Rouven, Rüdiger, Rüdiger und Nils - erwähnen, die mich teilweise von Beginn an bei allen technischen Fragestellungen unterstützt und in den letzten Monaten meiner Dissertation meine persönliche Entwicklung stark geprägt haben. Besonders hervorheben möchte ich zudem Florian, Jesko und Max für all die hitzigen, vor allem aber hilfreichen Diskussionen, für die einzigartigen Momente innerhalb und außerhalb der Arbeit sowie für die ständige gegenseitige Motivation und den Antrieb bei unseren Arbeiten.

Vielen Dank wünsche ich ebenso Benjamin, Carsten, Felix, Keran, Max, Nikolas und Yuriy, die im Laufe von Projekten oder studentischen Arbeiten große Anteile an den praktischen Umsetzungen rund um den Handarbeitsplatz der *SmartFactory*<sup>KL</sup> hatten und somit erst die Rahmenbedingungen für diese Arbeit geschaffen haben.

## IV

Ebenfalls danke ich allen meinen Freunden für die moralische Unterstützung sowie den Beistand bei der schriftlichen Ausarbeitung und bei der Korrektur der Arbeit. Insbesondere danke ich Fabienne und Laura für die kontinierliche Hilfe, durch die viele komplexe und verschachtelte Sätze erst in eine verständliche Form gebracht wurden.

In besonderem Maße danke ich meinen Eltern Andrea und Walter sowie meiner Schwester Theresa, die einen großen Einfluss auf meine Entwicklung hatten und damit meine Persönlichkeit und meinen Ehrgeiz geprägt haben. Vielen Dank für die direkte und indirekte Unterstützung, die Ihr mir habt zukommen lassen.

Patrick Bertram

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	2
1.2 Zielstellung . . . . .	4
1.3 Vorgehensweise . . . . .	6
<b>2 Stand der Wissenschaft und Technik</b>	<b>8</b>
2.1 Assistenzsysteme für manuelle Tätigkeiten . . . . .	8
2.1.1 Begrifflichkeiten und Einordnung von Assistenzsystemen . . . . .	9
2.1.2 Bekannte Assistenzsysteme und deren Ziele . . . . .	10
2.1.3 Kontextsensitivität von Assistenzsystemen . . . . .	16
2.1.4 Assistenzsysteme im Kontext Industrie 4.0 und Reparatur . . . . .	20
2.1.5 Zusammenfassung und Abgrenzung . . . . .	23
2.2 Grundlagen zur semantischen Modellierung des Arbeitskontexts . . . . .	24
2.2.1 Kontextmodellierung: Begrifflichkeiten und bekannte Kontextmodelle . . . . .	25
2.2.2 Kontextmodelle für das Produktionsumfeld . . . . .	28
2.2.3 Modelle zur Beschreibung manueller Tätigkeiten im Produktionsumfeld . . . . .	31
2.2.4 Modelle zur Klassifikation von Werkzeugen und Materialien . . . . .	34
2.2.5 Zusammenfassung . . . . .	35
2.3 Modellierungssprachen und Verhaltensmodelle . . . . .	36
2.3.1 Ereignisgesteuerte Prozesskette (EPK) . . . . .	36
2.3.2 Business Process Modeling Notation (BPMN) . . . . .	37
2.3.3 Endliche Zustandsautomaten . . . . .	39
2.3.4 UML-Zustandsmaschine . . . . .	40
2.3.5 Petri-Netze . . . . .	42
2.3.6 Hidden Markov Modelle . . . . .	44
2.3.7 Zusammenfassung und Zwischenfazit . . . . .	46
<b>3 Methodisches Vorgehen und Anforderungsdefinition</b>	<b>48</b>
3.1 Meta-Methodik für die Bearbeitung der Zielsetzung . . . . .	48
3.2 Abgrenzung des betrachteten Problemraums . . . . .	51
3.3 Definition der globale Anforderungen . . . . .	52

3.4	Informationsakquise lokaler, funktionaler Anforderungen . . . . .	55
3.4.1	Abstrahierter Komponentenentwurf . . . . .	57
3.4.2	Abstrahierter Systementwurf . . . . .	60
3.4.3	Abstrahierte Systemspezifikation . . . . .	65
3.4.4	Zusammenfassung lokaler und funktionaler Anforderungen . . . . .	67
<b>4</b>	<b>Synthese und Modellbildung</b>	<b>69</b>
4.1	Systemspezifikation: Prozessmodell des Zielsystems . . . . .	69
4.2	Systementwurf: Entwicklung der Systemarchitektur . . . . .	72
4.3	Komponentenentwurf: Entwicklung der Verarbeitungslogik . . . . .	76
4.3.1	Bewertung bestehender Modellierungssprachen und Verhaltensmodelle	76
4.3.2	Modellierung der Arbeitsprozessfolge . . . . .	78
4.3.3	Modellierung der kontextsensitiven Erkennung des Arbeitsschritts . . . .	81
4.3.4	Definition des kombinierten Arbeitsprozessmodells . . . . .	85
4.3.5	Detailentwurf der Teilkomponenten der Verarbeitungskomponente . . . .	86
<b>5</b>	<b>Umsetzung und Evaluation</b>	<b>92</b>
5.1	Anwendungsfall und Assistenzsystem der <i>SmartFactory</i> <sup>KL</sup> . . . . .	93
5.2	Umsetzung und Integration der Verarbeitungskomponente . . . . .	97
5.2.1	Vorbereitung des bestehenden Assistenzsystems . . . . .	98
5.2.2	Umsetzung des Workflow-Modells . . . . .	106
5.2.3	Umsetzung der Verarbeitungskomponente . . . . .	109
5.3	Komponententest . . . . .	114
5.4	Integrationstest . . . . .	119
5.5	Systemtest . . . . .	123
5.6	Bewertung und Evaluation des Gesamtsystems . . . . .	126
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>132</b>
6.1	Implikationen für Wissenschaft und Praxis . . . . .	134
6.2	Abschließende Bewertung . . . . .	136
<b>Anhang</b>		<b>138</b>
A	Erfassungsbögen für die Informationsakquise und Informationsaufbereitung . .	138
B	Dokumente für den Systemtest . . . . .	146
B.1	Erfassungsbogen für die Testdurchläufe . . . . .	146
B.2	Arbeitsauftrag und Anwendungsszenario . . . . .	147
B.3	Nutzungsanweisung des Assistenzsystem . . . . .	149
B.4	Systembeschreibung zur Funktionsweise des Assistenzsystems und der Verarbeitungslogik . . . . .	151

<b>Literatur</b>	<b>153</b>
Monografien und Artikel . . . . .	153
Normen und Richtlinien . . . . .	164
Hochschulschriften . . . . .	164
Betreute studentische Arbeiten . . . . .	165
Webseiten und Internetreferenzen . . . . .	166

## Kurzfassung

Heutige am Markt verfügbare Assistenzsysteme zur Unterstützung manueller Tätigkeiten im Produktionsumfeld sind meist starr aufgebaut. Dies spiegelt sich häufig in unflexiblen Arbeitsplätzen wider, die Personen selbstbestimmtes Arbeiten verwehren, indem Arbeitsschritte und Abläufe vorgegeben werden und Anpassungen des Arbeitsplatzes nicht möglich sind. Selbst Systeme, die hochflexible Arbeitsaufträge bewältigen müssen, wie in der Losgröße 1 Produktion oder im Bereich der Reparatur und Nachbearbeitung von technischen Systemen, verfügen nicht über geeignete Unterstützungssysteme oder orientieren sich an den beschriebenen starren Lösungen.

Aufgrund dieser Gegebenheiten ist das Ziel dieser Arbeit ein kontextsensitives Assistenzsystem zu schaffen, das sich flexibel und automatisch an die Arbeitsweise der nutzenden Person anpasst und eine einfache Adaption des Arbeitsplatzaufbaus ermöglicht. Hierzu werden bestehende Systeme aus Industrie und Forschung untersucht und als abstraktes Modell dargestellt. Aufbauend auf den dabei gewonnen Erkenntnissen wird eine angepasste Systemarchitektur und Funktionsweise für ein modulares, kontextsensitives Assistenzsystem entwickelt.

Kernaspekt der Funktionsweise ist die Kombination eines deterministischen Anteils zur Prüfung der korrekten Bearbeitung und eines probabilistischen Anteils, der die Anpassung an den Arbeitsweg der nutzenden Person ermöglicht. In einer nachgelagerten Umsetzung am Handarbeitsplatz der *SmartFactory*<sup>KL</sup> und mithilfe eines Reparaturszenarios wird ein Machbarkeitsnachweis für das entwickelte System geliefert sowie die Funktionsweise überprüft. Die Ergebnisse dieser Evaluation zeigen, dass die Realisierung eines modularen und adaptiven Assistenzsystems erreicht wurde, wodurch eine Nutzung in veränderlichen Arbeitsumgebungen und eine Unterstützung einer eigenbestimmten Arbeitsweise für manuelle Tätigkeiten möglich wird.