

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



Werkzeugmaschinen
und Steuerungen
TU KAISERSLAUTERN

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*^{KL} und dem Forschungsbereich *Innovative Fabriksysteme* 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*^{KL} 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*^{KL} 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*^{KL} hatten und somit erst die Rahmenbedingungen für diese Arbeit geschaffen haben.

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 kontinuierliche 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

Kurzfassung	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Zielstellung	4
1.3 Vorgehensweise	6
2 Stand der Wissenschaft und Technik	8
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
3 Methodisches Vorgehen und Anforderungsdefinition	48
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
4	Synthese und Modellbildung	69
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	Detaillentwurf der Teilkomponenten der Verarbeitungskomponente . .	86
5	Umsetzung und Evaluation	92
5.1	Anwendungsfall und Assistenzsystem der <i>SmartFactory</i> ^{KL}	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
6	Zusammenfassung und Ausblick	132
6.1	Implikationen für Wissenschaft und Praxis	134
6.2	Abschließende Bewertung	136
Anhang		138
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

Literatur	153
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*^{KL} 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.