

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für  
Betriebswissenschaften und Montagetechnik

**Modellbasierte Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen im Maschinen- und Anlagenbau**

**Christoph Julius Richter**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr. phil. Klaus Bengler

Die Dissertation wurde am 19.03.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 01.10.2018 angenommen.

Christoph Richter

**Modellbasierte Entwicklung von  
Mensch-Maschine-Schnittstellen im  
Maschinen- und Anlagenbau**



**Forschungsberichte IWB**

Band 343

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2018

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.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.  
Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH · 2019

ISBN 978-3-8316-4773-6

Printed in Germany  
utzverlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	4
1.3 Forschungsmethodisches Vorgehen	5
1.4 Aufbau der Arbeit	6
<b>2 Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1 Mechatronische Systeme und Mensch-Maschine-Schnittstellen im Maschinen- und Anlagenbau	9
2.2 Interaktionstechnologien für Maschinen und Anlagen	12
2.2.1 Etablierte Interaktionstechnologien und aktuelle Trends	13
2.2.2 Potenzielle zukünftiger Interaktionstechnologien	16
2.3 Softwareergonomie	19
2.3.1 Definition und Ziele der Softwareergonomie	19
2.3.2 Zentrale Qualitätsmerkmale ergonomischer Software	21
2.3.3 Relevante Normen und Richtlinien	23
2.4 Modellbildung und Simulation	26
2.4.1 Beschreibung des System-, Modell- und Simulationsbegriffs	26
2.4.2 Modellbildung bei mechatronischen Systemen und Mensch-Maschine-Schnittstellen	28
2.4.3 Simulation von mechatronischen Systemen und Mensch-Maschine-Schnittstellen	33
<b>3 Stand der Wissenschaft und Technik</b>	<b>37</b>
3.1 Überblick über die Entwicklung mechatronischer Systeme	37
3.2 Überblick über die Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen	40
3.3 Entwicklungsansätze für mechatronische Systeme	42
3.3.1 Generelle Vorgehensmodelle und Entwicklungsmethoden	43

3.3.2	Spezielle Ansätze zur modellbasierten Entwicklung	45
3.3.3	Analyse der Ansätze hinsichtlich der Berücksichtigung von Mensch-Maschine-Schnittstellen	53
3.4	Entwicklungsansätze für Mensch-Maschine-Schnittstellen	54
3.4.1	Generelle Vorgehensmodelle und Entwicklungsmethoden	55
3.4.2	Spezielle Ansätze zur modellbasierten Entwicklung	62
3.4.3	Analyse der Ansätze hinsichtlich einer Übertragung auf mechatronische Entwicklungsprozesse	70
3.5	Identifikation des Handlungsbedarfs	72
<b>4</b>	<b>Anforderungsanalyse</b>	<b>73</b>
4.1	Anforderungen an die Entwicklungsmethodik	73
4.1.1	Allgemeine Anforderungen	73
4.1.2	Spezielle Anforderungen im Kontext der Mechatronik	75
4.1.3	Spezielle Anforderungen im Kontext der Mensch-Maschine-Schnittstelle	76
4.2	Auswahl einer mechatronischen Entwicklungsmethodik als Forschungsgrundlage	77
<b>5</b>	<b>Modellbasierte Entwicklungsmethodik für Mensch-Maschine-Schnittstellen im Maschinen- und Anlagenbau</b>	<b>79</b>
5.1	Gesamtüberblick über die Entwicklungsmethodik	79
5.2	Aktivität I: HMI-Modellierung	82
5.2.1	Erweiterte Systemmodellierungstechnik zur Abbildung von HMIs	82
5.2.2	Prozessablauf für den Einsatz der Modellierungstechnik während der Konzeption von mechatronischen Systemen	92
5.3	Aktivität II: Technologieauswahl	100
5.3.1	Gegenüberstellung von Auswahlfaktoren und Interaktionstechnologien in einer Einflussmatrix	100
5.3.2	Prozessablauf für den Einsatz der Einflussmatrix bei der Technologieauswahl	111
5.4	Aktivität III: HMI-Implementierung	115

5.4.1	Transformation der Modelle von Mensch-Maschine-Schnittstellen	115
5.4.2	Prozessablauf für den Einsatz der Modelltransformation während der Implementierung von Mensch-Maschine-Schnittstellen	120
5.5	Aktivität IV: HMI-Qualitätssicherung	124
5.5.1	Eingesetzte Simulationstechniken	125
5.5.2	Prozessablauf für den Einsatz der Simulationstechniken	130
5.6	Zusammenfassung	134
<b>6</b>	<b>Anwendung und Bewertung der modellbasierten Entwicklungsmethodik</b>	<b>135</b>
6.1	Vorgehensweise bei der Anwendung und Bewertung	135
6.2	Softwareumsetzung der technischen Lösungsbausteine	136
6.2.1	Umsetzung der Modellierungstechnik, der Modelltransformation und der Simulationstechniken	136
6.2.2	Umsetzung der Einflussmatrix	140
6.3	Anwendung an einem industrienahen Fallbeispiel	141
6.3.1	Einführung des Fallbeispiels	141
6.3.2	HMI-Modellierung	142
6.3.3	Auswahl von Interaktionstechnologien	147
6.3.4	HMI-Implementierung	149
6.3.5	HMI-Qualitätssicherung	154
6.4	Technische Bewertung	158
6.4.1	Bewertung anhand der formulierten Anforderungen	158
6.4.2	Nutzenpotenziale, Aufwände und Einschränkungen	161
6.5	Wirtschaftliche Bewertung	163
6.6	Zusammenfassung	167
<b>7</b>	<b>Schlussbetrachtung</b>	<b>169</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>173</b>

<b>Anhang</b>	<b>205</b>
A1 Detailbetrachtung des IMoMeSA-Ansatzes von HACKENBERG ET AL.	205
A2 Metamodell der Modellierungstechnik	218
A3 Auswahlfaktoren und Klassifikationskriterien	222
A4 Verzeichnis verwendeter Software	228
A5 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	229

- 279 *Fabian J. Meling*: Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik  
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-4319-6
- 280 *Jörg Egbers*: Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses  
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-4328-8
- 281 *Max von Bredow*: Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie  
204 Seiten · ISBN 978-3-8316-4337-0
- 282 *Tobias Philipp*: RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen  
142 Seiten · ISBN 978-3-8316-4346-2
- 283 *Stefan Rainer Johann Braunreuther*: Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen  
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4348-6
- 284 *Johannes Pohl*: Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen  
202 Seiten · ISBN 978-3-8316-4358-5
- 285 *Matthey Wiesbeck*: Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung  
194 Seiten · ISBN 978-3-8316-4369-1
- 286 *Sonja Huber*: In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen  
206 Seiten · ISBN 978-3-8316-4370-7
- 287 *Robert Wiedemann*: Prozessmodell und Systemtechnik für das laserunterstützte Fräsen  
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4384-4
- 288 *Thomas Irenhauser*: Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz  
242 Seiten · ISBN 978-3-8316-4404-9
- 289 *Jens Hatwig*: Automatisierte Bahnanplanung für Industrieroboter und Scanneroptiken bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung  
196 Seiten · ISBN 978-3-8316-4405-6
- 290 *Matthias Baur*: Aktives Dämpfungssystem zur Ratterunterdrückung an spanenden Werkzeugmaschinen  
210 Seiten · ISBN 978-3-8316-4408-7
- 291 *Alexander Schöber*: Eine Methode zur Wärmequellenkalibrierung in der Schweißstruktursimulation  
198 Seiten · ISBN 978-3-8316-4415-5
- 292 *Matthias Glonegger*: Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen  
214 Seiten · ISBN 978-3-8316-4419-3
- 293 *Markus Kahnert*: Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung bei Elektronenstrahl schmelzen (EBM)  
228 Seiten · ISBN 978-3-8316-4416-2
- 294 *Sebastian Schindler*: Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion  
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4434-6
- 295 *Tobias Fäckerer*: Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärtens  
128 Seiten · ISBN 978-3-8316-4448-3
- 296 *Rüdiger Spillner*: Einsatz und Planung von Roboterasistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion  
286 Seiten · ISBN 978-3-8316-4450-6
- 297 *Daniel Schmid*: Rührreibschweißen von Aluminiumlegierungen mit Stählen für die Automobilindustrie  
300 Seiten · ISBN 978-3-8316-4452-0
- 298 *Florian Karl*: Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln  
222 Seiten · ISBN 978-3-8316-4458-2
- 299 *Philipp Ronald Engelhardt*: System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage  
246 Seiten · ISBN 978-3-8316-4472-8
- 300 *Markus Graß*: Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion  
202 Seiten · ISBN 978-3-8316-4476-6
- 301 *Thomas Kirchmeier*: Methode zur Anwendung der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall im automatisierten Montageprozess  
196 Seiten · ISBN 978-3-8316-4478-0
- 302 *Oliver Röscher*: Steigerung der Arbeitsegenauigkeit bei der Fräsbearbeitung metallischer Werkstoffe mit Industrierobotern  
214 Seiten · ISBN 978-3-8316-4486-5
- 303 *Christoph Sieben*: Entwicklung eines Prognosemodells zur prozessbegleitenden Beurteilung der Montagequalität von Kollbendichtungen  
194 Seiten · ISBN 978-3-8316-4510-7
- 304 *Philipp Alexander Schmidt*: Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte von Lithium-Ionen-Batterien in Elektro- und Hybridefahrzeugen  
190 Seiten · ISBN 978-3-8316-4519-0
- 305 *Yi Shen*: System für die Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage  
230 Seiten · ISBN 978-3-8316-4520-6
- 306 *Thomas Bonin*: Moderne Ordnungsreduktionsverfahren für die Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen  
274 Seiten · ISBN 978-3-8316-4522-0
- 307 *Jan Daniel Musiol*: Remote-Laserstrahl-Abtragschneiden  
168 Seiten · ISBN 978-3-8316-4523-7
- 308 *Emin Genc*: Frühwarnsystem für ein adaptives Störungsmanagement  
234 Seiten · ISBN 978-3-8316-4525-1
- 309 *Mirko Langhorst*: Beherrschung von Schweißverzug und Schweißeigenspannungen  
252 Seiten · ISBN 978-3-8316-4524-2
- 310 *Markus Schweier*: Simulative und experimentelle Untersuchungen zum Laserschweißen mit Strahlzosillation  
284 Seiten · ISBN 978-3-8316-4536-7
- 311 *Florian Geiger*: System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktsspezifischer Auftragsdaten  
224 Seiten · ISBN 978-3-8316-4537-4
- 312 *Peter Schnellbach*: Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendungen unter Berücksichtigung von Zielgrößen  
Ganzheitlicher Produktionsysteme  
236 Seiten · ISBN 978-3-8316-4540-4
- 313 *Stefan Schwarz*: Prognosefähigkeit dynamischer Simulationen von Werkzeugmaschinenstrukturen  
244 Seiten · ISBN 978-3-8316-4542-8
- 314 *Markus Pröpster*: Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugebaus  
238 Seiten · ISBN 978-3-8316-4547-3
- 315 *Dominik David Simon*: Automatisierte flexible Werkzeugsysteme zum Umformen und Spannen von Kunststoffscheiben und -schalen  
234 Seiten · ISBN 978-3-8316-4548-0
- 316 *Stefan Maurer*: Frühauflklärung kritischer Situationen in Vorsorgungsprozessen  
242 Seiten · ISBN 978-3-8316-4554-1
- 317 *Tobias Maier*: Modellierungssystematik zur aufgabenbasierten Beschreibung des thermoelastischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen  
274 Seiten · ISBN 978-3-8316-4561-9
- 318 *Klemens Konrad Niehus*: Identifikation linearer Dämpfungsmodelle für Werkzeugmaschinenstrukturen  
286 Seiten · ISBN 978-3-8316-4568-8

- 319 *Julian Christoph Sebastian Backhaus*: Adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme  
264 Seiten · ISBN 978-3-8316-4570-1
- 320 *Sabine G. Zitzlsberger*: Flexibles Werkzeug zur Umformung von Polycarbonatplatten unter besonderer Beachtung der optischen Qualität  
228 Seiten · ISBN 978-3-8316-4573-2
- 321 *Christian Thiemann*: Methode zur Konfiguration automatisierter thermografischer Prüfsysteme  
244 Seiten · ISBN 978-3-8316-4574-9
- 322 *Markus Westermeier*: Qualitätsorientierte Analyse komplexer Prozessketten am Beispiel der Herstellung von Batteriezellen  
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-4586-2
- 323 *Thorsten Klein*: Agile Engineering im Maschinen- und Anlagenbau  
284 Seiten · ISBN 978-3-8316-4598-5
- 324 *Markus Wiedemann*: Methodik zur auslastungsorientierten Angebotsbestimmung für hochvariante Produkte mit kundenindividuellen Leistungsanteilen  
216 Seiten · ISBN 978-3-8316-4599-2
- 325 *Harald Krauss*: Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch schichtweise thermografische In-Prozess-Überwachung  
304 Seiten · ISBN 978-3-8316-4628-9
- 326 *Stefan Krotth*: Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase der Maschinen- und Anlagenentwicklung  
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-4636-4
- 327 *Andreas Roth*: Modellierung des Rührreibschweißens unter besonderer Berücksichtigung der Spalttoleranz  
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4639-5
- 328 *Philipp Benjamin Michaeli*: Methodik zur Entwicklung von Produktionsstrategien am Beispiel der Triebwerksindustrie  
288 Seiten · ISBN 978-3-8316-4642-5
- 329 *Michael Richard Niehues*: Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme durch fertigungsbegleitende Reihenfolgebildung  
314 Seiten · ISBN 978-3-8316-4650-0
- 330 *Johannes Stock*: Remote-Laserstrahl trennen von kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff  
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4662-3
- 331 *Andreas Fabian Hees*: System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme  
218 Seiten · ISBN 978-3-8316-4676-0
- 332 *Fabian Michael Distel*: Methodische Auslegung ultraschallbasierter berührungsloser Handhabungssysteme  
292 Seiten · ISBN 978-3-8316-4679-1
- 333 *Christian Plehn*: A Method for Analyzing the Impact of Changes and their Propagation in Manufacturing Systems  
276 Seiten · ISBN 978-3-8316-4695-1
- 334 *Josef Huber*: Verfahren zur Klassifikation von Ungänzen bei der optischen Prüfung von Batterieseparatoren  
226 Seiten · ISBN 978-3-8316-4593-0
- 335 *Martin Schmidt*: Kognitive Prozessesteuerung zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der Druckindustrie  
210 Seiten · ISBN 978-3-8316-4139-0
- 336 *Alexander Belitski*: Rechnergestützte Minimierung des Verzugs laserstrahlgeschweißter Bauteile  
234 Seiten · ISBN 978-3-8316-4254-0
- 337 *Georg Albin Josef Götz*: Methode zur Steigerung der Formatflexibilität von Verpackungsmaschinen  
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4332-5
- 338 *Thomas Knoch*: Elektrolytbefüllung prismatischer Lithium-Ionen-Zellen  
244 Seiten · ISBN 978-3-8316-4714-9
- 339 *Johannes Graf*: Ein Vorgehensmodell zur automatisierten und qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge  
262 Seiten · ISBN 978-3-8316-4745-3
- 340 *Georgios Dimitrios Theodossiadis*: Thermal Joining based on Reactive Multilayered Nanofoils  
110 Seiten · ISBN 978-3-8316-4747-7
- 341 *Fabian Karl Keller*: Methodik zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung  
218 Seiten · ISBN 978-3-8316-4761-3

## Forschungsberichte IWB ab Band 342

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte IWB ab Band 342 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
utzverlag, München, Fax 089-277791-01; [info@utzverlag.de](mailto:info@utzverlag.de), [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

- 342 *Johannes Karl Bernhard Schmalz*: Rechnergestützte Auslegung und Auswahl von Greifersystemen  
236 Seiten · ISBN 978-3-8316-4768-2
- 343 *Christoph Richter*: Modellbasierte Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen im Maschinen- und Anlagenbau  
260 Seiten · ISBN 978-3-8316-4773-6