

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 fotomechani-
schem 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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	4
1.3 Forschungsmethodisches Vorgehen	5
1.4 Aufbau der Arbeit	6
2 Grundlagen	9
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 Potenziale 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
3 Stand der Wissenschaft und Technik	37
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
4	Anforderungsanalyse	73
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
5	Modellbasierte Entwicklungsmethodik für Mensch-Maschine-Schnittstellen im Maschinen- und Anlagenbau	79
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
6	Anwendung und Bewertung der modellbasierten Entwicklungsmethodik	135
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
7	Schlussbetrachtung	169
8	Literaturverzeichnis	173

Anhang	205
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 **Mathey 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 Wiedenmann:** 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 Bahnplanung 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 Schober:** 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 beim Elektronenstrahlschmelzen (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 Föckerer:** Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärtens
128 Seiten · ISBN 978-3-8316-4448-3
- 296 **Rüdiger Spillner:** Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion
286 Seiten · ISBN 978-3-8316-4450-6
- 297 **Daniel Schmid:** Rührschweißen 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 Groß:** 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 Rösch:** Steigerung der Arbeitsgenauigkeit 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 Kolbenclentungen
194 Seiten · ISBN 978-3-8316-4510-7
- 304 **Philipp Alexander Schmidt:** Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte von Lithium-Ionen-Batterien in Elektro- und Hybridfahrzeugen
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 **Ermin Genc:** Frühwarnsystem für ein adaptives Störungsmanagement
234 Seiten · ISBN 978-3-8316-4525-1
- 309 **Mirko Langhorst:** Beherrschung von Schweißverzug und Schweißbeanspruchungen
252 Seiten · ISBN 978-3-8316-4524-2
- 310 **Markus Schwieler:** Simulative und experimentelle Untersuchungen zum Laserschweißen mit Strahloszillation
284 Seiten · ISBN 978-3-8316-4536-7
- 311 **Florian Geiger:** System zur wissenschaftlichen Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten
224 Seiten · ISBN 978-3-8316-4537-4
- 312 **Peter Schnellbach:** Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung unter Berücksichtigung von Zielgrößen Ganzheitlicher Produktionssysteme
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 Präpster:** Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugbaus
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:** Frühaufklärung kritischer Situationen in Versorgungsprozessen
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 Niehues:** 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*: Agiles Engineering im Maschinen- und Anlagenbau
284 Seiten - ISBN 978-3-8316-4598-5
- 324 *Markus Wiedemann*: Methodik zur auslastungsorientierten Angebotsterminierung für hochvariante Produkte mit kundenindividuellen Leistungsanteilen
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4599-2
- 325 *Harald Krauss*: Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch schichtweise thermografische In-Process-Überwachung
304 Seiten - ISBN 978-3-8316-4628-9
- 326 *Stefan Krotz*: 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-Laserstrahltrennen von kohlenstoffverstärktem 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 Ungängen bei der optischen Prüfung von Batterieeparatoren
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4593-0
- 335 *Martin Schmid*: Kognitive Prozesssteuerung zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der Druckindustrie
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-4139-0
- 336 *Alexander Beltzki*: Rechnergestützte Minimierung des Verzugs laserstrahlgeschweißter Bauteile
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-4254-0
- 337 *Georg Albin Josef Götz*: Methode zur Steigerung der Formattflexibilität von Verpackungsmaschinen
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4332-5
- 338 *Thomas Knoche*: 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 Theodosiadi*: 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, 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