

Gestaltung hybrider Mensch-Maschine-Systeme/
Designing Hybrid Societies
Angelika C. Bullinger-Hoffmann Hrsg.

RESEARCH

Tim Schleicher

Kollaborierende Roboter anweisen

Gestaltungsempfehlungen für
ergonomische Mensch-Roboter-
Schnittstellen



Springer Vieweg

Gestaltung hybrider Mensch-Maschine-Systeme/Designing Hybrid Societies

Reihe herausgegeben von

Angelika C. Bullinger-Hoffmann, Chemnitz, Deutschland

Veränderungen in Technologien, Werten, Gesetzgebung und deren Zusammenspiel bestimmen hybride Mensch-Maschine-Systeme, d. h. die quasi selbstorganisierte Interaktion von Mensch und Technologie. In dieser arbeitswissenschaftlich verankerten Schriftenreihe werden zu den Hybrid Societies zahlreiche interdisziplinäre Aspekte adressiert, Designvorschläge basierend auf theoretischen und empirischen Erkenntnissen präsentiert und verwandte Konzepte diskutiert.

Changes in technology, values, regulation and their interplay drive hybrid societies, i.e., the quasi self-organized interaction between humans and technologies. This series grounded in human factors addresses many interdisciplinary aspects, presents socio-technical design suggestions based on theoretical and empirical findings and discusses related concepts.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/16273>

Tim Schleicher

Kollaborierende Roboter anweisen

Gestaltungsempfehlungen für
ergonomische Mensch-Roboter-
Schnittstellen

Mit einem Geleitwort von
Prof. Dr. Angelika C. Bullinger-Hoffmann

 Springer Vieweg

Tim Schleicher
Leipzig, Deutschland

Diese Arbeit wurde von der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur (Dr.-Ing.) genehmigt, u.d.T.: Instruktion kollaborierender Roboter – Gestaltungsempfehlungen für gebrauchstaugliche Mensch-Roboter-Schnittstellen

Tag der Einreichung: 05.04.2019

1. Gutachterin: Prof. Dr. habil. Angelika C. Bullinger-Hoffmann

2. Gutachterin: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. paed. Annette Hoppe

Tag der Verteidigung: 22.08.2019

ISSN 2661-8230

ISSN 2661-8249 (electronic)

Gestaltung hybrider Mensch-Maschine-Systeme/Designing Hybrid Societies

ISBN 978-3-658-29050-4

ISBN 978-3-658-29051-1 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-29051-1>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Geleitwort

Heutige Produktionsprozesse setzen zur Vereinbarung der scheinbar gegensätzlichen Zielsetzungen hoher Flexibilität und Produktivität bereits auf die Zusammenarbeit von Menschen und Robotern. Gerade bei variantenreichen Produktionssystemen ist die aktuell noch schwerfällige Konfiguration der Roboter ein Problem. Bei der schutzzaunlosen Zusammenarbeit von Mensch und Roboter, der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK), wird die Konfiguration der Roboter häufig durch Anweisen bzw. Instruktion vorgenommen.

Tim Schleicher hat sich den variantenreichen Produktionsprozess der Automobilbranche als Anwendungsfall gewählt, um mit seiner Dissertationsschrift Erkenntnisse zur Gestaltung gebrauchstauglicher Mensch-Roboter-Schnittstellen für die Instruktion kollaborierender Roboter, von ihm als „instruktive Mensch-Roboter-Kollaboration (iMRK)“ beschrieben, zu gewinnen. Er geht nach den Grundsätzen gestaltungsorientierter Forschung vor, um die iMRK eines kollaborierenden Polierroboters zu entwickeln, zu instanzieren und zu evaluieren.

Es gelingt ihm mit insgesamt neun Studien, die außergewöhnlich stark im Nutzungskontext des realen Produktionsumfelds verortet sind, Anforderungen zur Übergabe einer Aufgabe an einen Roboter sowohl für die Verortung einer Aufgabe im Arbeitsraum (Positionierung) sowie für die Spezifikation der Durchführung (Parametrierung) zu sammeln. Er untersucht sodann mit iterativ entwickelten Prototypen und an Beispielaufgaben wie dem Polieren von Punkt A (Positionierung) mit einer mittleren Polierintensität (Parametrierung) mehrere Interaktionsmodi (u.a. Mausbedienung, Gestensteuerung) für Positionierung und Parametrierung und kann zeigen, dass die Markerdetektion die besten Ergebnisse bringt.

Die in der Dissertation erarbeiteten Ergebnisse sind eine Referenz für die Praxis zur Gestaltung instruktiver Mensch-Roboter-Kollaborationen, vor allem, aber nicht nur, im Produktionsumfeld. Hier ist großes Potential für die Gestaltung anderer schutzzaunloser Mensch-Roboter-Kollaborationen geschaffen worden. Für die Wissenschaft sind im Feld der Mensch-Roboter-Kollaboration neue Forschungsfragen zu Parametrierung und Positionierung von instruktiven Mensch-Maschine-Schnittstellen sowohl in der Produktion als auch in anderen Zusammenhängen, wie z.B. der roboterassistierten Pflege, entstanden.

Ich wünsche Tim Schleicher daher zahlreiche interessierte Leserinnen und Leser aus Wirtschaft und Wissenschaft – und noch viele mehr ergonomisch gestaltete, instruktive Mensch-Roboter-Schnittstellen, die auf Grundlage seiner Arbeit gestaltet werden!

Chemnitz, im November 2019

Angelika C. Bullinger-Hoffmann

Widmung

Mein Herz schlägt schon immer für die industrielle Produktion. Die Möglichkeit, im Rahmen des Doktorandenprogramms „ProMotion“ der Bayerischen Motorenwerke AG (BMW AG) in diesem Bereich „einen Schritt vorwärts“ zu machen, hat mir über die letzten Jahre die notwendige Motivation geschenkt, die vorliegende Dissertation nach bestem Wissen und Gewissen anzufertigen. Auf diesem Weg haben mich viele Personen begleitet. Ihnen gebührt mein herzlichster Dank:

Ein besonderer Dank gilt meiner Doktormutter Frau **Prof. Dr. habil. Angelika C. Bullinger-Hoffmann**, die mich durch ihr Vertrauen und ihre zielgerichteten Hinweise motiviert hat, diese Arbeit trotz „extra Meile“ zufriedenstellend fertigzustellen. Ich freue mich auch ganz besonders, dass sie einen Industriepromovenden wie mich unter ihre Fittiche genommen und mir durch die regelmäßige Mitarbeit an ihrem Lehrstuhl schrittweise das notwendige methodische Verständnis über das Netzwerk mit ihren Mitarbeitern nähergebracht hat.

Ebenso danke ich Frau **apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. paed. Annette Hoppe** für die Übernahme des Zweitgutachtens. Die gemeinsame Diskussion hat mir das Gefühl gegeben, etwas „Gutes“ auf die Beine gestellt zu haben.

Ein ganz besonderer Dank gebührt Herrn **Dr.-Ing. Michael Wächter**. Die vielen, mehr als nur freundschaftlichen Gespräche haben mich in meiner Art reifen lassen. Ich bedanke mich für die Wertschätzung und Freude an der gemeinsamen „methodischen Tüftlei“, auch wenn ich viele gutgemeinte Ratschläge, etwas nicht zu tun, doch lieber erstmal auf „Hieb- und Stichfestigkeit“ prüfen musste. DANKE!

Einen besonderen Beitrag zu dieser Arbeit hat auch Herr **Erich Wald** geleistet. Ich bedanke mich mehr als nur herzlich für die Möglichkeit, als Doktorand unter seinen „Schützlingen“ gestartet zu sein. Seine ehrliche und herzliche Art, persönliche Ratschläge zu erteilen und fachliche Diskussionen zu führen, macht ihn zu einem meiner Vorbilder! Vielen Dank!

Ein mindestens gleichwertiger Dank gilt Herrn **Dr.-Ing. Alexander König** und Herrn **Dr.-Ing. Sebastian Keller**. Sie haben meinen suchenden Blicken nach spannenden Aufgabenstellungen und Forschungsfragen mit dem Angebot der Mitarbeit im Feld der Mensch-Roboter-Kollaboration entgegnet. Mit ihrer einzigartigen Freude an der Realisierung der wildesten Ideen haben sie nicht nur einen Doktoranden mit einem breiten Forschungsfeld beglückt, sondern mich auch mit ihrer Arbeitsweise begeistert. Sie bleiben für mich Vorbilder im Umgang mit komplexen Aufgabenstellungen und in der stets wertschätzenden Art und Weise der Zusammenarbeit mit Projektpartnern.

Auch Herrn **Toni Schulz** gilt an dieser Stelle ein besonderer Dank. Durch seine Initiative und Begeisterung gelang es, die technischen Voraussetzungen für die praktischen Erprobungen in Leipzig zu schaffen. Vielen Dank!

Ein weiterer besonderer Dank gilt Frau **Dr.-Ing. Manuela Krones**. Sie hat mich auch auf den letzten Metern immer wieder ermutigt und mit ihrem Scharfsinn der vorliegenden Arbeit den letzten Schliff verliehen. DANKE!

Ebenfalls besonders gedankt sei an dieser Stelle Herrn **Dr.-Ing. André Dettmann** und Herrn **Thomas Seeling**. Sie haben mich als Neu- und Fremdling stets in ihrer Runde willkommen geheißen. Ich schätze ihren Blick für das Wesentliche sowie die methodische Fitness, von der ich mir viel habe „abschneiden“ können.

Im Rahmen des Doktorandenumfelds bei BMW bedanke ich mich mehr als nur herzlich bei **Dr.-Ing. Stefan Werrlich**. Die vielen Diskussionen rund um die klassischen Spannungsfelder einer Industriepromotion haben mir das Gefühl gegeben, nicht alleine zu sein. Ich schätze die Leichtigkeit und den Witz, mit dem wir selbst die wildesten gedanklichen Knoten haben auflösen können.

Für meine unvergessliche Zeit im Leipziger Doktorandenkreis bedanke ich mich besonders bei Frau **Dr.-Ing. Rebekka Büttner**, Herrn **Dr.-Ing. Manfred Schmidt** und Herrn **Steffen Bindel**. Ich bin stolz, ein Teil dieses wunderbaren Teams zu sein!

Für die regelmäßigen fachlichen und herausfordernden Diskussionen danke ich auch den Organisatoren des Leipziger Doktorandenkolloquiums, Herrn **Dr.-Ing. Johannes Voigtsberger** und Herrn **Dr. Stefan Fenchel**. Ihr Enthusiasmus und die Freude am wissenschaftlichen Arbeiten haben uns neben vielen Fragestellungen auch stets Auftrieb gegeben.

Ein mehr als nur besonderer Dank gebührt meinem „Lieblingsstudenten“ Herrn **Lukas Füssel**. Mit seiner aufopferungsvollen Art hat er den Startschuss für die praktischen Umsetzungen gezündet. Die Zusammenarbeit mit ihm hat inmitten der Promotionszeit für einen Aufschwung gesorgt. Ich denke gerne und oft an diese Zeit zurück! Vielen, vielen Dank! Es war mir eine Ehre!

Ebenfalls ein riesengroßer Dank gebührt Herrn **Andy Roberti**. Mit seiner Ehrlichkeit und Offenheit für Neues ist Andy einer der Gründe, warum heute ein kollaborierender Polierroboter existiert. Sein Antrieb herauszufinden, ob ein Roboter genauso gut polieren kann wie er, hat mich von der ersten Minute an begeistert. Ich danke ihm für das entgegengebrachte Vertrauen, die vielen persönlichen und fachlichen Gespräche und die stets aufmunternden Worte! Dank ihm kann auch ich heute lackierte Oberflächen auf Hochglanz polieren!

Für die unendlich vielen Stunden an fachlichen Gesprächen, Tüfteleien an den Prototypen sowie die stets ehrlichen Meinungen über einen kollaborierenden Assistenzroboter möchte ich **allen Mitarbeitern des Lack-Finish-Bereichs der Kunststoffaußenhautfertigung im BMW Werk Leipzig** danken. Ihr Interesse

für dieses Projekt haben mir die möglichen Rahmenbedingungen geschaffen, empirische Studien durchzuführen. An dieser Stelle gilt ein besonderer Dank den Vorarbeitern, welche mich stets bei meinen Evaluationen mit ihren Gruppen unterstützt haben. Ohne ihren besonderen Einsatz wären die vielen umfangreichen Befragungen und Erprobungen nie zu Stande gekommen! Vielen, vielen Dank!

Ebenfalls einen mehr als nur großen Dank verdient **Prof. Dr. Sabine Brunner**. Die herzlichen und gleichzeitig gnadenlos ehrlichen Ratschläge haben mir gegen Ende meiner Promotionszeit nochmal einen besonderen Aufwind verpasst und vor allem „meine Handschrift“ hervorgehoben. VIELEN LIEBEN DANK!

Ein großer Dank gilt auch meinen Eltern **Susanna und Franz Schleicher** sowie Großeltern **Eva und Peter Winkelbauer**. Ich danke ihnen für die mehr als nur liebevolle Unterstützung auf meinem Weg und in allen nur denkbaren Lebenslagen! Ohne diese wäre ich heute nicht da, wo ich heute bin!

Mein größter Dank gilt meiner geliebten Frau **Elisa Schleicher**. Ich bin mit den Worten gestartet: „*Du würdest nicht merken, dass ich eine Dissertation schreibe.*“ Es kam alles anders! Ich danke ihr für das Vertrauen, die bedingungslose Liebe und Unterstützung sowie für die richtigen Worte im richtigen Moment! Ich freue mich auf alles das, was noch kommt: GEMEINSAM in physischer UND geistiger Anwesenheit!

Leipzig, im November 2019

Tim Schleicher

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Überblick.....	1
1.1	Problemstellung und Motivation.....	1
1.2	Zielsetzung.....	4
1.3	Forschungsmethodischer Rahmen	5
1.4	Vorgehen und Aufbau der Arbeit.....	6
2	Stand der Wissenschaft und Technik.....	9
2.1	Zielsetzung und Aufbau des Kapitels	9
2.2	Relevante Begrifflichkeiten und technische Rahmenbedingungen	9
2.2.1	Mensch-Maschine-Interaktion	10
2.2.2	Mensch-Roboter-Interaktion.....	11
2.2.3	Mensch-Roboter-Koexistenz/Kooperation/Kollaboration	12
2.3	Strukturierter Literatur-Review.....	17
2.3.1	Erhebung des Standes der Wissenschaft.....	17
2.3.2	Analyse des Standes der Wissenschaft	25
2.3.3	Ableitung der Forschungsagenda.....	29
2.4	Fazit aus dem Stand der Wissenschaft und Technik	37
3	Methodische Wissensbasis zur Gestaltung von MRS	39
3.1	Zielsetzung und Aufbau des Kapitels	39
3.2	Gestaltungsanforderungen an MRS in einer iMRK	40
3.2.1	Grundlegende Anforderungen an MRS	40
3.2.2	Funktionale Anforderungen an MRS.....	42
3.3	Methoden zur Analyse anwendungsspezifischer Anforderungen	50
3.4	Grundlegende Gestaltung von MRS in einer iMRK	55
3.5	Methoden zur Evaluation von MRS.....	62
3.6	Fazit aus der methodischen Wissensbasis.....	66
4	Forschungsdesign zur Erarbeitung von Gestaltungswissen.....	69
5	Anforderungen an MRS in einer iMRK	77
5.1	Zielsetzung und Aufbau des Kapitels	77
5.2	Analyse des Nutzungskontextes und der Nutzeranforderungen.....	78
5.2.1	Organisatorische Anforderungen an eine iMRK	78
5.2.2	Anwenderspezifische Anforderungen an MRS	85
5.2.3	Nutzungsszenario zur empirischen MRS-Erprobung	100
5.3	Fazit aus den anwendungsspezifischen Anforderungen.....	104

6	Iterative Gestaltung und Evaluation von MRS	109
6.1	Zielsetzung und Aufbau des Kapitels	109
6.2	MRS zur Positionierung.....	110
6.2.1	Prototypische Gestaltung	110
6.2.2	Funktionaler Test.....	113
6.2.3	Nutzertest.....	122
6.2.4	Expertenbasierte Analyse der Studien	133
6.2.5	Fazit der Studien zur Gestaltung von MRS	135
6.3	MRS zur Positionierung und Parametrierung	139
6.3.1	Prototypische Gestaltung	139
6.3.2	Funktionaler Test.....	142
6.3.3	Nutzertest.....	155
6.3.4	Expertenbasierte Analyse der Studien	169
6.3.5	Fazit der Studien zur Gestaltung von MRS	171
7	Schlussbetrachtung	175
7.1	Zusammenfassung der Forschung.....	175
7.1.1	Beiträge für die Wissenschaft.....	176
7.1.2	Beiträge für die Praxis	177
7.2	Limitationen.....	179
7.3	Ausblick.....	180
7.3.1	Erweiterte Anwendungsmöglichkeiten in der Praxis.....	180
7.3.2	Weiterer Forschungsbedarf.....	181
	Literaturverzeichnis.....	183
	Anhang	203

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Gestaltung von ergonomischen MRS zur Nutzung in einer iMRK als Fokus der vorliegenden Arbeit	3
Abbildung 2:	Umsetzung der gestaltungsorientierten Forschung in der vorliegenden Arbeit	6
Abbildung 3:	Aufbau und schematischer Ablauf der vorliegenden Arbeit	8
Abbildung 4:	Mensch-Maschine-System	10
Abbildung 5:	Abgrenzung der Wissensbasis und des Forschungsfeldes	12
Abbildung 6:	Mensch-Roboter-Koexistenz/Kooperation/Kollaboration	13
Abbildung 7:	Betriebsarten einer Mensch-Roboter-Kollaboration	14
Abbildung 8:	Beispiele für grundsätzlich MRK-fähige Leichtbauroboter	16
Abbildung 9:	Literatur-Review zur Aufarbeitung der Wissensbasis	18
Abbildung 10:	Auswahl und Kategorisierung vor der Volltextbeurteilung	21
Abbildung 11:	Finalisierung der Datengrundlage und Ergebniseinordnung	23
Abbildung 12:	Aufbereitung der Wissensbasis	24
Abbildung 13:	Übergangs- und partnerschaftliche Kollaboration	27
Abbildung 14:	Einteilung der Roboterprogrammierung zur Eingrenzung des Forschungsfeldes auf instruktive Systeme	28
Abbildung 15:	Verortung der forschungsleitenden Fragen in der Arbeit	37
Abbildung 16:	Informationsgehalt zur Nutzung eines instruktiven Mensch-Roboter-Systems in Abhängigkeit der Flexibilität	43
Abbildung 17:	Prinzip der aufgabenbasierten Programmierung	44
Abbildung 18:	Informationseingabekomplexität einer Positionierung	47
Abbildung 19:	Informationseingabekomplexität einer Parametrierung	48
Abbildung 20:	Einfluss anwendungsspezifischer Anforderungen auf die Auswahl von MRS-Technologien	50
Abbildung 21:	Einflüsse verschiedener Anforderungskategorien auf die Gestaltung einer MRS für den Einsatz in einer iMRK	55
Abbildung 22:	Gestaltungsprozess gebrauchstauglicher MRS für iMRK	61
Abbildung 23:	Anwenderbasierte Evaluation interaktiver Systeme durch SUXES	71
Abbildung 24:	Gestaltungsorientiertes Vorgehen zur Entwicklung von MRS für eine iMRK	72

Abbildung 25:	iMRK-Potential im Lack-Finish-Prozess der Komponentenfertigung von Automobilaußenhautbauteilen	80
Abbildung 26:	Ablauf der teilnehmenden Beobachtung im Lack-Finish	81
Abbildung 27:	Arbeitsplätze der teilnehmenden Beobachtung.....	82
Abbildung 28:	Schematischer Ablauf der qualitativen Analyse der transkribierten Interviews und Mitschriften.....	91
Abbildung 29:	Nutzerpräferenzen zur MRS-Gestaltung einer iMRK	96
Abbildung 30:	Prozessualer Ablauf des Polierprozesses als iMRK im Vergleich zum ursprünglichen Finish-Prozess	101
Abbildung 31:	Schematische Darstellung des Nutzungsszenarios eines kollaborierenden Polierroboters.....	102
Abbildung 32:	Schematische Darstellung der Positionierung über die ausgewählten MRS	111
Abbildung 33:	Schematische Darstellung der selbstentwickelten grafischen Benutzeroberfläche	112
Abbildung 34:	Versuchsaufbau des funktionalen Tests zur Positionierung.....	115
Abbildung 35:	Versuchsablauf des funktionalen Tests zur Positionierung ..	116
Abbildung 36:	Bedienzeiten des funktionalen Tests zur Positionierung	118
Abbildung 37:	SUS des funktionalen Tests zur Positionierung	120
Abbildung 38:	Versuchsaufbau des Nutzertests zur Positionierung	124
Abbildung 39:	Bedienzeiten des Nutzertests zur Positionierung	125
Abbildung 40:	SUS des Nutzertests zur Positionierung	127
Abbildung 41:	Post-SUS-Bewertungen des Nutzertests zur Positionierung zur Reihenfolgeeffektanalyse	128
Abbildung 42:	NASA-TLX des Nutzertests zur Positionierung - 1.....	129
Abbildung 43:	NASA-TLX des Nutzertests zur Positionierung - 2.....	129
Abbildung 44:	Schematische Darstellung der Positionierung und Parametrierung.....	141
Abbildung 45:	Versuchsaufbau des funktionalen Tests zur Positionierung und Parametrierung	144
Abbildung 46:	Bedienzeiten des funktionalen Tests zur Positionierung und Parametrierung (nur Positionierung).....	146
Abbildung 47:	Bedienzeiten des funktionalen Tests zur Positionierung und Parametrierung.....	148
Abbildung 48:	SUS des funktionalen Tests zur Positionierung und Parametrierung.....	150
Abbildung 49:	Post-SUS-Bewertungen des funktionalen Tests zur Positionierung und Parametrierung zur Reihenfolgeeffektanalyse	151

Abbildung 50:	UEQ des funktionalen Tests zur Positionierung und Parametrierung.....	152
Abbildung 51:	Versuchsaufbau des Nutzertests zur Positionierung und Parametrierung.....	157
Abbildung 52:	Bedienzeiten des Nutzertests zur Positionierung und Parametrierung (nur Positionierung)	159
Abbildung 53:	Bedienzeiten des Nutzertests zur Positionierung und Parametrierung.....	161
Abbildung 54:	SUS des Nutzertests zur Positionierung und Parametrierung.....	163
Abbildung 55:	Post-SUS-Bewertungen des Nutzertests zur Positionierung und Parametrierung zur Reihenfolgeeffektanalyse	164
Abbildung 56:	UEQ-Bewertungen des Nutzertests zur Positionierung und Parametrierung.....	165
Abbildung 57:	Prozess der CE-Zertifizierung einer Maschine	203
Abbildung 58:	Gefahrenbereich eines Industrierobotersystems	204
Abbildung 59:	Verwendete Erhebung der subjektiven Anforderungen mittels des NASA Task Load Index	211
Abbildung 60:	Verwendete Erhebung der Gebrauchstauglichkeit mittels des System Usability Scale	213
Abbildung 61:	Einordnung der System Usability Scale Punkte	214
Abbildung 62:	Verwendete Erhebung des Bedienerlebnisses mittels UEQ.....	216
Abbildung 63:	Reale Darstellung der Positionierung über die ausgewählten MRS	222
Abbildung 64:	Reale Darstellung der Positionierung und Parametrierung über die ausgewählten MRS	243

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Suchterme als Eingangsgrößen des Literatur-Reviews.....	19
Tabelle 2:	Datengrundlage D1 als Ergebnisse der kombinierten Suche	20
Tabelle 3:	Verlauf und Ergebnisse der Auswahl und Kategorisierung....	22
Tabelle 4:	Finale Datengrundlage - D1A inkl. Cross-Checking	24
Tabelle 5:	Ausprägungen der Mensch-Roboter-Interaktion und Einordnung der vorliegenden Arbeit	25
Tabelle 6:	Ergebnisse des Literatur-Reviews zur Ableitung des Forschungsbedarfs der vorliegenden Arbeit	29
Tabelle 7:	Anforderungen an Forschungsarbeiten zur Gestaltung gebrauchstauglicher MRS für die Industrie	30
Tabelle 8:	Einteilung vorhandener Forschungsarbeiten zur Erarbeitung von Gestaltungswissen für MRS in einer iMRK.....	31
Tabelle 9:	Gegenüberstellung des Standes der Wissenschaft zu den extrahierten Anforderungen	31
Tabelle 10:	Erkenntnisse aus recherchierten Studien zur Erprobung und Evaluation von MRS für eine iMRK	33
Tabelle 11:	Allgemeine Gestaltungsanforderungen an MRS in instruktiven Mensch-Roboter-Systemen.....	40
Tabelle 12:	Positionierung zur Verortung von Aufgaben	45
Tabelle 13:	Parametrierung von Aufgaben	47
Tabelle 14:	Beispiele von Informationseingaben zur Übergabe einer Aufgabe	48
Tabelle 15:	Ziele der Nutzungskontext- und Anforderungsanalyse	51
Tabelle 16:	Methoden zur Nutzungskontext- und Nutzeranforderungsanalyse	51
Tabelle 17:	Gegenüberstellung der Methoden zur Analyse des Nutzungskontextes und der Nutzeranforderungen.....	53
Tabelle 18:	Grundlegende Gestaltungsmöglichkeiten einer MRS.....	56
Tabelle 19:	Vor- und Nachteile verschiedener MRS-Technologien zur Eingabe von Informationen	58
Tabelle 20:	MRS-Baukasten - Funktionale Eignung von MRS für eine iMRK	60
Tabelle 21:	Methoden zur Evaluation von MRS	63
Tabelle 22:	Kategorisierung und Eignung von Evaluations- Fragebögen	64

Tabelle 23:	Kategorisierung und Eignung von Methoden zur Evaluation der Gebrauchstauglichkeit von MRS für den Einsatz in einer iMRK	65
Tabelle 24:	Wissensaufarbeitung und -erweiterung der methodischen Grundlagen zur Gestaltung einer MRS für iMRK	67
Tabelle 25:	Umsetzung gestaltungsorientierter Forschung	69
Tabelle 26:	Forschungsdesign der vorliegenden Arbeit	74
Tabelle 27:	Anforderungen an die Gestaltung von Studien innerhalb des Forschungsfeldes der MRI	75
Tabelle 28:	Evaluationskriterien zur Erreichung des Gestaltungsziels	76
Tabelle 29:	Rahmen zur Erhebung organisatorischer Anforderungen	78
Tabelle 30:	Ergebnis der Dokumentenanalyse - Eingangsgrößen für weitere Analysen durch teilnehmende Beobachtung	80
Tabelle 31:	Gebildete Kategorien aus den Informationen der teilnehmenden Beobachtung	83
Tabelle 32:	iMRK-Potentiale im Lack-Finish der Komponentenfertigung von Außenhautbauteilen	85
Tabelle 33:	Rahmen zur Erhebung anwenderspezifischer Anforderungen	86
Tabelle 34:	Interview-Leitfaden zur Erfassung des Nutzungskontextes	87
Tabelle 35:	Interviewleitfaden zur Erfassung der Nutzeranforderungen	88
Tabelle 36:	Likert-Skala-Fragebogen zur Abschätzung von Nutzerpräferenzen in Bezug auf Gestaltungslösungen	89
Tabelle 37:	Interviewleitfaden zur Erfassung demografischer Daten und Einstellung ggü. einer Roboterzusammenarbeit	89
Tabelle 38:	Übersicht über die abgehaltenen Interviews	90
Tabelle 39:	Beispiele zur Anforderungen an die Umsetzung einer iMRK	92
Tabelle 40:	Beispiele zu Anforderungen an die Gestaltung einer MRS für den Einsatz in einer iMRK	92
Tabelle 41:	Bewertung der Relevanz der Aussagen bzw. daraus gebildeter Anforderungskategorien	93
Tabelle 42:	Anforderungen an die Gestaltung einer iMRK in variantenreichen Produktionsprozessen	94
Tabelle 43:	Funktionale Anforderungen an eine MRS für die Gestaltung einer iMRK in Form eines Polierroboters	95
Tabelle 44:	Erhobene Anforderungen auf Basis von Nutzerpräferenzen zur Gestaltung der MRS eines Polierroboters	97

Tabelle 45:	Anforderungen an die Gestaltung einer MRS für die Instruktion eines kollaborierenden Roboters	99
Tabelle 46:	Rahmen zur expertenbasierten Definition eines Nutzungsszenarios eines Polierroboters	100
Tabelle 47:	Gestaltung der MRS eines Polierroboters als Grundlage der empirischen Evaluation	103
Tabelle 48:	Zusammenfassung der Anforderungen an eine MRS zur Überprüfung der Erreichung des Gestaltungsziels.....	106
Tabelle 49:	Detaillierte Beschreibung der prototypisch gestalteten MRS zur Positionierung	110
Tabelle 50:	Rahmen zur Erhebung funktionaler Schwächen der MRS auf der Basis eines Laborexperiments	113
Tabelle 51:	Überführung realer Gegebenheiten in einen funktionalen Test der Positionierung unter Laborbedingungen	114
Tabelle 52:	Versuchsdesign anhand Latin Square des funktionalen Tests zur Positionierung	116
Tabelle 53:	Auswahl statistischer Tests auf Basis der Normalverteilung von Daten	117
Tabelle 54:	Bedienzeiten des funktionalen Tests zur Positionierung	118
Tabelle 55:	Interpretation der Effektstärke nach Cohen auf Basis eines Dunn-Bonferroni-Tests.....	119
Tabelle 56:	Bedienfehler des funktionalen Tests der Positionierung.....	119
Tabelle 57:	SUS-Punktebewertungen des funktionalen Tests zur Positionierung.....	120
Tabelle 58:	Lautes Denken des funktionalen Tests zur Positionierung ...	121
Tabelle 59:	Rahmen zur Erhebung der Gebrauchstauglichkeit der einzelnen MRS zur Positionierung auf der Basis eines Nutzertests	123
Tabelle 60:	Überführung realer Gegebenheiten in einen realitätsnahen Nutzertest der Positionierung	123
Tabelle 61:	Bedienzeiten des Nutzertests zur Positionierung	125
Tabelle 62:	Bedienfehler des Nutzertests der Positionierung	126
Tabelle 63:	SUS-Punkte des Nutzertests zur Positionierung	127
Tabelle 64:	NASA-TLX-Punkte des Nutzertests zur Positionierung	129
Tabelle 65:	Lautes Denken des Nutzertests zur Positionierung.....	131
Tabelle 66:	Rahmen der expertenbasierten Analyse der Studien zur Positionierung.....	133
Tabelle 67:	Expertenbasierte Analyse der Studien zur Positionierung - Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse.....	134
Tabelle 68:	Bewertung der Erfüllung erhobener Anforderungen zur Überprüfung der Erreichung des Gestaltungsziels.....	136

Tabelle 69:	Empfehlungen zur Gestaltung von gebrauchstauglichen MRS für die Positionierung in einer iMRK	137
Tabelle 70:	Detaillierte Beschreibung der prototypisch gestalteten MRS zur Positionierung und Parametrierung	139
Tabelle 71:	Rahmen zur Erhebung funktionaler Schwächen der einzelnen MRS auf der Basis eines Laborexperiments	142
Tabelle 72:	Überführung realer Gegebenheiten in einen funktionalen Test unter Laborbedingungen	143
Tabelle 73:	Versuchsdesign anhand Latin Square des funktionalen Tests zur Positionierung und Parametrierung	144
Tabelle 74:	Auswahl statistischer Tests zur Analyse von Weiterentwicklungen auf Basis der Normalverteilung von Daten.....	145
Tabelle 75:	Bedienzeiten des funktionalen Tests zur Positionierung und Parametrierung (nur Positionierung).....	146
Tabelle 76:	Vergleich der Weiterentwicklung in Bezug auf die Positionierung im Rahmen des funktionalen Tests	147
Tabelle 77:	Bedienzeiten des funktionalen Tests zur Positionierung und Parametrierung.....	148
Tabelle 78:	Bedienfehler des funktionalen Tests der Positionierung und Parametrierung.....	149
Tabelle 79:	SUS-Bewertungen des funktionalen Tests zur Positionierung und Parametrierung	150
Tabelle 80:	UEQ-Bewertungen des funktionalen Tests zur Positionierung und Parametrierung	152
Tabelle 81:	Modalitätenmix des funktionalen Tests zur Positionierung und Parametrierung - Anzahl an Nennungen.....	153
Tabelle 82:	Lautes Denken des funktionalen Tests zur Positionierung und Parametrierung.....	154
Tabelle 83:	Aktionsbeschreibung der Links- und Rechtsklicks.....	155
Tabelle 84:	Rahmen zur Erhebung der Gebrauchstauglichkeit der einzelnen MRS zur Positionierung und Parametrierung auf der Basis eines Nutzertests	156
Tabelle 85:	Überführung realer Gegebenheiten in einen realitätsnahen Nutzertest der Positionierung und Parametrierung	157
Tabelle 86:	Bedienzeiten des Nutzertests der Positionierung und Parametrierung (nur Positionierung)	159
Tabelle 87:	Vergleich der Weiterentwicklung in Bezug auf die Positionierung im Rahmen des Nutzertests	160

Tabelle 88:	Bedienzeiten des Nutzertests zur Positionierung und Parametrierung.....	161
Tabelle 89:	Bedienfehler des Nutzertests zur Positionierung und Parametrierung.....	162
Tabelle 90:	SUS-Bewertungen des Nutzertests zur Positionierung und Parametrierung.....	163
Tabelle 91:	UEQ-Bewertungen des Nutzertests zur Positionierung und Parametrierung.....	165
Tabelle 92:	Modalitätenmix des Nutzertests zur Positionierung und Parametrierung.....	166
Tabelle 93:	Periaktionales lautes Denken des Nutzertests zur Positionierung und Parametrierung	167
Tabelle 94:	Rahmen der expertenbasierten Analyse der Studien zur Parametrierung.....	169
Tabelle 95:	Meinungsstudie Parametrierung - Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse.....	170
Tabelle 96:	Bewertung der Erfüllung erhobener Anforderungen zur Überprüfung der Erreichung des Gestaltungsziels.....	172
Tabelle 97:	Erweiterte Empfehlungen zur Gestaltung von MRS für die Positionierung und Parametrierung in einer iMRK	173
Tabelle 98:	Ergebnisse der Arbeit - Wissenschaft.....	176
Tabelle 99:	Ergebnisse der Arbeit - Praxis	178
Tabelle 100:	Mögliche Weiterentwicklungen auf Basis gewonnener Erkenntnisse.....	181
Tabelle 101:	Übersicht zur Auswahl wissenschaftlicher Datenbanken	204
Tabelle 102:	Zusammenfassung der Datengrundlagen 1/2	205
Tabelle 103:	Zusammenfassung der Datengrundlagen 2/2	206
Tabelle 104:	Funktionaler Test zur Positionierung - Normalverteilungstest Bedienzeiten	217
Tabelle 105:	Funktionaler Test der Positionierung – Angepasste asymptotische Signifikanzen des Dunn-Bonferroni-Tests der Bedienzeiten	218
Tabelle 106:	Funktionaler Test der Positionierung – z-Werte zur Berechnung der Effektstärke nach Cohen der Unterschiede der Bedienzeiten der Positionierung zu einem Ziel	218
Tabelle 107:	Funktionaler Test der Positionierung – z-Werte zur Berechnung der Effektstärke nach Cohen der Unterschiede der Bedienzeiten der Positionierung zu fünf Zielen.....	219

Tabelle 108:	Funktionaler Test zur Positionierung - Normalverteilungstest Bedienfehler	219
Tabelle 109:	Funktionaler Test zur Positionierung - Normalverteilungstest System Usability Scale Punktebewertung	220
Tabelle 110:	Funktionaler Test zur Positionierung - Normalverteilungstest System Usability Scale Adjektivskala	220
Tabelle 111:	Funktionaler Test zur Positionierung – Angepasste asymptotische Signifikanzen des Dunn-Bonferroni-Tests der SUS-Punkte	221
Tabelle 112:	Funktionaler Test der Positionierung – z-Werte zur Berechnung der Effektstärke nach Cohen der Unterschiede der SUS-Punktebewertungen	221
Tabelle 113:	Nutzertest zur Positionierung - Normalverteilungstest Bedienzeiten	223
Tabelle 114:	Nutzertest zur Positionierung – Angepasste asymptotische Signifikanzen des Dunn-Bonferroni-Tests der Bedienzeiten	223
Tabelle 115:	Nutzertest zur Positionierung - z-Werte zur Berechnung der Effektstärke nach Cohen der Unterschiede der Bedienzeiten der Positionierung zu einem Ziel	224
Tabelle 116:	Nutzertest zur Positionierung – z-Werte zur Berechnung der Effektstärke nach Cohen der Unterschiede der Bedienzeiten der Positionierung zu fünf Zielen.....	224
Tabelle 117:	Nutzertest zur Positionierung - Normalverteilungstest Bedienfehler.....	225
Tabelle 118:	Nutzertest zur Positionierung – Angepasste asymptotische Signifikanzen des Dunn-Bonferroni-Tests der Bedienfehler	225
Tabelle 119:	Nutzertest zur Positionierung - z-Werte zur Berechnung der Effektstärke nach Cohen der Unterschiede der Bedienfehler.....	226
Tabelle 120:	Nutzertest zur Positionierung - Normalverteilungstest System Usability Scale Punktebewertung	226
Tabelle 121:	Nutzertest zur Positionierung – Angepasste asymptotische Signifikanzen des Post-Hoc Dunn- Bonferroni-Tests der SUS-Punkte	227
Tabelle 122:	Nutzertest zur Positionierung - z-Werte zur Berechnung der Effektstärke nach Cohen der Unterschiede der SUS- Punktebewertungen	227

Tabelle 123:	Nutzertest zur Positionierung - Normalverteilungstest NASA-TLX	228
Tabelle 124:	Nutzertest zur Positionierung – Angepasste asymptotische Signifikanzen der NASA-TLX-Kategorien ..	229
Tabelle 125:	Nutzertest zur Positionierung - z-Werte zur Berechnung der Effektstärke nach Cohen der Unterschiede der NASA-TLX-Bewertungen.....	230
Tabelle 126:	Funktionaler Test zur Parametrierung - Normalverteilungstest Bedienzeiten zur reinen Positionierung.....	232
Tabelle 127:	Funktionaler Test der Parametrierung - Mann-Whitney-U Test zum Vergleich der Bedienzeiten zur Positionierung der ursprünglichen und weiterentwickelten MRS.....	233
Tabelle 128:	Funktionaler Test der Parametrierung – Angepasste asymptotische Signifikanzen des Dunn-Bonferroni-Tests der Bedienzeiten zur Positionierung	233
Tabelle 129:	Funktionaler Test der Parametrierung - z-Werte zur Berechnung der Effektstärke nach Cohen der Unterschiede der Bedienzeiten zur reinen Positionierung zu einem Ziel	234
Tabelle 130:	Funktionaler Test der Parametrierung - z-Werte zur Berechnung der Effektstärke nach Cohen der Unterschiede der Bedienzeiten zur reinen Positionierung zu fünf Zielen.....	234
Tabelle 131:	Funktionaler Test der Parametrierung - Normalverteilungstest Bedienzeiten zur Positionierung und Parametrierung.....	235
Tabelle 132:	Funktionaler Test der Parametrierung – Angepasste asymptotische Signifikanzen des Dunn-Bonferroni-Tests der Bedienzeiten zur Positionierung und Parametrierung.....	235
Tabelle 133:	Funktionaler Test der Parametrierung - z-Werte zur Berechnung der Effektstärke nach Cohen der Unterschiede der Bedienzeiten zur Positionierung und Parametrierung zu einem Ziel.....	236
Tabelle 134:	Funktionaler Test der Parametrierung - z-Werte zur Berechnung der Effektstärke nach Cohen der Unterschiede der Bedienzeiten zur Positionierung und Parametrierung zu fünf Zielen	236
Tabelle 135:	Funktionaler Test der Parametrierung - Normalverteilungstest Bedienfehler	237

Tabelle 136:	Funktionaler Test der Parametrierung – Angepasste asymptotische Signifikanzen des Dunn-Bonferroni-Tests der Bedienfehler	237
Tabelle 137:	Funktionaler Test der Parametrierung - z-Werte zur Berechnung der Effektstärke nach Cohen der Unterschiede der Bedienfehler zur Positionierung und Parametrierung.....	238
Tabelle 138:	Funktionaler Test der Parametrierung - Normalverteilungstest System Usability Scale Punktebewertung	238
Tabelle 139:	Funktionaler Test der Parametrierung – Angepasste asymptotische Signifikanzen des Dunn-Bonferroni-Tests der SUS-Punkte	239
Tabelle 140:	Funktionaler Test der Parametrierung - z-Werte zur Berechnung der Effektstärke nach Cohen der Unterschiede der SUS-Punktebewertungen zur Positionierung und Parametrierung	239
Tabelle 141:	Funktionaler Test der Parametrierung - Normalverteilungstest UEQ.....	240
Tabelle 142:	Funktionaler Test der Parametrierung – Angepasste asymptotische Signifikanzen des Dunn-Bonferroni-Tests der UEQ-Bewertungen	241
Tabelle 143:	Funktionaler Test der Parametrierung - z-Werte zur Berechnung der Effektstärke nach Cohen - Unterschiede der UEQ-Bewertungen zur Positionierung und Parametrierung.....	242
Tabelle 144:	Nutzertest der Parametrierung - Normalverteilungstest Bedienzeiten zur reinen Positionierung	243
Tabelle 145:	Nutzertest der Parametrierung - Mann-Whitney-U Test zum Vergleich der Bedienzeiten zur Positionierung der ursprünglichen und weiterentwickelten MRS.....	244
Tabelle 146:	Nutzertest der Parametrierung – Angepasste asymptotische Signifikanzen des Dunn-Bonferroni-Tests der Bedienzeiten zur Positionierung	245
Tabelle 147:	Nutzertest der Parametrierung - z-Werte zur Berechnung der Effektstärke nach Cohen der Unterschiede der Bedienzeiten zur reinen Positionierung zu einem Ziel	245
Tabelle 148:	Nutzertest der Parametrierung - z-Werte zur Berechnung der Effektstärke nach Cohen der Unterschiede der Bedienzeiten zur reinen Positionierung zu fünf Zielen.....	246

Tabelle 149:	Nutzertest der Parametrierung - Normalverteilungstest Bedienzeiten zur Positionierung und Parametrierung	246
Tabelle 150:	Nutzertest der Parametrierung – Angepasste asymptotische Signifikanzen des Dunn-Bonferroni-Tests der Bedienzeiten zur Positionierung und Parametrierung	247
Tabelle 151:	Nutzertest der Parametrierung - Normalverteilungstest Bedienfehler.....	247
Tabelle 152:	Nutzertest der Parametrierung - Normalverteilungstest System Usability Scale Punktebewertung	248
Tabelle 153:	Nutzertest der Parametrierung - Normalverteilungstest UEQ.....	249

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
ANOVA	Analysis of Variance (deutsch: Varianzanalyse)
bspw.	beispielsweise
ca.	circa
CAD	Computer Aided Design
DLL	Decklacklinie
DMS	Dokumentenmanagementsystem
DSR	Design Science Research (deutsch: gestaltungsorientierte Forschung)
GS	Gestensteuerung
ggü.	gegenüber
HF	Handführung
IE	Industrial Engineering
i.d.R.	in der Regel
iMRK	instruktive Mensch-Roboter-Kollaboration
MB	Mausbedienung
MD	Markerdetektion
M	Mittelwert (engl.: mean)
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle (engl.: human-machine interface [HMI])
MRI	Mensch-Roboter-Interaktion
MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
MRS	Mensch-Roboter-Schnittstelle
OEM	Original Equipment Manufacturer (deutsch: Erstausrüster)
o.g.	oben genannt
PMA	Produktionsmitarbeiter
PSP	Produktionsspezialist
SD	Standardabweichung (engl.: standard deviation)
SUS	System Usability Scale
TB	Touchbedienung
TCP	Tool Center Point (deutsch: Werkzeugmittelpunkt)
UE	Usability-Experte(n)
UEQ	User Experience Questionnaire
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

Kurzfassung

Die zunehmende Variantenvielfalt von Produkten führt zu einer Erhöhung der Komplexität in den jeweiligen Produktionsprozessen. Produktionssysteme stehen damit vor der Herausforderung, hohe Flexibilität mit hoher Produktivität vereinen zu müssen. Eine Möglichkeit, dies zu realisieren, bietet die Verbindung menschlicher und maschineller Arbeit an einem hybriden Arbeitsplatz in Form einer **Mensch-Roboter-Kollaboration**. Die Möglichkeit der direkten Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter bildet demnach eine entscheidende Grundlage für die Gestaltung zukünftiger Produktionssysteme.

Im Zuge der geforderten Flexibilität bestehen bereits heute Ansätze zur einfachen und schnellen Konfiguration von Roboteranlagen in der Produktion. Neue Roboterfähigkeiten können durch intuitive Programmiermethoden, z.B. „Programmierung durch Vorzeigen“, ohne Programmierkenntnisse erstellt, getestet und angepasst werden. Diese Art der Roboterprogrammierung ermöglicht die Anpassung von Roboteranlagen an die Produktion einer neuen Charge und ist damit besonders für variantenreiche Produktionssysteme geeignet. Verändern sich die durchzuführenden Roboterarbeiten jedoch nicht von Charge zu Charge, sondern von Stück zu Stück, so ist eine weitere Vereinfachung zur wirtschaftlichen Nutzung von Robotern notwendig. Die „Programmierung durch Anweisen“ nutzt in diesem Fall eine einfache Instruktion. Diese erfolgt durch die Verortung von Roboterarbeiten im Arbeitsraum und durch die zusätzliche Spezifikation der Aufgabendurchführung. Vor diesem Hintergrund bedarf es der Gestaltung und vor allem der Erprobung von **Mensch-Roboter-Schnittstellen zur Instruktion kollaborierender Roboter** im industriellen Kontext. In diesem Zuge definiert die vorliegende Arbeit die direkte Zusammenarbeit durch Anweisungen des Menschen als eine „instruktive Mensch-Roboter-Kollaboration“ (iMRK).

Aufbauend auf einer methodischen Wissensbasis wird die strukturierte Auswahl an potentiell gebrauchstauglichen MRS-Technologien anwendungsspezifisch abgeleitet. Vor dem Hintergrund, Gestaltungswissen für deren Einsatz in einer variantenreichen Serienproduktion zu generieren, dient ein exemplarischer Anwendungsfall im Lack-Finish der Automobilbranche. Die Erhebung organisatorischer sowie anwenderspezifischer Anforderungen an die Gestaltung ermöglicht die Überprüfung der Anwendbarkeit bereits existierender Gestaltungsempfehlungen. Darüber hinaus können diese durch industriespezifische Anforderungen erweitert werden. Im Rahmen eines gestaltungsorientierten Vorgehens unterstützen iterative, empirische Erprobungen und Evaluationen bei der validen **Erweiterung der Wissensbasis zur Gestaltung ergonomischer bzw. gebrauchstauglicher Mensch-Roboter-Schnittstellen** für die Instruktion eines

kollaborierenden Roboters im industriellen Kontext. Es werden konkrete Gestaltungsempfehlungen abgeleitet.

Neben der Ableitung konkreter Gestaltungsempfehlungen für industrielle, instruktive Mensch-Roboter-Systeme wird exemplarisch die gebrauchstaugliche Bedienung eines **instruktiven, kollaborierenden Polierroboters** gestaltet. Die auf Basis des praktischen Anwendungsfalls generierten Gestaltungsempfehlungen liefern eine Grundlage für weitere Systeme und geben Anstöße für weitere technologische Entwicklungen.

Stichwörter: Mensch-Roboter-Interaktion, Mensch-Roboter-Kollaboration, Instruktion, Mensch-Roboter-Schnittstelle, Gebrauchstauglichkeit, variantenreiche Serienproduktion



1 Einführung und Überblick

„Eine Maschine kann die Arbeit von 50 gewöhnlichen Menschen leisten, aber sie kann nicht einen einzigen außergewöhnlichen ersetzen.“

Elbert Green Hubbard, Schriftsteller und Philosoph

1.1 Problemstellung und Motivation

Steigende Bedarfe, kürzer werdende Produktlebenszyklen und höhere Variantenvielfalt führen zu einer erhöhten Komplexität in heutigen Produktionsprozessen (Bänziger et al. 2017; Steegmüller und Zürn 2017). Mit dieser immer komplexer werdenden Industrie stoßen vollautomatisierte Industrieroboteranlagen, unter anderem durch hohen Konfigurations- und Umrüstaufwand, an ihre Grenzen (Kahl et al. 2016). Produktionsprozesse, welche der Herausforderung von kleinen Losgrößen und vielen Produktvarianten gegenüberstehen, werden auf Kosten der Produktivität und zu Gunsten der Flexibilität im Allgemeinen als manuelle Arbeitsplätze ausgeführt (Lotter 2012). Im Falle geringer Produktvarianz zielen Industrieroboteranlagen im Gegensatz dazu darauf ab, höchste Produktivität und Qualität unter minimalen Kosten zu vereinen (Hägele et al. 2008). Die Anpassung an individuelle Kundenwünsche ist jedoch nur bedingt möglich. Für das Zusammenwirken der geforderten Eigenschaften Produktivität und Flexibilität werden manuelle und automatisierte Produktionssysteme heute in hybriden Produktionssystemen an einem Arbeitsplatz vereint (IFR Statistical Department 2016; Kahl et al. 2016). Um Roboter in **variantenreichen Produktionssystemen** einsetzen zu können, muss deren Konfiguration deutlich erleichtert werden. Die Vereinfachung der klassischen Roboterprogrammierung zur sogenannten „High-Level“-Programmierung bietet einen Ansatz für den wirtschaftlichen Einsatz in der Kleinserienfertigung. Bewegungsabläufe können durch einfache und intuitive Programmiermethoden angelegt oder auch bereits angelernte Abläufe abgeändert werden, z.B. durch das „Führen an der Hand“ (Akan et al. 2010; Helms und Meyer 2005; IFR Statistical Department 2016). Mit dem sinkenden Verhältnis von Programmieraufwand zu effektiver Fertigungszeit steigt die Wirtschaftlichkeit für die Produktion kleiner werdender Stückzahlen (Naumann et al. 2017).

Vor diesem Hintergrund stellt die intuitive **Mensch-Roboter-Interaktion (MRI)** eine Schlüsseltechnologie zukünftiger Produktionsumgebungen dar. Sie befähigt die Kommunikation zum einfachen Informationsaustausch zwischen Mensch und Roboter und ermöglicht dadurch die Verfolgung gemeinsamer, stets

neuer Aufgaben und Ziele. Darunter fällt z.B. die o.g. intuitive Roboterprogrammierung mittels Handführung entlang einer auszuführenden Roboterbewegung. Die Roboterkonfiguration ist damit ohne Programmierexpertise durch die Endanwender, z.B. Produktionsmitarbeiter, durchführbar (Forge und Blackman 2010; Guerin et al. 2014; Michalos et al. 2014).

Forschungsvorhaben im Feld der industriellen Robotik befassen sich bereits seit mehreren Jahren mit der Herausforderung, menschliche und maschinelle Eigenschaften an einem Arbeitsplatz zu vereinen (Tellaecche et al. 2015). Dies betrifft vor allem Prozesse, welche die kognitiven Fähigkeiten und die Flexibilität des Menschen gemeinsam mit der Ausdauer, Genauigkeit und Geschwindigkeit eines Roboters erfordern (Pollmann 2016; Schließmann 2017). Mit der Sicherheit des Menschen als oberste Priorität fokussiert die MRI im industriellen Kontext den Austausch von Informationen zur Vermeidung von für den Menschen schmerzhaften Kollisionen (Krüger et al. 2009). Die schutzzaunlose Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter mit der Möglichkeit des physischen Kontaktes wird als „**Mensch-Roboter-Kollaboration**“¹ bezeichnet. Mit dem Einsatz eines Roboters als „intelligenter Assistent“ besteht die Möglichkeit der flexiblen Aufteilung von Aufgaben. Der Mensch kann sich bspw. komplexen Aufgaben widmen, welche feinmotorisch-taktile oder sensorisch-kognitive Fähigkeiten erfordern, während der Roboter andere Aufgaben unterstützend durchführt (Dunckern 2016).

Im Zuge der direkten Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter wird vor dem Hintergrund immer kleiner werdender Losgrößen daher eine weitere Vereinfachung der Roboterprogrammierung zunehmend interessant. Eine Möglichkeit, dies umzusetzen, bietet die einfache Anweisung bzw. **Instruktion** eines Roboters (Naumann et al. 2017). Mit der Reduktion des Programmieraufwandes ermöglicht die Instruktion damit eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit der MRK in variantenreichen Produktionssystemen bzw. auch jenen der Losgröße Eins.

Die Motivation der vorliegenden Arbeit liegt daher in der Unterstützung der Vereinfachung der Roboterprogrammierung von kollaborierenden Robotern hin zu einer Instruktion im laufenden Produktionsprozess. Im Speziellen soll dadurch der Einsatz einer MRK in Produktionssystemen der Losgröße Eins befähigt werden. Die Basis hierfür liefern instruktive Mensch-Roboter-Systeme im Bereich der

¹ Obwohl der Begriff der Kollaboration im deutschsprachigen Raum negativ mit der Zusammenarbeit mit dem Feind assoziiert wird, verwendet die vorliegende Dissertation den Begriff als Synonym für „Zusammenarbeit“. Bspw. wird laut DIN EN ISO 10218-1:2011 der „kollaborierende Betrieb“ als Zustand definiert, „in dem hierfür konstruierte Roboter innerhalb eines festgelegten Arbeitsraums direkt mit dem Menschen zusammenarbeiten“ (DIN EN ISO 10218-1:2011).