

Automatisierungstechnik

Markus Schiemann

**Entwicklung eines modularen
Sicherheitskonzeptes zur Mobilitäts-
und Produktivitätssteigerung der
Mensch-Roboter-Kollaboration im
industriellen Einsatz – *SmartSafety***

**Entwicklung eines modularen Sicherheitskonzeptes zur
Mobilitäts- und Produktivitätssteigerung der Mensch-Roboter-
Kollaboration im industriellen Einsatz - *SmartSafety***

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektro- und Energiesysteme
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Master of Science

Markus Schiemann

geboren am 31.01.1989
in Nürtingen, Deutschland

Vorsitzende: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. paed. Annette Hoppe
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger
Tag der mündlichen Prüfung: 20.12.2019

Berichte aus dem Lehrstuhl Automatisierungstechnik
BTU Cottbus-Senftenberg
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger

Markus Schiemann

**Entwicklung eines modularen Sicherheitskonzeptes
zur Mobilitäts- und Produktivitätssteigerung
der Mensch-Roboter-Kollaboration im industriellen
Einsatz – *SmartSafety***

Shaker Verlag
Düren 2020

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.

Zugl.: Cottbus-Senftenberg, BTU, Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7210-5

ISSN 1864-5789

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die Automatisierungstechnik bildet eine Schlüsseltechnologie für die Steigerung der Produktinnovation und die Verbesserung von Wertschöpfungsprozessen. Als Konsequenz einer globalen Wirtschaftsstruktur müssen alle Unternehmensbereiche wie Entwicklung, Produktion und Güterverkehr in einen übergreifenden Kontext gestellt und behandelt werden. Dabei steht die informationstechnische Verknüpfung verbundener Unternehmen und Unternehmensbereiche bei stetig veränderlichen Aufgabenstellungen und Randbedingungen eine besondere Herausforderung dar. Die Automatisierung des betrieblichen und betriebsübergreifenden Informationsflusses sowie die Einbindung des Menschen in allen Phasen des Entwicklungs- und Leistungsprozesses bildet daher die vordringliche Aufgabenstellung für Forschung und Entwicklung. Durch den zielgerichteten, systematischen Einsatz und die ständig aktualisierte Beurteilung und Bewertung automatisierungstechnischer Lösungen wird die schnelle Umsetzung und Einführung hochwertiger und zukunftsweisender Innovationen gesichert.

Ziel der Forschungsarbeiten am Lehrstuhl Automatisierungstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU) ist die kontinuierliche Verbesserung der automatisierungstechnischen Methoden und Verfahren im Hinblick auf fortgeschrittene Produktionsstrukturen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung integrierter Fertigungs und Montagesysteme unter Einsatz neuartiger Steuerungstechnik. Dazu werden leistungsfähige Entwurfswerkzeuge der Digitalen Fabrik erprobt und weiterentwickelt. Durch die Bereitstellung modernster Laborausstattung und die Zusammenarbeit mit industriellen und institutionellen Technologieführern wird der Stand der Technik in Wissenschaft und Forschung aktualisiert abgebildet. Nationale und internationale Forschungsarbeiten zu ganzheitlichen Automatisierungskonzepten, den Industrial Life Cycle Automation, runden das Aufgaben- und Leistungsspektrum des Lehrstuhls ab. Die in dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen aus den Forschungsarbeiten des Lehrstuhls Automatisierungstechnik der BTU Cottbus-Senftenberg. In diesen Bänden werden neue Resultate und Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung veröffentlicht. Die Berichte aus dem Lehrstuhl Automatisierungstechnik sollen Forschung, Entwicklung und Anwendung zu automatisierungstechnischen Fragestellungen enger verknüpfen und daraus Potential für zukünftige Innovationen erzeugen.

Kurzfassung

Die Mensch-Roboter-Kollaboration wird als ein elementarer Baustein zur Steigerung der Flexibilität und Produktivität moderner Produktionssysteme angesehen. Dieses Ziel soll durch den kombinierten Einsatz sensitiver, mobiler Roboter, sogenannter Leichtbaurobter (LBR), mit dem Menschen erfolgen. Schutzzäune entfallen bei dieser Art der Zusammenarbeit, jedoch muss weiterhin die Sicherheit des Menschen gewährleistet sein. Soll der Mensch seine kognitiven Fähigkeiten nutzen und auf die Mobilität der LBR zurückgreifen, kann er eine Ortsveränderung im Produktionssystem durchführen. Bei einer Ortsveränderung in eine neue Arbeitsumgebung ist jedoch eine zeitaufwendige Wiederinbetriebnahme des MRK-Systems notwendig, die in den meisten Fällen nur durch einen Experten möglich ist.

Diese Arbeit stellt daher ein Sicherheitskonzept für MRK-Systeme vor (*SmartSafety*), um die Mobilität und Produktivität bei Gewährleistung aller Sicherheitsaspekte zu steigern und dabei den Nutzer zu befähigen als zentraler Bestandteil des Systems agieren zu können.

Zu Beginn werden ein Rahmenwerk für das Thema erarbeitet und anhand einer Problembetrachtung die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf MRK-Systeme erläutert. Daraus werden die Anforderungen an den Sicherheitsprozess und die dafür zu entwickelnden Komponenten abgeleitet. Darauf aufbauend werden die sicherheitstechnischen Aspekte der Mensch-Roboter-Kollaboration, inklusive des iterativen Inbetriebnahmeprozesses, detailliert beleuchtet. Im Rahmen einer Bewertung in der Praxis eingesetzter MRK-Systeme sowie von Konzepten und Methoden aus der Wissenschaft anhand der abgeleiteten Anforderungen, werden anschließend die Handlungsbedarfe ermittelt. Diese führen zur Entwicklung eines passiven Sicherheitssystems (*SmartSkin*) und einer durch den Nutzer durchführbaren Wiederinbetriebnahme mittels Softwareunterstützung (*SmartAssistant*) für MRK-Systeme.

Abschließend wird eine Validierung des Sicherheitskonzeptes anhand zweier Betriebsversuche in der Motorenmontage der Daimler AG vorgestellt. Alle Bestandteile der Wiederinbetriebnahme, sowohl die entwickelte Hard- als auch Software sind durch den internen Arbeitsschutz freigegeben und unterliegen den geltenden Gesetzen, Normen und Richtlinien. Eine Umfrage hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit der einzelnen Module bei Anwendern, Entwicklern und Sicherheitsexperten schließt die Validierung ab.

Das in dieser Arbeit entworfene Sicherheitskonzept für MRK-Systeme stellt einen weiteren Schritt zur größeren Verbreitung dieser Anlagen in der Praxis dar, da erst dadurch ein mobiler, menschenzentrierter und wirtschaftlicher Einsatz möglich wird.

Abstract

Human-robot collaboration is seen as an elementary building block for increasing the flexibility and productivity of modern production systems. This goal is to be achieved through the combined use of sensitive, mobile robots, so-called lightweight robots (LWR), with humans. Protective fences are not required for this type of cooperation, but human safety must continue to be guaranteed. If humans are to use their cognitive abilities and fall back on the mobility of the LWR, they can relocate the production system. In case of a change of location into a new working environment, however, a time-consuming recommissioning of the HRC-system is necessary and in most cases only possible by an expert.

This work therefore presents a safety concept for HRC-systems (*SmartSafety*) in order to increase mobility and productivity while guaranteeing all safety aspects and enabling the user to act as a central component of the system.

At the beginning, a framework for the topic will be developed and the different influencing factors on HRC-systems will be explained on the basis of a problem analysis. From this, the requirements for the security process and the components to be developed for it are derived. Building on this, the safety aspects of the human-robot collaboration, including the iterative commissioning process, are examined in detail. Within the framework of an evaluation of HRC-systems used in practice as well as of concepts and methods from science on the basis of the derived requirements, the need for action is then determined. These lead to the development of a passive safety system (*SmartSkin*) and a re-commissioning by the user via software support (*SmartAssistant*) for HRC-systems.

Finally, a validation of the safety concept on the basis of two operating tests in the engine assembly department of Daimler AG is presented. All components of the recommissioning, both the developed hardware and software are approved by the internal occupational safety and are subject to the applicable laws, standards and guidelines. A survey of users, developers and safety experts regarding the usability of the individual modules completes the validation process.

The safety concept for HRC-systems developed in this thesis represents a further step towards the wider dissemination of these systems in practice, as only then will mobile, human-centered and economical use in practice become possible.

Vorwort des Verfassers

Die Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit bei der Daimler AG in der Abteilung TF/VRT, zuständig für die Entwicklung neuer Verfahrens- und Fügetechnologien.

Für eine hervorragende Betreuung während der gesamten Promotionszeit gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger, Leiter des Lehrstuhls Automatisierungstechnik an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg. Er brachte stets Engagement und eine Vielzahl innovativer und wissenschaftlicher Ideen ein, durch die die Arbeit den finalen Schliff erhielt. Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger, Leiter des Lehrstuhls für Industrielle Automatisierungstechnik an der Technischen Universität Berlin, danke ich für die Mühen des Korreferates und der aufmerksamen Durchsicht der Arbeit.

Herzlich danken möchte ich auch meinen Kollegen bei der Daimler AG für die permanente Forderung und Förderung. Herrn Dr.-Ing. Matthias Reichenbach, danke ich für die Initiierung des Themas. Für die kreative und konstruktive Zusammenarbeit, ebenso wie für die akademischen Ratschläge und die methodisch wertvolle Kritik bin ich speziell Herrn Dipl.-Ing. Matthias Schreiber, Herrn Dr.-Ing. Jan Hodapp, Herrn Dr.-Ing. Mayur Andulkar und Herrn Marcus Kipp dankbar. Herzlich danken möchte ich auch allen Studenten, die die von mir betreuten Aufgaben annahmen und mit viel Energie bearbeiteten.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mein Lebensmittelpunkt ist und den wesentlichen Rückhalt für das Anfertigen dieser Arbeit gab. Meinen Eltern danke ich für die bedingungslose und uneingeschränkte Unterstützung und Förderung meiner Ausbildung. Für Eva Maria sei gesagt: „Dankbarkeit ist das Gedächtnis des Herzens“.

Markus Schiemann

Bemplingen, im Dezember 2019

„Willst du dich am Ganzen erquicken, so musst du das Ganze im Kleinsten erblicken.“

Johann Wolfgang von Goethe

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XIX
Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole	XXI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Herausforderungen	1
1.2 Beiträge der Arbeit und Hypothese	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Problembetrachtung und Anforderungsanalyse	5
2.1 Wesentliche Definitionen und Begriffe	5
2.1.1 Die Wandlungsfähigkeit und ihre Elemente	5
2.1.2 Zusammenarbeit von Mensch und Roboter im industriellen Umfeld	8
2.2 Herausforderungen bei Mobilität und Produktivität von Mensch-Roboter-Kollaboration-Systemen	14
2.2.1 Sicherheit	15
2.2.2 Wirtschaftlichkeit	16
2.2.3 Programmierung	19
2.2.4 (Wieder-) Inbetriebnahme	20
2.2.5 Ergonomie	21
2.3 Anforderungsanalyse für Mensch-Roboter-Kollaboration-Systeme im industriellen Montageumfeld	22
2.4 Zusammenfassung der Anforderungen	24
3 Stand der Technik und der Wissenschaft	27
3.1 Einsatzpotentiale der Mensch-Roboter-Kollaboration	27
3.1.1 Arten der Zusammenarbeit	28
3.1.2 Vor- und Nachteile der Mensch-Roboter-Kollaboration	30

3.2	Sicherheit bei der Mensch-Roboter-Kollaboration	30
3.2.1	Gesetzliche und normative Vorgaben	32
3.2.2	Bestehende Forschungsansätze und Technologien für die Kontaktbetrachtung zwischen Mensch und Roboter	42
3.2.3	Zusammenfassung und Bewertung der Sicherheitssysteme	49
3.3	Inbetriebnahme	52
3.3.1	Konformitätsbewertungsverfahren	52
3.3.2	Risiko- und Gefährdungsbeurteilung	55
3.3.3	Arbeitsfreigabesystem	56
3.3.4	Semantische Technologien	57
3.3.5	Bestehende Forschungsansätze und Technologien der Inbetriebnahme	60
3.3.6	Zusammenfassung und Bewertung der Inbetriebnahmekonzepte	61
3.4	Zusammenfassung und Fazit	63
4	Konzeptualisierung	65
4.1	Annahmen für das Konzept	65
4.2	Konzept von <i>SmartSafety</i> für die Mensch-Roboter-Kollaboration	66
5	Entwicklung der Systemmodule	69
5.1	Entwicklung eines passiven Sicherheitsmoduls	69
5.1.1	Kollisionsprozess	69
5.1.2	Technische Spezifikationen des Leichtbauroboters	73
5.1.3	Aufbau des Kollisionsprüfstandes und Durchführung des Messprozesses ..	76
5.1.4	Durchführung der Kollisionstests	78
5.1.5	Auswertung der Kraft- und Druckmessungen	82
5.1.6	Entwicklung eines Tests zur Ermittlung der Wärmeübertragung	84
5.1.7	Entwicklung eines geeigneten Materials	85
5.2	Assistenzsystem <i>SmartAssistant</i> zur Wiederinbetriebnahme von Mensch-Roboter- Kollaboration-Systemen	93
5.2.1	Ontologien – Ein Überblick	94
5.2.2	Verwaltungsschale	95
5.2.3	Modularität	98
5.2.4	Ontologie für die Mensch-Roboter-Kollaboration	100

5.2.5	Anwendungsbeispiel <i>SmartAssistant</i>	103
5.2.6	Werkzeuge zur Realisierung von <i>SmartAssistant</i>	104
5.2.7	Nutzerseitige Benutzeroberfläche.....	105
5.2.8	Systemverarbeitung in <i>SmartAssistant</i>	109
5.3	Zusammenfassung der entwickelten Systemmodule.....	112
6	Validierung des Sicherheitskonzeptes <i>SmartSafety</i>	113
6.1	Validierungsziele und Durchführung der Betriebsversuche.....	113
6.1.1	Betriebsversuch 1	116
6.1.2	Betriebsversuch 2	118
6.2	Usability-Studie zu <i>SmartSafety</i>	120
6.3	Zusammenfassung und Bewertung der Validierung.....	123
7	Zusammenfassung und Ausblick	127
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion.....	127
7.2	Ausblick.....	128
8	Literaturverzeichnis	129
9	Anhang.....	155
9.1	Begutachtete Veröffentlichungen des Autors	155
9.2	Bestehende Applikationen und praxisnahe Forschungsansätze.....	158
9.3	Biomechanische Grenzwerte unterschiedlicher Körperregionen	164
9.4	Usability-Studie	166

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 1-1: Struktur und methodischer Aufbau der Arbeit	3
Abbildung 2-1: Stufen der Veränderungsfähigkeit von Produktionen	5
Abbildung 2-2: Unterschied von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit	6
Abbildung 2-3: Wandlungsbefähiger	7
Abbildung 2-4: Kontakthäufigkeit und Expertise einzelner Benutzergruppen	11
Abbildung 2-5: Herausforderungen der Mensch-Roboter-Kollaboration	15
Abbildung 2-6: Gründe für den Einsatz von Mensch-Roboter-Kooperation	16
Abbildung 2-7: Ökonomisches Prinzip	17
Abbildung 2-8: Wiederinbetriebnahme im Lebenszyklus eines Produktionssystems	21
Abbildung 3-1: Definition der Zusammenarbeitsgrade von Mensch und Roboter	28
Abbildung 3-2: Direkte Mensch-Roboter-Kollaboration	29
Abbildung 3-3: Übersicht relevanter Gesetze und Normen	32
Abbildung 3-4: Prozess der Risikominderung	34
Abbildung 3-5: Körpermodell	38
Abbildung 3-6: Transienter und quasi-statischer Kraft- / Druckverlauf	39
Abbildung 3-7: Funktionsweise <i>Fujifilm-Prescale</i> -Druckmessfolien	40
Abbildung 3-8: Datenverarbeitung der Druckmesssysteme	41
Abbildung 3-9: Sicherheitszonen – Mensch-Roboter-Kooperation	43
Abbildung 3-10: Haptische Wahrnehmung durch multimodale Roboterhaut	44
Abbildung 3-11: 3D-Druckteile der Soft Skin	45
Abbildung 3-12: Werkzeughaltevorrichtung	46
Abbildung 3-13: Gelenkschlüssel	47
Abbildung 3-14: Endeffektor-Airbag	48
Abbildung 3-15: Ableitung des Handlungsbedarfs aus der Bewertung	51
bestehender Applikationen und praxisnaher Forschungsansätze passiver Sicherheitsmodule	
Abbildung 3-16: Trennung zwischen Hersteller- und Betreiberpflichten	52
Abbildung 3-17: Unterlagen der technischen Dokumentation von Maschinen	53
Abbildung 3-18: Zusammensetzung der Risikobeurteilung	55
Abbildung 3-19: Bestimmung des Performance Levels	56

Abbildung 3-20:	Ableitung des Handlungsbedarfs aus der Bewertung.....	62
	bestehender Applikationen und praxisnaher Forschungsansätze von Inbetriebnahmen	
Abbildung 4-1:	Konzept von <i>SmartSafety</i>	67
Abbildung 5-1:	Zwei-Körper-Modell.....	70
Abbildung 5-2:	Traglast-Schwerpunkt.....	74
Abbildung 5-3:	Roboterachsen und Arbeitsbereich am Beispiel eines <i>Kuka iiwa</i>	75
Abbildung 5-4:	Versuchsaufbau des Kollisionstests.....	77
Abbildung 5-5:	Bedienung und Programmierung des Robotersystems	79
Abbildung 5-6:	Kritische Kontaktflächen.....	80
Abbildung 5-7:	Trajektorien der Stoßversuche mit den Kontaktflächen.....	81
Abbildung 5-8:	Kritische Kollisionspositionen	84
Abbildung 5-9:	Bewertung von 3D-Druck-Materialien.....	86
Abbildung 5-10:	Unterschiede im Aufbau 3D-gedruckter Strukturen	87
Abbildung 5-11:	3D-gedruckte Schuhsohle.....	88
Abbildung 5-12:	Kraftverläufe bei unterschiedlichen Robotergeschwindigkeiten	89
Abbildung 5-13:	Eindrücktiefen bei unterschiedlichen Robotergeschwindigkeiten	90
Abbildung 5-14:	Transiente Kräfte unterschiedlicher Materialien.....	91
Abbildung 5-15:	Quasi-statische Kräfte unterschiedlicher Kräfte	91
Abbildung 5-16:	Quasi-statische Drücke unterschiedlicher Materialien	92
Abbildung 5-17:	Einkleidung des Leichtbauroboters – <i>SmartSkin</i>	92
Abbildung 5-18:	Temperaturverläufe – EPU 41	93
Abbildung 5-19:	Oberflächenkomponenten von <i>SmartAssistant</i>	94
Abbildung 5-20:	Semantische Verknüpfung eines Familienstammbaums.....	95
Abbildung 5-21:	Modell einer Verwaltungsschale	96
Abbildung 5-22:	Semiotisches Dreieck	97
Abbildung 5-23:	SPARQL-Endpoint eines <i>Fusekisservers</i>	97
Abbildung 5-24:	Modulare MRK-Verwaltung.....	99
Abbildung 5-25:	Baukastenprinzip der MRK-Verwaltung.....	101
Abbildung 5-26:	Ausschnitt der <i>MRK-Safety</i> -Ontologie.....	103
Abbildung 5-27:	Modell eines MVC-Patterns.....	104
Abbildung 5-28:	<i>SmartAssistant</i> – Systematischer Aufbau	105
Abbildung 5-29:	<i>SmartAssistant</i> – Startbildschirm.....	106
Abbildung 5-30:	<i>SmartAssistant</i> – <i>LocMap</i>	107

Abbildung 5-31:	<i>SmartAssistant – SuperMarket</i>	108
Abbildung 5-32:	Stufen des <i>FingerTip</i>	109
Abbildung 5-33:	<i>OntoPROD</i> - Aufbau	110
Abbildung 5-34:	Kommunikation zwischen <i>Fuseki Triplestore</i> und <i>SmartAssistant</i>	111
Abbildung 6-1:	Qualifikationsniveaus der einzelnen Benutzergruppen –	114
	Betriebsversuch 1	
Abbildung 6-2:	Qualifikationsniveaus der einzelnen Benutzergruppen –	114
	Betriebsversuch 2	
Abbildung 6-3:	Validierung von <i>SmartSafety</i> – Vormontage Kettenkastendeckel	116
Abbildung 6-4:	Dauer der Durchführung des <i>SmartAssistant</i> – Betriebsversuch 1	117
Abbildung 6-5:	Schraubreihenfolge und Verfahrenwege – Kettenkastendeckel.....	118
Abbildung 6-6:	Validierung von <i>SmartSafety</i> – Integrierter Starter-Generator (ISG).....	118
Abbildung 6-7:	Dauer der Durchführung des <i>SmartAssistant</i> – Betriebsversuch 2	119
Abbildung 6-8:	Schraubreihenfolge und Verfahrenwege –	120
	Integrierter Starter-Generator ISG	
Abbildung 6-9:	Ergebnisse der Usability-Studie	122
Abbildung 6-10:	Nutzer beim Montieren eines Kettenkastendeckels mit SPA	122
Abbildung 6-11:	Bewertung von <i>SmartSafety</i>	125
Abbildung 9-1:	Ableitung des Handlungsbedarfs aus der Bewertung	158
	bestehender Applikationen und praxisnaher Forschungsansätze (1/2)	
Abbildung 9-2:	Ableitung des Handlungsbedarfs aus der Bewertung	159
	bestehender Applikationen und praxisnaher Forschungsansätze (2/2)	
Abbildung 9-3:	Beschreibung bestehender Applikationen und	160
	praxisnaher Forschungsansätze (1/4)	
Abbildung 9-4:	Beschreibung bestehender Applikationen und	161
	praxisnaher Forschungsansätze (2/4)	
Abbildung 9-5:	Beschreibung bestehender Applikationen und	162
	praxisnaher Forschungsansätze (3/4)	
Abbildung 9-6:	Beschreibung bestehender Applikationen und	163
	praxisnaher Forschungsansätze (4/4)	
Abbildung 9-7:	Biomechanische Grenzwerte (1/2).....	164
Abbildung 9-8:	Biomechanische Grenzwerte (2/2).....	165
Abbildung 9-9:	Usability-Studie zum Sicherheitskonzept <i>SmartSafety</i>	166

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 2-1: Unterschiede von Industrierobotern und Leichtbaurobotern	8
Tabelle 2-2: Zusammenfassung der Anforderungen an <i>SmartSafety</i>	25
Tabelle 3-1: Vor- und Nachteile der Mensch-Roboter-Kollaboration	30
Tabelle 3-2: Zusammenfassung der Anforderungen an <i>SmartSkin</i>	50
Tabelle 3-3: Zusammenfassung der Anforderungen an <i>SmartAssistant</i>	61
Tabelle 6-1: Tätigkeiten bei der Wiederinbetriebnahme des MRK-Systems	115
Tabelle 6-2: Fragen zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit	121

Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BG	Berufsgenossenschaft
BGHM	Berufsgenossenschaft Holz und Metall
BSD	Berkeley Software Distribution
CAD	Computer-Aided Design
CIRC	Circular
CLIP	Continuous Liquid Interface Production
CPS	Cyber-physisches System
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsches Institut für Normung
EPU	Elastomeric Polyurethane
FTS	Fahrerloses Transportsystem
GMS	Gelenkmomenten-Sensor
GS	Geprüfte Sicherheit
GUI	Graphical User Interface
IBN	Inbetriebnahme
IFA	Institut für Arbeitsschutz
iiwa	intelligent industrial work assistant (Produkt der <i>KUKA AG</i>)
LABS	Lackbenetzungsstörende Substanzen
LIN	Linear
LLW	Super Low Pressure
MA	Mitarbeiter
MRL	Maschinenrichtlinie
MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
MVC	Model-View-Controller
OEM	Original Equipment Manufacturer
OPC-UA	Open Plattform Communications-Unified Architecture
OWL	Web Ontology Language
PDS	Power Distribution Sensor

ProdSG	Produktsicherheitsgesetz
PSM	Permanent Safety Monitoring
PTP	Point-to-point
RDF	Resource Description Framework
REBA.....	Rapid Entire Body Assessment
RMS	Reconfigurable Manufacturing System
SPA	Smarter Produktionsassistent
SPARQL	Simple Protocol and RDF Query Language
SPL	Spline
SPS	Speicherprogrammierte Steuerung
SQL	Structured Query Language
TCP	Tool-Centre-Point
Turtle.....	Terse RDF Triple Language
URL	Uniform Resource Locator
W3C	World Wide Web Consortium
W-IBN.....	Wiederinbetriebnahme
WLAN	Wireless Local Area Network
XML	Extensible Markup Language

Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole

A	[m ²]	Fläche
a	[m/s ²]	Beschleunigung
e		Stoßzahl, Restitutionskoeffizient
F	[N]	Kraft
I	[m ⁴]	Flächenträgheitsmoment
J	[kg*m ²]	Massenträgheitsmoment
K	[N/m ²]	Kompressionsmodul
m _H	[kg]	effektive Masse einer Körperregion
m _R	[kg]	effektive Masse des Roboters
p	[kg*m/s]	Impuls
v _{Rel}	[m/s]	Relativgeschwindigkeit (richtungsabhängig)