

Entwicklung einer Bewertungssystematik für die Mensch-Roboter-Kollaboration

Dissertation

zur
Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur

der
Fakultät für Maschinenbau
der Ruhr-Universität Bochum

von
Carsten Thomas
aus Dortmund

Bochum 2017

Dissertation eingereicht am: 07. März 2017

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Juni 2017

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme

Band 3/2017

Carsten Thomas

**Entwicklung einer Bewertungssystematik
für die Mensch-Roboter-Kollaboration**

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Bochum, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5416-3

ISSN 1430-7324

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionssysteme (LPS) der Ruhr-Universität Bochum sowie am Institut für Produktionssysteme der Technischen Universität Dortmund.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter, dem Leiter des Lehrstuhls für Produktionssysteme. Seine Förderung und Unterstützung mit wertvollen und konstruktiven Anmerkungen sowie die Ermöglichung des gestalterischen Freiraums haben maßgeblich zum Erfolg der Arbeit beigetragen.

Herrn Professor Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl, dem Leiter des Instituts für Flugzeug-Produktionstechnik (IFPT) an der Technischen Universität Hamburg-Harburg, danke ich für die Betreuung und die Übernahme des Koreferats meiner Arbeit. Zudem danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Andreas Kilzer für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen Emine Bilek, Lea Rademacher, Felix Busch, Carsten Scheele und Adrian Schyja bedanke ich mich besonders für die Anmerkungen, Anregungen, Motivationen und die sehr gute Zusammenarbeit. Herrn Jonas Herrmann danke ich für die hervorragende Unterstützung bei der programmiertechnischen Umsetzung der Bewertungssystematik.

Frau Maïke Klöckner, Frau Stefanie Spies, Herrn Matthias Bartelt, Herrn Matthias Linsinger, Herrn Denis Störkle und Herrn Thyssen sowie allen nicht namentlich genannten Kolleginnen und Kollegen möchte ich danken, die durch zahlreiche fachliche Diskussionen, konstruktiven Anregungen und durch Schaffung eines angenehmen Arbeitsumfelds zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Bei Herrn Christian Großmann und Herrn Dr. Peter Belener bedanke ich mich für die Unterstützung bei der Verifikation meiner entwickelten Bewertungssystematik.

Frau Dr. Angelika Gärtner danke ich herzlich für die sprachliche Anregungen und Optimierungen.

Ferner danke ich meinen Eltern, die mir mit der Ermöglichung meines Studiums einen Grundstein für diese Arbeit ermöglicht haben.

Meinen ganz herzlichen Dank verdient meine Frau Ricarda Thomas für den mir eingeräumten Freiraum zur Erstellung meiner wissenschaftlichen Ziele, die motivierende Unterstützung sowie die andauernde Rücksichtnahme und Geduld.

Dortmund, im Juni 2017

Carsten Thomas

Kurzfassung

Die Produktion steht in Industrienationen im Zwiespalt zwischen hohen Lohnkosten für personalintensive Produktionsvarianten auf der einen und hohen Investitionen und mangelnder Zuverlässigkeit automatisierter Systeme auf der anderen Seite. Im Bereich der industriellen Montage sind zudem viele Prozesse aufgrund ihrer Komplexität nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand automatisierbar. Durch technische Entwicklungen und normative Änderungen existiert seit wenigen Jahren die Möglichkeit neben der manuellen und der automatisierten Produktionsvarianten auch hybride Systeme zu implementieren, wobei eine intensive Zusammenarbeit von Mensch und Automatisierungstechnik die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) darstellt. Vereint man die Fähigkeiten des Menschen mit denen des Roboters entstehen neue Potenziale wie eine effiziente Unterstützung des Mitarbeiters, eine ergonomische Gestaltung von Arbeitsplätzen und die Möglichkeit einer fähigkeitsorientierten Arbeitsverteilung. Bei der Neuplanung oder Überarbeitung von Produktionssystemen besteht aufgrund von Kenntnismangel, Gewohnheiten oder befürchtigtem Mehraufwand die Gefahr, dass die Produktionsvariante der MRK nicht betrachtet wird. Die bislang entstandenen Systeme der MRK sind oftmals das Resultat langer und ergebnisoffener Planungsprozesse. Die Einordnung zwischen den Produktionsvarianten manuell und automatisiert ist oft schwierig, die Bestimmung eines objektiven und dokumentierbaren Eignungsgrades ist nicht möglich, wodurch die Gefahr von Fehlinvestitionen immens ist.

An dieser Stelle setzt die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Bewertungssystematik an. In der frühen Phase der Produktionsplanung kann mit deren Hilfe eine erste fundierte Einschätzung, welche der drei Produktionsvarianten technisch möglich und ob eine detaillierte Ausarbeitung sinnvoll ist, gegeben werden. Somit können Fehlplanungen frühzeitig vermieden und die am besten geeignete Produktionsvariante ausgearbeitet werden. Durch die Nutzung der softwarebasierten Bewertungssystematik erfolgt die Abfrage von 60 Kriterien zur Bestimmung der Eignungsgrade für die Produktionsvarianten manuell, MRK-basiert und automatisiert auf Basis von Robotersystemen. Die Kriterien sind hierbei in die fünf Klassen Personal, Bauteile, Montageaufgabe, Technische Gegebenheiten und Produktionssystem gegliedert. Eine extreme Bewertung einiger Kriterien führt aufgrund ihrer Bedeutung zum Ausschluss von einer oder mehreren Produktionsvarianten. Die entwickelte Bewertungssystematik basiert auf dem Einsatz von Bewertungssystemen für technische Systeme. Die einzelnen Kriterien haben unterschiedlich starke, positive wie negative, Einflüsse auf die Produktionsvarianten manuell, MRK-basiert und automatisiert. Zudem sind diese Kriterien innerhalb einer Klasse aufgrund der unterschiedlichen Bedeutung zueinander gewichtet. Im Ergebnis erhält der Nutzer eine objektive, vergleichbare Bewertung durch Bestimmung der Eignungsgrade der unterschiedlichen Produktionsvarianten.

Abstract

In regard to the industrial nations, the production is in a conflict between the high labor costs for personnel-intensive production type and the lack of reliability of automated systems. In the area of industrial assembly, there are also several processes that either cannot be, or only with very high effort, automated due to their complexity. For a few years now and as a result of technical developments and normative changes, there is nowadays the possibility to implement hybrid systems in addition to manual or automated production types. A close cooperation between human and automation technology shows the human-robot-collaboration (HRC). By combining the capabilities of a human with the ones of a robot, new potentials such as an efficient support of the employees, an ergonomic design of workplaces or also the possibility of a capability-orientated work distribution emerge. In the redesign or the revision of the production systems, the risk exists that the HRC-based product type will not be considered due to a lack of knowledge, habits or feared additional expenses. The so far developed systems of HRC are often the result of long-lasting and open-outcome planning processes. The classification between the manual and automated production types is in many cases difficult. The determination of objective and documentable suitability levels is not possible which consequently leads to an immense risk of bad investments.

At this point of this work, the developed valuation method begins. In the earlier phase of the production planning, the valuation method enables a first profound evaluation on two aspects. On the one hand, it examines which of the three production types is technically possible and on the other hand, it shows whether a detailed elaboration is useful at all. Consequently, bad planning can be avoided at an earlier stage and the best suitable production type can be elaborated. By using the software-based valuation method, the query on 60 criteria for determining the suitability levels of manual, HRC-based and automated production types takes place. These criteria are divided in five classes, namely personnel, components, assembly task, technical circumstances and production system. A strongly detailed evaluation of a few criteria leads to the exclusion of one or more production types due to their meaning. Each criterion has differently strong, positive or negative influences on the manual, HRC-based and automated production types. Furthermore, these criteria within a class are weighted in relation to their various meaning. As a result, the user receives an objective and comparable evaluation by determining the suitability levels of the various production types.

Liste der eigenen Veröffentlichungen im Kontext

- [1] Bilek, E., Busch, F., Hartung, J., Scheele, C., Thomas, C., Deuse, J., Kuhlenkötter, B.: Intelligente Erstellung und Nutzung von Maschinendokumentation, ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, S. 652–656, 2012.
- [2] Busch, F., Deuse, J., Thomas, C., Kuhlenkötter, B.: rorarob – Ein Roboterassistenzsystem für Schweißaufgaben, PRODUCTIVITY Management, Bd. 4, S. 65, 2012.
- [3] Busch, F., Thomas, C., Deuse, J., Kuhlenkötter, B.: A Hybrid Human-Robot Assistance System for Welding Operations - Methods to Ensure Process Quality and Forecast Ergonomic Conditions. In: Technologies and Systems for Assembly Quality, Productivity and Customization. CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS) 2012, S. 151–154, 2012.
- [4] Kuhlenkötter, B., Deuse, J., Hengstebeck, A., Thomas, C.: Industrie 4.0 im Produktionssystem: Neue Potentiale und praktische Umsetzung, Prozesstechnik & Komponenten, S. 4–10, 2015.
- [5] Stankiewicz, L., Thomas, C., Busch, F., Deuse, J., Kuhlenkötter, B.: Individualisierte Roboterassistenz zur Kompensation altersbedingter Einschränkungen des Muskel-Skelett-Systems an manuellen Montagearbeitsplätzen. In: 61. GfA-Frühjahrskongress. 2015.
- [6] Thomas, C., Busch, F., Kuhlenkötter, B., Deuse, J.: Safe and Ergonomic Collaboration of Humans and Robots for Welding of Assemblies. In: 3rd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems CATS 2010. CIRP & Tapir Academic Press, S. 121–125, 2010.
- [7] Thomas, C., Busch, F., Kuhlenkötter, B., Deuse, J.: Ensuring Human Safety with Offline Simulation and Real-time Workspace Surveillance to Develop a Hybrid Robot Assistance System for Welding of Assemblies. In: Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. 4th CIRP Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV2011): Montreal, Canada, Springer, S. 465–470, 2011.
- [8] Thomas, C., Busch, F., Kuhlenkötter, B., Deuse, J.: Gewährleistung der Humansicherheit durch optische Arbeitsraumüberwachung in der Mensch-Roboter-Kollaboration. In: Automation 2011. VDI-Berichte 2143, VDI Verlag GmbH, S. 259–262, 2011.
- [9] Thomas, C., Busch, F., Kuhlenkötter, B., Deuse, J.: Process and Human Safety in Human-Robot-Interaction - A Hybrid Assistance System for Welding Applications. In: Intelligent Robotics and Applications. 4th International Conference on Intelligent Robotics and Applications, Springer, S. 112–121, 2011.
- [10] Thomas, C., Kuhlenkötter, B.: Sichere und kollaborierende Mensch-Roboter-Interaktion - Entwicklung eines robotergestützten Assistenzsystems für das Handling im Schweißprozess. In: Internationales Forum Mechatronik. 2010.
- [11] Thomas, C., Kuhlenkötter, B.: rorarob - robot assisted welding for tubular and framework constructions, DOI 10.2314/GBV:82913378X. TIB - Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover: 2014.

-
- [12] Thomas, C., Kuhlenkötter, B., Busch, F., Deuse, J.: Mensch-Roboter-Kooperation, atp edition, Bd. 53, 7-8, S. 54–61, 2011.
- [13] Thomas, C., Klöckner, M., Kuhlenkötter, B.: Mensch-Roboter-Kollaboration - Von der industriellen Produktion bis zum Anwendungsgebiet Rehabilitation. In: Mensch-Roboter-Kollaboration - Von der industriellen Produktion bis zum Anwendungsgebiet Rehabilitation. S. 253–261, 2014.
- [14] Thomas, C., Matthias, B., Kuhlenkötter, B.: Human-Robot Collaboration – New Applications in Industrial Robotics. In: International Conference on Competitive Manufacturing COMA'16. Stellenbosch, Südafrika, 27.-29.01.2016, S. 293–299, 2016.
- [15] Thomas, C., Stankiewicz, L., Grötsch, A., Wischniewski, S., Deuse, J., Kuhlenkötter, B.: Intuitive work assistance by reciprocal human-robot interaction in the subject area of direct human-robot collaboration. In: 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS). Göteborg, 16.-18.05.2016, S. 275–280, 2016.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	III
Abstract	V
Liste der eigenen Veröffentlichungen im Kontext	VII
Inhaltsverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und thematische Einordnung	2
1.2 Problemstellung und Zielsetzung	8
1.3 Vorgehensweise / Gliederung der Arbeit	9
2 Stand der Technik und Forschung	11
2.1 Technische Systeme und Komponenten	12
2.1.1 Roboter und Robotersysteme	12
2.1.1.1 Klassischer Roboter und sicherheitstechnische Steuerungserweiterungen ...	15
2.1.1.2 Roboter mit hohem MRK-Einsatzpotenzial	19
2.1.1.3 Vorwettbewerbliche Roboter für den MRK-Einsatz	25
2.1.2 Sensorik	25
2.1.2.1 Verfügbare Sensorsysteme für den MRK-Einsatz	26
2.1.2.2 Vorwettbewerbliche Sensorsysteme für den MRK-Einsatz	30
2.1.3 Endeffektoren	31
2.2 Mensch-Roboter-Kollaboration – Definitionen, Betriebsmodi, Beispiele.....	32
2.2.1 Begriffsdefinitionen	33
2.2.2 Betriebsmodi in der Mensch-Roboter-Kollaboration.....	35
2.2.3 Das Forschungsprojekt ‚rorarob‘ als Beispiel für die MRK	38
2.2.3.1 Referenzprozess Rahmenbaugruppe (Fa. Böcker Maschinenwerke GmbH)...	39
2.2.3.2 Referenzprozess Rohrbaugruppe (Fa. MAN SE)	40
2.2.3.3 Prozessablauf	43
2.2.3.4 Sicherheitskonzept.....	44
2.2.4 Weitere Anwendungsbeispiele mit MRK in Forschung und Industrie	48

2.3	Normen, Richtlinien und rechtlicher Stand	51
2.3.1	Relevante Normen und Richtlinien	51
2.3.1.1	Europäische Maschinenrichtlinie 2006/42/EG	52
2.3.1.2	Typ-A-Norm.....	53
2.3.1.3	Typ-B-Normen.....	55
2.3.1.4	Typ-C-Norm.....	61
2.3.1.5	ISO/TS 15066 – Robots and robotic devices – Collaborative robots	63
2.3.1.6	BG/BGIA-Empfehlungen für die Gefährdungsbeurteilung nach Maschinenrichtlinie	66
2.3.2	Anpassungen der neuen Fassungen / Entwicklungen im Bereich der Normen	66
2.3.3	Zusammenfassung der relevante Normen und Richtlinien.....	68
2.3.4	Rechtlicher Stand.....	68
2.4	Personal und Personaleinsatz.....	69
2.4.1	Belastungen von Mitarbeitern	70
2.4.2	Personengruppen in der industriellen Montage.....	70
2.4.3	Wohlbefinden der Mitarbeiter in der Mensch-Roboter-Interaktion	72
2.4.4	Demographie und leistungsgewandelte Mitarbeiter	74
2.5	Produktionsplanung und -optimierung	75
2.5.1	Optimierung der Produktion	75
2.5.2	Produktionsplanung in der Montage	76
2.5.3	Fähigkeitsorientierte Montageplanung.....	76
2.6	Industrielle Montage	77
2.6.1	Bauteileigenschaften	77
2.6.2	Montage in der Produktion	78
2.6.3	Montage- und automatisierungsgerechte Produktgestaltung	79
2.7	Thematische Einordnung und Abgrenzungen	80
2.7.1	Industrielle Robotik vs. Servicerobotik.....	81
2.7.2	Beschränkung auf die Montage.....	82
2.7.3	Weitere Abgrenzungen.....	82
2.8	Zwischenfazit des Standes der Technik.....	83
3	Bewertungssystematik zur Auswahl technischer Systeme	87

3.1	Problemstellung.....	87
3.2	Entscheidungshilfe durch Bewertungssysteme.....	88
3.3	Anforderungen an eine Bewertungssystematik im Kontext Mensch-Roboter-Kollaboration	91
3.4	Zusammenfassung des Handlungsbedarfs.....	92
4	Darstellung des Konzeptes der Bewertungssystematik für die Mensch-Roboter- Kollaboration.....	95
4.1	Detaillierte Beschreibung des Bewertungssystems	95
4.2	Paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien.....	101
4.3	Einflussparameter.....	102
4.3.1	Personal	103
4.3.2	Bauteile.....	107
4.3.3	Montageaufgabe	110
4.3.4	Technische Gegebenheiten	113
4.3.5	Produktionssystem	116
4.4	Ausschlusskriterien.....	119
5	Umsetzung des Konzeptes der Bewertungssystematik für die Mensch-Roboter- Kollaboration.....	121
5.1	Umsetzung der Bewertungssystematik.....	122
5.2	Struktureller Aufbau der Bewertungssystematik.....	123
5.2.1	Startseite der Bewertungssystematik	123
5.2.2	Abfrage der Kriterien	124
5.2.3	Darstellung des Ergebnisses	127
5.2.4	Nutzung des Ergebnisses	128
6	Verifikation der Bewertungssystematik für die Mensch-Roboter-Kollaboration	131
6.1	Einsatz der Bewertungssystematik in der Klemmenleistenmontage.....	131
6.1.1	Aufgabenbeschreibung.....	132
6.1.2	Eingangsgrößen für die Klemmenleistenmontage in der universitären Produktion	134
6.1.3	Ergebnis für die Klemmenleistenmontage in der universitären Produktion	139

6.1.4	Eingangsgrößen für die Klemmenleistenmontage in der industriellen Produktion	140
6.1.5	Ergebnis für die Klemmenleistenmontage in der industriellen Produktion	145
6.2	Einsatz der Bewertungssystematik bei der Montage von Haushaltsgeräten	146
6.2.1	Aufgabenbeschreibung.....	146
6.2.2	Eingangsgrößen bei der Montage von Hausgeräten.....	147
6.2.3	Ergebnis der Bewertungssystematik bei der Montage von Haushaltsgeräten.....	152
7	Überprüfung der Bewertungssystematik	155
7.1	Allgemeine Tauglichkeitsbewertung	155
7.2	Vergleich der Verifikationen von der universitären und der industriellen Produktion	156
7.3	Bewertung der Übertragbarkeit auf unterschiedliche Montageprozesse	158
7.4	Zusammenfassung der Verifikation.....	159
8	Zusammenfassung und Ausblick	161
9	Literaturverzeichnis	165
	Literatur.....	165
	Normen und Richtlinien	182
	Abbildungsverzeichnis.....	184
	Tabellenverzeichnis.....	187
	Anhang.....	191
A	Ergänzungen zu 2.3: Normen, Richtlinien und rechtlicher Stand	191
A.1	Zusammenfassung bedeutender Begriffe der DIN EN ISO 12100	191
A.2	DIN EN ISO 13849.....	192
B	Tabellen zu 4.3 Einflussparameter	194
B.1	Tabellen zu 4.3.1 Einflussparameter Personal.....	194
B.2	Tabellen zu 4.3.2 Einflussparameter Bauteile	203
B.3	Tabellen zu 4.3.3 Einflussparameter Montageaufgabe	208
B.4	Tabellen zu 4.3.4 Einflussparameter Technische Gegebenheiten.....	214
B.5	Tabellen zu 4.3.5 Einflussparameter Produktionssystem.....	218
C	Matrizen der paarweisen Vergleiche (Kapitel 4.2).....	224
	Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme	231
	Lebenslauf.....	241