



PAUL RUSCH



MENSCH-ROBOTER-KOLLABORATION IN DER INDUSTRIELLEN MONTAGE

EINSATZGEBIETE, SICHERHEITSANFORDERUNGEN
UND WIRTSCHAFTLICHKEIT

Paul Rusch

**Mensch-Roboter-Kollaboration in
der industriellen Montage**

**Einsatzgebiete,
Sicherheitsanforderungen und
Wirtschaftlichkeit**

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.

Impressum:

Copyright © Science Factory 2019

Ein Imprint der Open Publishing GmbH, München

Druck und Bindung: Books on Demand GmbH, Norderstedt, Germany

Covergestaltung: Open Publishing GmbH

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	V
Executive Summary.....	VI
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis	VIII
Formelverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	X
Danksagung	1
1 Einleitung.....	2
1.1 Problemstellung.....	3
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Aufbau und Struktur	4
1.4 Methodische Vorgehensweise	5
2 Leichtbauroboter	7
2.1 KUKA.....	9
2.2 ABB.....	10
2.3 UR.....	11
2.4 SWAYER.....	11
2.5 Franka Emika Panda	12
2.6 Fanuc CR-35iA	13
2.7 Bosch APAS	13
2.8 Stäubli TX2.....	14
2.9 Yaskawa human-collaborative robot (HC10)	15
2.10 Zusammenfassung	16
3 Hybride Montage.....	17
3.1 Unterschied: Koexistenz: Kooperation, Kollaboration.....	19
3.2 Schnittstellen für die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter	21

4 Anforderungen an den Arbeitsplatz.....	22
4.1 Fähigkeitenprofil.....	23
4.2 Grenzen eines Robotersystems	25
4.3 Technische Anwendungsgebiete.....	25
4.4 Die vier Schutzprinzipien.....	26
5 Sicherheit	30
5.1 Sicherheitsanforderungen	30
5.2 Kollisionsarten.....	30
5.3 Biomechanische Belastungsgrenzen.....	32
6 Wirtschaftlichkeit	43
6.1 Einsparungspotential.....	50
6.2 Montageeffizienz.....	51
7 Produktivität.....	54
7.1 Qualität.....	54
7.2 Ergonomie	55
7.3 Akzeptanz	58
8 Empirie	61
8.1 Forschungsmethoden	61
8.2 Forschungsfrage und Forschungsdesign	62
8.3 Leitfaden des Interviews	62
8.4 Interviewleitfaden.....	64
9 Nutzwertanalyse.....	70
10 Fazit und Ausblick	75
10.1 Fazit.....	75
10.2 Ausblick.....	76
Literaturverzeichnis.....	77

Zusammenfassung

Derzeit arbeiten die meisten Robotersysteme in abgesicherten Zellen. Hinter Schutzzäunen oder Lichtschranken führen sie dort ihre industriellen Arbeitstätigkeiten räumlich als auch zeitlich getrennt vom Menschen durch. Solche automatisierten Systeme sind durch hohe Ausbringungsmengen und einer hohen Produktivität charakterisiert. Bei der industriellen Montage, bei welcher oft kleinere Baugruppen mit geringen Gewichten assembliert werden, werden durch die hohe, vom Kunden geforderte Produktvielfalt diese starren Systeme oftmals unwirtschaftlich. Der Einsatz von manuellen Montageplätzen ist die Folge.

Durch die Entwicklung von sensitiven Leichtbaurobotern lässt sich eine skalierbare Automatisierung ermöglichen. In Zukunft werden industrielle Montageplätze vermehrt durch eine Mensch-Roboter-Kollaboration ersetzt werden. Bei der Mensch-Roboter-Kollaboration arbeiten sensitive Leichtbauroboter räumlich als auch zeitlich mit dem Menschen zusammen.

Bei der Umsetzung einer solchen Mensch-Roboter-Kollaboration sind sicherheitstechnische Aspekte zu berücksichtigen, um ein Verletzen des Menschen ausschließen zu können. Um die wirkenden Kräfte als auch die Drücke bei einer Kollision unter dem Maximalmaß halten zu können, wurden Grenzggeschwindigkeiten für bestimmte Körperregionen definiert. Diese Grenzggeschwindigkeiten schränkt den Leichtbauroboter bei der Mensch-Roboter-Kollaboration in seiner Handhabungsgeschwindigkeit ein, jedoch kann durch ein fähigkeitenorientiertes Verteilen der Montagetätigkeiten zwischen Mensch und Roboter ein ergonomischer und produktiver Arbeitsplatz geschaffen werden.

Neben den Grenzggeschwindigkeiten, welche für ein verletzungsfreies Zusammenarbeiten erforscht wurden, ist bei der Gestaltung eines kollaborativen Arbeitsplatzes zwischen Mensch und Roboter auf die Wohlfühlgeschwindigkeit des Menschen zu achten. Diese Geschwindigkeit beeinflusst den Kooperationsfaktor des Menschen und somit auch die Produktivität des Systems.

Die Mensch-Roboter-Kollaboration beeinflusst verschiedenste Bereiche der industriellen Montage. Die alleinige Betrachtung der Wirtschaftlichkeit bei der Implementierung solcher Systeme reicht meist nicht für eine qualifizierte Entscheidung, ob die Mensch-Roboter-Kollaboration eingesetzt werden soll, aus. Ein multidimensionales Beurteilungsverfahren ist zur Entscheidungsfindung deshalb als gute Lösung zu betrachten.

Executive Summary

Nowadays, most robotic systems are working in secure cells. Behind protective fences or light barriers, they carry out their industrial work activities spatially and temporally separated from humans. Such automated systems are characterized by high output rates and high productivity. In industrial assembly, which often assembles smaller components with low weights, these inflexible systems often become uneconomic due to the high product variety demanded by the customer. The use of manual assembly stations is the result.

The development of sensitive lightweight robots makes scalable automation possible. In the future, industrial assembling will increasingly be replaced by a human-robot-collaboration. In the human-robot-collaboration, sensitive lightweight robots work spatially as well as temporally with humans.

When implementing such a human-robot-collaboration, safety-related aspects must be taken into account in order to avoid human injuries. In order to be able to keep the acting forces as well as the pressures in a collision below the upper tolerance value, the speed limits for certain body regions have been defined. These speed perimeters limit the lightweight robot in human robot collaboration in its handling speed, however, by implementing an ability-oriented distribution of assembly activities between human and robot an ergonomic and productive workstation can be created.

In addition to the speed limits, which were researched for an injury-free cooperation, the design of a collaborative workplace between human and robot as well as the maximum possible working speed to ensure the well-being of a person must be taken into account. This speed influences the cooperation-factor of the person and also the productivity of the system.

The human-robot-collaboration influences various areas of industrial assembly. The sole consideration of economic strategies in order to choose whether or not to implement such systems is usually not sufficient for a qualified decision. A multi-dimensional assessment process is therefore a good solution to take an apt decision.

Abkürzungsverzeichnis

MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
Cobots	Kollaborativer Roboter
NWA	Nutzwertanalyse
HMD	Head-Mounted-Display

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: LBR iiwa, KUKA.....	9
Abbildung 2: YuMi, ABB	10
Abbildung 3:UR3, UR5, UR7, Universal Robots.....	11
Abbildung 4:Swayer, rethink robotics.....	12
Abbildung 5: Franka Emika Panda	12
Abbildung 6: Fanuc CR35iA; Fanuc.....	13
Abbildung 7: APAS, Bosch	14
Abbildung 8: Stäubli TX2, Stäubli	14
Abbildung 9: Yaskawa HC10, Yaskawa	15
Abbildung 10: Montage in der industriellen Produktion, (Lotter, 2002,168).....	18
Abbildung 11: Arten von kollaborativer Robotik, eigene Darstellung angelehnt an Bauer, et al. (2006)	20
Abbildung 12: Roboterhandführung nach ISO TS 15066.....	27
Abbildung 13:Sicherheitsgerichteter Stopp nach ISO TS 15066.....	27
Abbildung 14: Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung nach ISO TS 15066.....	28
Abbildung 15: Kraft- und/oder Leistungsbegrenzung nach ISO TS 15066.....	29
Abbildung 16:Kollisionsszenarien, nach ISO TS 15066	31
Abbildung 17: Körpermodell, ISO TS 15066.....	33
Abbildung 18: Graphische Darstellung der Geschwindigkeitsgrenzen, ISO TS 15066.....	40
Abbildung 19: Wirtschaftlichkeit von Produktionsparadigmen, angelehnt an Krüger et al. (2009).....	45
Abbildung 20: Trajektorien zur Abgrenzung des optimalen Einsatzgebiets von MRK, eigene Darstellung in Anlehnung an Jodlbauer (2017).....	50
Abbildung 21: Phasen der Akzeptanz, eigene Darstellung angelehnt an Fatzer (2001) ..	58

Formelverzeichnis

Formel 1: Maximal übertragene Energie, ISO TS 15066	37
Formel 2: Energie mit reduzierter Masse, ISO TS 15066.....	39
Formel 3: reduzierte Masse, ISO TS 15066	39
Formel 4: Effektive Masse des Roboters, ISO TS 15066	39
Formel 5: maximale Relativgeschwindigkeit, ISO TS 15066	40
Formel 6: Stückkosten, Jodlbauer (2017).....	46
Formel 7: Variable Kosten & Fixkosten Vergleich, Jodlbauer (2017)	47
Formel 8: Schnittpunkte je Ausbringungsmenge, Jodlbauer (2017)	47
Formel 9: Wechselkosten, Jodlbauer (2017).....	48
Formel 10:Stückkosten mit Wechselkosten, Jodlbauer (2017).....	48
Formel 11: Trajektorien, Jodlbauer (2017)	49