

Pilotstudie zur Roboterunterstützung des Menschen bei manueller Montage

Jens HEGENBERG¹, Daniel Wilhelm SCHIMPF¹, Nadja FISCHER²,
Ludger SCHMIDT¹

¹ *Fachgebiet Mensch-Maschine-Systemtechnik, Universität Kassel
Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel*
² *Volkswagen AG, 34219 Baunatal*

Kurzfassung: In diesem Beitrag wird ein Konzept zur Integration einer kollaborativen Roboterunterstützung an einem manuellen Montagearbeitsplatz vorgestellt. Dazu wurde exemplarisch ein Arbeitsplatz in der Wellenvormontage der Getriebefertigung in der Automobilindustrie betrachtet. Die Arbeitsprozesse bei der manuellen Montage wurden analysiert und das darauf basierende Konzept in einem vollfunktionsfähigen Mock-up umgesetzt, welcher die Montage ohne und mit Roboterunterstützung ermöglicht. Auf Basis dieses Mock-ups wurde eine Nutzerstudie (n = 8) durchgeführt, die die Ergonomie und Gebrauchstauglichkeit des Konzepts sowie das wirtschaftliche Potenzial der Roboterunterstützung evaluiert.

Schlüsselwörter: Mensch-Roboter-Kollaboration, Nutzerstudie, Montage

1. Einleitung

Mit der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK), der direkten Zusammenarbeit von Mensch und Roboter innerhalb eines festgelegten Arbeitsraums (DIN EN ISO 10218-1 2012), ist ein neues Produktionsparadigma entstanden, dessen wirtschaftliche Relevanz sich zwischen manuellen und mit Robotern vollautomatisierten Arbeitsprozessen einordnet (Matthias & Ding 2013).

Durch die Kombination menschlicher und technischer Fähigkeiten bietet MRK z. B. in wirtschaftlicher Hinsicht durch Reduktion der Montagezeiten bei relativ geringen Investitionskosten Potentiale (Görke et al. 2017). Zur Wirtschaftlichkeit gibt es allerdings kaum Vergleichsdaten und Erfahrungsberichte, die nicht im Marketingkontext von Anwendern oder Herstellern stehen. Empirisch abgesicherte, generalisierbare Aussagen zur Effizienzsteigerung erfordern weitere Forschungsarbeiten. Nicht zuletzt die Investitionskosten für die MRK-Erprobung führen dazu, dass diese vorwiegend in Großunternehmen erfolgt (Bauer et al. 2016). Der Einsatz kostengünstiger Standardkomponenten verringert gegenüber teuren Speziallösungen zwar das Spektrum unterstützbarer Montageaufgaben, ermöglicht aber auch kleinen und mittleren Unternehmen die MRK-Anwendung.

Ergonomische Verbesserungen und die Unterstützung des Menschen sind weitere wesentliche Vorteile des MRK-Einsatzes. Diese tragen zum Erhalt der Leistungsfähigkeit bei, die insbesondere angesichts des demographischen Wandels relevant ist (Schmidt & Luczak 2017). Obwohl es häufig ergonomisch kritische Tätigkeiten gibt, die durch kollaborierende Roboter unterstützt werden könnten, existieren bislang zu wenige Anwendungsfälle, um die Auswirkungen auf den Menschen und die Realisierbarkeit wissenschaftlich fundiert abschätzen zu können (Dachwitz 2017). Ein

aktueller praktischer Leitfaden findet sich bspw. bei Weber & Stowasser (2018).

Mangelnde Akzeptanz ist ein häufig nicht ausreichend gewürdigtes Nutzungshemmnis der MRK (Görke et al. 2017). Hierzu ist bspw. die Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit durch eine menschenzentrierte Gestaltung förderlich. Der Mensch muss den Vorteil des MRK-Einsatzes subjektiv wahrnehmen und darf sich durch den Roboter weder gefährdet, noch gehetzt oder ausgebremst fühlen.

Zum Einfluss von Gestaltungsvarianten des Robotersystems auf die Effizienz, Akzeptanz und wahrgenommene Beanspruchung des Menschen gibt es trotz zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen noch erheblichen Forschungsbedarf. Exemplarisch seien hier Untersuchungen genannt, die eine Verringerung der Akzeptanz durch größere Roboter (Charalambous et al. 2016) bzw. deren Steigerung durch Visualisierung des aktuellen und zukünftigen Roboterzustands (Liu et al. 2016) zeigten. Weitere Freiheitsgrade der Gestaltung betreffen zumeist den Bewegungsablauf des Roboters. Variiert werden bspw. der Roboterpfad (Kuz et al. 2015), die Maximalgeschwindigkeit (Koppenborg et al. 2017), der Abstand zum Menschen (Stark et al. 2018) oder das Timing zwischen den Aufgaben des Roboters und des Menschen (Huber et al. 2013). Bei der Auslegung müssen diese Parameter gegeneinander abgewogen werden. So wirken sich bspw. hohe Geschwindigkeiten positiv auf die Effizienz, aber negativ auf das Sicherheitsgefühl und damit die Akzeptanz aus. Generelle Empfehlungen existieren kaum. Bzgl. der Maximalgeschwindigkeit geben die Hersteller bspw. einen üblichen Wert von 1,4 m/s an (Koppenborg et al. 2017), in aktuellen Normen sind allerdings keine Richtwerte zu finden.

Verbesserungspotenzial bieten viele Studien hinsichtlich der Realitäts- bzw. Praxisnähe der Versuchsaufbauten. So werden bspw. Studien zum Einfluss des Roboters auf das Sicherheitsempfinden des Menschen teilweise vollständig VR-basiert (Koppenborg et al. 2017) oder häufig anhand künstlicher Aufgaben z. B. mit Bausteinen (Stark et al. 2018) durchgeführt. Die Übertragbarkeit auf reale Anwendungen gilt es zumindest kritisch zu hinterfragen. Im Folgenden wird eine Pilotstudie vorgestellt, die sich auf Effizienz und Beanspruchung im praxisnahen MRK-Einsatz fokussiert.

2. Roboterunterstützter Montageprozess

Der hier betrachtete Montageprozess orientiert sich an der Wellenvormontage der Getriebefertigung eines Automobilherstellers. Im Rahmen einer mehrstündigen teilnehmenden Beobachtung wurden die Arbeitsschritte und deren in aller Regel feste Reihenfolge erhoben. Abbildung 1 (links) zeigt die zu fügenden Komponenten und die notwendigen Montageschritte. Zuerst werden die drei Wellen eines Wellenpakets in die Aufnahmen eines Werkstückträgers (WT) auf einer Förderanlage aufgelegt. Anschließend werden diese mit Anbauteilen gefügt und der WT zum Abtransport freigegeben. Alle Teile werden am Arbeitsplatz bereitgestellt.

Für die Studie wurde ein Mock-up aufgebaut, der den Arbeitsprozess mit und ohne Roboterunterstützung ermöglicht (Abbildung 1 rechts). Die WT werden an den Montagearbeitsplatz gefördert, dort bestückt und nach Verlassen des Arbeitsplatzes von einem Helfer entladen, um sie der Förderanlage erneut zuführen zu können. Der Roboter ist hinter dem Arbeitsplatz positioniert. Links und rechts oberhalb der WT werden die zu fügenden Komponenten in Kleinladungsträgern bereitgestellt. Die Wellen befinden sich hinter dem Roboter bzw. werden auf einem Tisch links neben

dem Arbeitsplatz bereitgestellt. Ein RGB-D-Sensor links oberhalb des Arbeitsplatzes erfasst die Position und den Zustand der WT und der Werkstücke.

Zur Absicherung der Vergleichbarkeit des realen und des Arbeitsprozesses am Mock-up wurde je eine MTM-UAS-Analyse durchgeführt, die einen Unterschied der Montagezeiten von lediglich knapp 1 % bzw. 0,4 s ergaben.

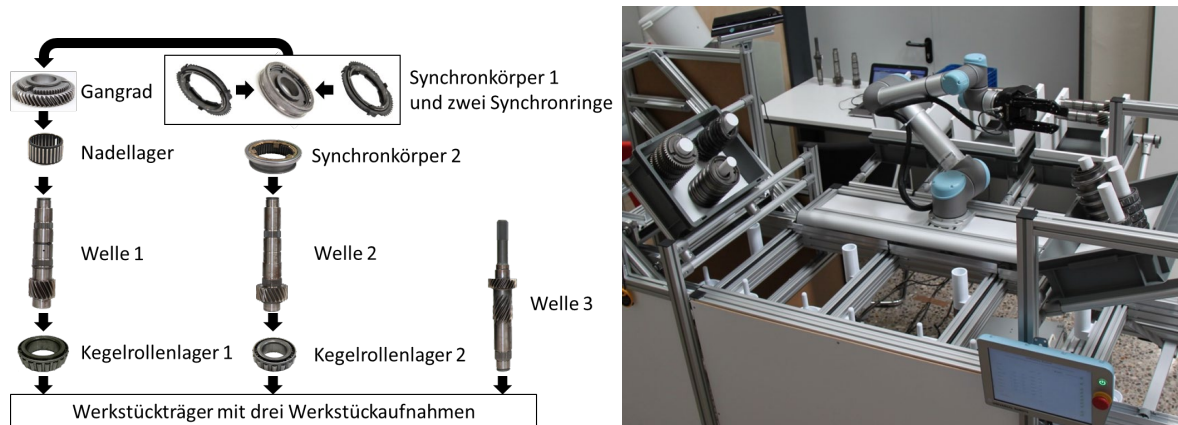


Abbildung 1: Links: Die drei Wellen und die zu montierenden Komponenten. Die Pfeile stellen jeweils einen Montageschritt dar. Rechts: Mock-up des MRK-Arbeitsplatzes aus Sicht des Menschen. Links und rechts über dem Fördersystem finden sich die zu fügenden Komponenten, dahinter der Roboter und wiederum dahinter die Wellen.

Eine Ergonomieverbesserung soll durch die Reduktion der physischen Belastung erreicht werden. Dazu wird die Handhabung der Wellen als schwerste Bauteile (je ca. 2 kg) vom Roboter übernommen. Obwohl die Masse der Wellen in gängigen Beanspruchungsanalysen nicht als kritisch eingestuft wird, summiert sie sich pro Schicht auf 3 Tonnen/Schicht (ca. 500 WT/Schicht). Für ältere oder leistungsgewandelte Menschen könnte dies durchaus eine kritische Größenordnung darstellen. Das Fügen der übrigen Bauteile wird vom Menschen übernommen, da es eine hohe motorische und sensorische Präzision sowie teilweise eine beidhändige Handhabung erfordert. Eine Effizienzsteigerung soll durch Reduktion der Montagezeiten erfolgen. Dazu sollten Roboter und Mensch gleichzeitig mit möglichst durchgängig hoher Auslastung und ohne gegenseitige Wartezeiten arbeiten. Eine MTM-UAS-Analyse ergab, dass das Auflegen der Wellen durch den Roboter die Montagezeit pro WT von 44 s auf 35 s senken könnte. Anhand des erfassten WT-Zustands werden die Tätigkeiten von Roboter und Mensch synchronisiert. Sobald der Mensch die Kegelrollenlager in die Werkstückaufnahmen eingelegt hat, beginnt der Roboter mit dem Auflegen der Wellen.

3. Methodik

Die Evaluation sollte u. a. die Ergonomie und Gebrauchstauglichkeit des Mock-ups und der Roboterunterstützung prüfen. Beides wurde qualitativ, die Gebrauchstauglichkeit mittels des System-Usability-Scale-(SUS-)Fragebogens auch quantitativ bewertet. Hinsichtlich der Effizienz wurde die Hypothese aufgestellt, dass der Arbeitsprozess mit Roboterunterstützung einen Effizienzgewinn gegenüber dem ursprünglichen manuellen Arbeitsprozess ermöglicht. Die Effizienz wurde durch

Betrachtung der Montagezeit operationalisiert. Dazu wurde der Versuch auf Video aufgezeichnet und die Zeiten im Nachgang anhand des Videos ermittelt.

Die Studie wurde anhand des Mock-ups durchgeführt. Dabei wurde die Geschwindigkeit des Roboters derart festgelegt, dass ein Proband die Geschwindigkeit noch als angenehm empfand und der Versuchsleiter sie noch als vertretbar einschätzte. Der Versuchsleiter musste in Notfällen mittels Not-Stopp-Schalter jederzeit eingreifen können. Bei der gewählten Robotergeschwindigkeit könnte der Arbeitsprozess rechnerisch pro WT ca. 7,5 s schneller sein als ohne Roboterunterstützung. Im Testlauf wurde diese minimale Montagezeit nie erreicht.

Die Studie folgte einem Within-Subject-Design, bei dem jeder Proband in permuierter Reihenfolge einmal mit und einmal ohne Roboterunterstützung sechs Wellenpakete montierte. Diesen beiden Versuchsdurchgängen wurde eine Trainingsphase vorgelagert, während der der Proband sechsmal unter Anleitung die Montage des Wellenpakets am Mock-up ohne Roboterunterstützung und ohne Zeitmessung durchführte. Der Arbeitsablauf wurde dem Probanden freigestellt. Dem Durchlauf mit Roboterunterstützung wurde eine weitere Trainingsphase vorgelagert, in der zwei Wellenpakete unter Anleitung und mit Roboterunterstützung montiert wurden. Diese zweite Trainingsphase diente dazu, die Reihenfolge der Arbeitsschritte des Roboters, seine Trajektorien und seine Geschwindigkeit kennenzulernen. Nach dem Durchlauf mit Roboterunterstützung wurde der SUS-Fragebogen ausgefüllt, wobei die Probanden gebeten wurden, ihn ausschließlich auf die Roboterunterstützung zu beziehen. Der Versuch dauerte bis zu 1,5 Stunden.

Die Pilotstudie hatte acht Teilnehmer, davon sieben männlich und einer weiblich. Das Alter der Versuchspersonen lag zwischen 23 und 30 Jahren ($M = 25,4$ Jahre; $SD = 2,3$ Jahre). Eine Person hatte bereits Erfahrung in der industriellen Montage.

4. Ergebnisse

Die quantitative Bewertung der Gebrauchstauglichkeit der Roboterunterstützung ergab mit SUS-Werten zwischen 70 und 95 ($M = 81,3$; $SD = 8,3$) ein Ergebnis, das üblicherweise Systeme beschreibt, die von Nutzern akzeptiert werden (ab einem SUS-Wert von 70). Bei einer Interpretation des Ergebnisses in Schulnoten entspräche die Bewertung der Schulnote „gut“.

Bei der qualitativen Bewertung wurden von den Probanden Verbesserungsmöglichkeiten benannt, die das System weiter verbessern könnten. Exemplarisch wurde vorgeschlagen, die Materialbereitstellung in einen Bereich außerhalb des Roboterarbeitsraumes zu verlegen, da in einem Arbeitsschritt wiederholt um den Roboter herum gegriffen bzw. auf das Entfernen des Roboters aus dem Bereich gewartet werden musste. Einige Probanden bewerteten die Ergonomie der Materialbereitstellung kritisch, da diese zu hoch angebracht sei. Zur Beanspruchung wurde geäußert, dass die Arbeit mit Roboter „entspannter“ sei und zur Akzeptanz des gemeinsamen Arbeitsbereichs, dass der Roboter kein Angstgefühl auslöst. Weitere Verbesserungsvorschläge bezogen sich auf den Wunsch nach bspw. akustischen Rückmeldungen des Roboters.

Die Montagezeit wurde um vereinzelt aufgetretene technisch bedingte Wartezeiten bereinigt. Sie wurde definiert als die Zeit zwischen dem Startzeichen des Versuchsleiters und der Freigabe des letzten bestückten WT durch den Probanden. Boxplots der bereinigten Zeiten sind in Abbildung 2 (links) dargestellt. Die Montagezeiten ohne Roboterunterstützung lagen zwischen 224 s und 314 s ($M = 269,5$ s; $SD = 26,3$ s)

und mit Roboterunterstützung zwischen 265 s und 341 s ($M = 283,6$ s; $SD = 26,3$ s). Mit Roboterunterstützung benötigten die Probanden somit im Mittel 14,1 s mehr Zeit. Einem Shapiro-Wilk-Test nach kann eine Normalverteilung der Messwertdifferenzen angenommen werden ($p = 0,582$). Ein abhängiger t-Test mit Konfidenzintervall von 95 % ergab keinen signifikanten Unterschied ($t(7) = -1,6285$, $p = 0,147$). Die Hypothese der Effizienz-verbesserung durch Roboterunterstützung kann somit nicht bestätigt werden.

Abbildung 2 (rechts) zeigt die Montagezeiten nach Reihenfolge der Versuchsbedingungen. Es zeigt sich, dass Probanden, die mit Roboterunterstützung begannen, ohne Roboterunterstützung deutlich schneller waren als Probanden, die ohne Roboterunterstützung starteten. Dieser Unterschied ist hoch signifikant (Shapiro-Wilk: $p = 0,235$; abhängiger t-Test: $t(3) = -7,089$, $p = 0,0058$).

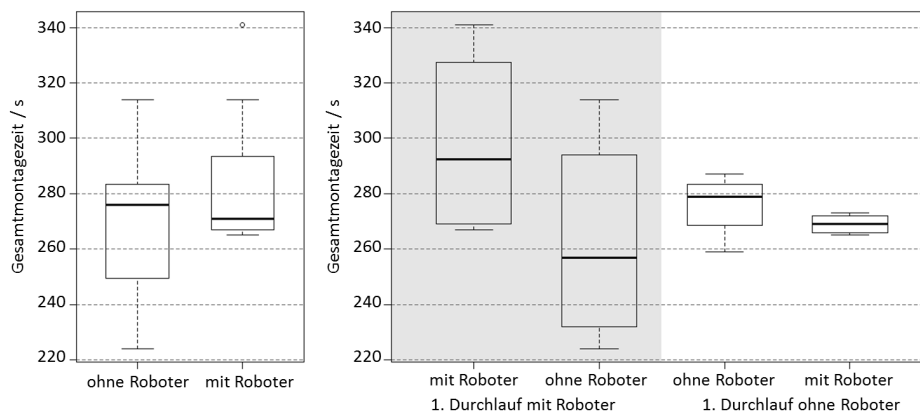


Abbildung 2: Links: Gesamtmontagezeit für sechs Wellenpakete ($n = 8$). Rechts: Gesamtmontagezeit nach Reihenfolge der Versuchsbedingungen gruppiert.

5. Diskussion

Die ermittelten SUS-Werte lassen die Schlussfolgerung zu, dass es sich bei der Roboterunterstützung um ein gebrauchstaugliches System handelt, welches jedoch noch Potential zur Verbesserung hat. Dieses Ergebnis spiegeln auch die von den Probanden genannten Verbesserungsmöglichkeiten wider.

Ein Effizienzvorteil des MRK-Arbeitsprozesses konnte nicht nachgewiesen werden. Die Montagezeiten waren im Mittel mit Roboterunterstützung sogar größer. Die Ursache hierfür könnte in der relativ geringen Geschwindigkeit des Roboters liegen. Bei den Montagezeiten ist auffällig, dass sechs der acht Versuchspersonen mit Roboterunterstützung eine Montagezeit zwischen 265 s und 273 s erreichten. Dieses Intervall liegt nah an der minimalen Ausführungszeit des Roboters zum Auflegen sämtlicher Wellen von 260 s. Es ist folglich naheliegend, dass die Probanden teilweise auf den Roboter warten mussten. Die Ausführungszeit des Roboters liegt mit 43,3 s pro Wellenpaket nur knapp unterhalb der per MTM-UAS-Analyse ermittelten Montagezeit ohne Roboterunterstützung von 44 s. Da sich die Probanden subjektiv sicher fühlten, wäre eine höhere Robotergeschwindigkeit prinzipiell möglich, deren Akzeptanz verlässlich sichergestellt werden muss. Weiterhin könnten optimierte Robotertrajektorien durch kürzere Wege die Ausführungszeit weiter verkürzen. Diese könnten zusätzlich die von den Probanden benannten Konflikte bei Tätigkeiten im gleichen Arbeitsraum verhindern, die die Probanden teils durch Abwarten, bis der Roboter fertig war, auflösten. Eine weitere mögliche Ursache liegt im initialen Zu-

stand des Roboters. Dieser hat anfangs noch keine Welle gegriffen, so dass eine kurze Wartezeit entsteht. Im laufenden Arbeitsprozess geschieht dies nicht, da das Greifen der ersten Welle zeitlich parallel mit der WT-Freigabe und dem Einlegen der Kegelrollenlager passiert. Diese initiale Wartezeit fällt bei den relativ kurzen Versuchszeiten besonders ins Gewicht. Die Erkennung der eingelegten Kegelrollenlager verursachte pro WT eine weitere Verzögerung von ca. 1-2 s, die kaum durch parallelisierbare Tätigkeiten kompensiert werden konnte, so dass sehr schnell Wartezeiten entstanden.

Die Zeitdifferenz bei Betrachtung nach Reihenfolge der Versuchsbedingungen zeigt, dass Lerneffekte in signifikantem Umfang auftreten. Die Ursache könnte darin liegen, dass die vorstrukturierte Arbeitsweise mit Roboterunterstützung das Erlernen einer effizienten Vorgehensweise begünstigt. Daher sollte die Trainingsphase grundsätzlich verlängert werden und die effiziente Bearbeitungsreihenfolge des MRK-Prozesses bereits zu Beginn vorgeschlagen werden.

Die Pilotstudie zeigte technische Optimierungspotentiale, aber auch systematische Fehlerquellen im Versuchsdesign, die in einer nachfolgenden Studien bereits adressiert wurden. Dabei zeigten sich positive Effekte der MRK sehr deutlich.

6. Literatur

- Bauer W, Bender M, Braun M, Rally P, Scholtz O (2016) Leichtbauroboter in der manuellen Montage - Einfach einfach anfangen: Erste Erfahrungen von Anwenderunternehmen. Stuttgart: Fraunhofer IAO
- Charalambous G, Fletcher S, Webb P (2016) The Development of a Scale to Evaluate Trust in Industrial Human-robot Collaboration. In: Int J of Social Robotics 8, Nr. 2, 193–209
- Dachwitz J (2017). Zukunftsorientierte Arbeitsplatzgestaltung unter Anwendung der Mensch-Roboter-Kooperation – Ergebnisse einer qualitativen Studie. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg.): Soziotechnische Gestaltung des digitalen Wandels - kreativ, innovativ, sinnhaft. Dortmund: GfA-Press, 1-6 (F.2.2)
- DIN EN ISO 10218-1 (2012) Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen, Teil 1: Roboter
- Görke M, Blankemeyer S, Pischke D, Oubari A, Raatz A, Nyhuis P (2017). Sichere und akzeptierte Kollaboration von Mensch und Maschine. In: Zeitschrift für wirtsch. Fabrikbetrieb 112 (1-2): 41-45
- Huber M, Lenz C, Wendt C, Färber B, Knoll A, Glasauer S (2013) Predictive Mechanisms increase Efficiency in Robot-supported Assemblies : An Experimental Evaluation. In: IEEE Robotics and Automation Society (Hrsg.): The 22nd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. Piscataway: IEEE
- Koppenborg M, Nickel P, Naber B, Lungfiel A, Huelke M (2017) Effects of movement speed and predictability in human-robot collaboration. In: Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries 27, Nr. 4, 197-209
- Kuz S, Schlick C, Lindgaard G, Moore D (2015) Anthropomorphic motion control for safe and efficient human-robot cooperation in assembly system. In: Lindgaard, G. ; Moore, D. (Hrsg.): Proceedings of the 19th Triennial Congress of the IEA (Melbourne 2015). IEA, Thônex, 1-7 (1126)
- Liu D, Kinugawa J, Kosuge K (2016) A projection-based making-human-feel-safe system for human-robot cooperation. In: Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE, Piscataway, 2016, 1101-1106
- Matthias B, Ding H (2013). Die Zukunft der Mensch-Roboter Kollaboration in der industriellen Montage. Internationales Forum Mechatronik
- Schmidt L, Luczak H (2017). Gestaltung von Arbeitssystemen nach ergonomischen und gesundheitsförderlichen Prinzipien. In: Spath, D.; Westkämper, E.; Bullinger, H.-J. & Warnecke, H.-J. (Hrsg.). Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation. Berlin: Springer Vieweg, 369-409
- Stark J, Mota RRC, Sharlin E (2018) Personal Space Intrusion in Human-Robot Collaboration. In: Association for Computing Machinery (Hrsg.): HRI '18 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. New York: ACM, 245-246
- Weber MA, Stowasser S (2018) Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung unter Einsatz kollaborierender Robotersysteme: Eine praxisorientierte Einführung. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 72: 229-238



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Arbeit interdisziplinär analysieren – bewerten – gestalten

65. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Professur Arbeitswissenschaft
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
Technische Universität Dresden

Institut für Arbeit und Gesundheit
Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung

27. Februar – 1. März 2019

GfA-Press

Bericht zum 65. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 27. Februar – 1. März 2019

**Professur Arbeitswissenschaft, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme,
Technische Universität Dresden;
Institut für Arbeit und Gesundheit, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Dresden**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2019
ISBN 978-3-936804-25-6

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**

Schriftleitung: Matthias Jäger

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Konferenzband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Konferenzband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

Screen design und Umsetzung

© 2019 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de