

# Human Factors zu Robotergeschwindigkeit und – distanz in der virtuellen Mensch-Roboter-Kollaboration

Birgit NABER, Andy LUNGFIEL, Peter NICKEL und Michael HUELKE

*Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA),  
Alte Heerstrasse 111, D-53757 Sankt Augustin*

**Kurzfassung:** Die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) erlaubt eine direkte Mensch-Roboter-Interaktion (MRI) im gemeinsamen Arbeitsraum. Auswirkungen von Distanz zum Roboter und Robotergeschwindigkeit auf die Performanz und die Gefahrenkognition wurden während der Bearbeitung von Aufgaben am virtuellen MRK-Arbeitsplatz untersucht. Die Ergebnisse zeigen überraschend eine beeinträchtigte Performanz bei geringeren Bewegungsgeschwindigkeiten des Roboters und eine erwartungsgemäße erhöhte Gefahrenkognition bei näherer Distanz zum Roboter. Mögliche Auswirkungen auf die Gestaltung einer sicheren MRK werden diskutiert.

**Schlüsselwörter:** Mensch-Roboter-Kollaboration, Virtuelle Realität, Systemergonomie, Gefahrenkognition, Prävention, Human Factors.

## 1. Einleitung

Eine Mensch-Roboter Kollaboration (MRK) erlaubt eine direkte Interaktion des Menschen mit einem Industrieroboter in einem gemeinsamen Arbeitsraum, d.h. der Mensch und der Roboter werden nicht wie bisher räumlich oder zeitlich voneinander getrennt. Durch einen Wegfall von Schutzzäunen werden effektivere Abläufe und ein geringerer Platzbedarf erwartet. Aufgrund der Kooperation von Mensch und Roboter und die Ausnutzung der jeweiligen Stärken lassen sich viele Produktionsprozesse rationalisieren, welches zur Steigerung der Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit führen kann (Schenk & Elkmann 2012). Um diese Vorteile in der MRK nutzen zu können müssen Anforderungen aus dem Arbeitsschutz erfüllt sein.

In der Normung wird die MRK aufgegriffen in der überarbeiteten DIN EN ISO 10218-1: 2012, in der Erweiterung DIN EN ISO 10218-2: 2012 mit Fokus auf die gesamte Roboteranlage und in der in Abstimmung befindlichen ISO/TS 15066: 2012. In der TS 15066 werden zu beachtende Aspekte für die Risikobeurteilung von Anlagen mit MRK weiter vertieft. Trotz neuer Normenlage entfallen in der Betriebsart 'speed and separation monitoring' Grenzwerte für Geschwindigkeit und Abstand, so dass die Anforderungen an die durchzuführende Risikobeurteilung steigen. Mit Hilfe des Sicherheitsabstandes (DIN EN ISO 13855: 2010) kann der erlaubte Mindestabstand mit der zugehörigen Geschwindigkeit berechnet werden. Dieser Mindestabstand berücksichtigt allerdings nur mechanische Gefährdungen. Mögliche Gefährdungen durch psychische Belastung (DIN EN ISO 10075-1: 2000) werden noch nicht detailliert berücksichtigt. Prozesse menschlicher Informationsverarbeitung sind bei der Gestaltung einer MRK zu optimieren um Fehlhandlungen oder Beeinträchtigungen des Mitarbeiters während der Aufgabenbearbeitung zu vermeiden. So weist die Literatur zur MRI (z.B. Bortot et al. 2012; Karwowski et al. 1992) sowohl die Distanz zum Roboter als auch die Bewegungsgeschwindigkeit als Faktoren aus, die aus Human Factors Sicht eine Gefährdung darstellen können.

In einer Simulationsstudie in virtueller Realität (VR) wird daher der Frage nachgegangen, inwieweit sich bei solchen zukünftigen Arbeitsformen wie der MRK die Robotergeschwindigkeit und -distanz auf Prozesse der menschlichen Informationsverarbeitung auswirken können. Diese Studie wird im Rahmen des Verbundprojekts „EslMiP – Effiziente und sichere Interaktion von Menschen mit intelligenten Produktionsanlagen“ von der Bayerischen Forschungsförderung gefördert und vom Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) bearbeitet.

## 2. Methode

Ein industrielles Arbeitsszenario für eine MRK wurde zur Durchführung der Untersuchung im SUTAVE-Labor des IFA ([www.dguv.de/ifa/sutave](http://www.dguv.de/ifa/sutave)) in gemischter Realität aufgebaut. Durch die Simulation eines Roboters in VR im Kollaborationsraum ging von potentiellen Gefährdungen zwar keine reale Gefahr aus, es konnte aber dennoch realitätsnahes Verhalten in der MRK erfasst werden.

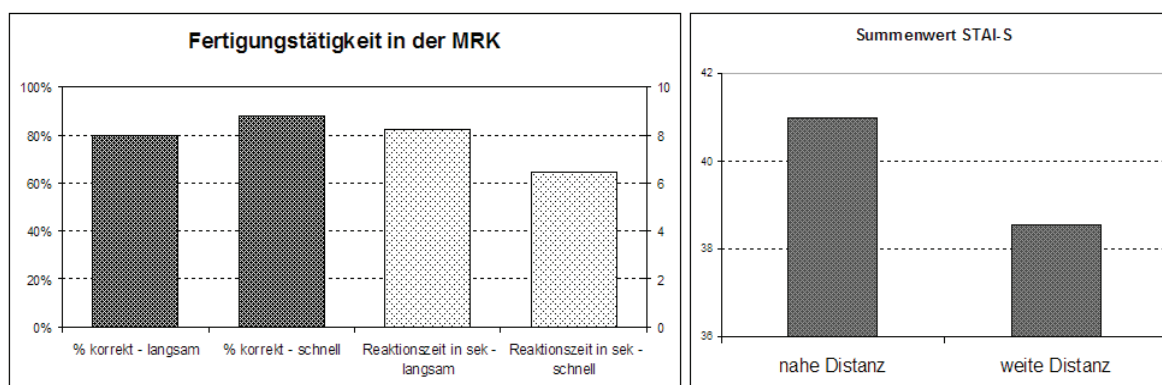
Die Probanden bearbeiteten während der Untersuchung zwei Aufgaben. Eine Aufgabe wird in direkter Interaktion mit dem Industrieroboter durchgeführt (Roboter-Interaktionsaufgabe, RIA). Dabei holt der Roboter über festgelegte Trajektorien ein Werkstück aus einer Kiste und präsentiert das Werkstück dem Probanden zur Qualitätskontrolle. Nach der Qualitätskontrolle sortiert der Roboter das Werkstück in die vorgesehene Kiste. Parallel dazu waren anspruchsvolle Anforderungen aus Fertigungstätigkeiten über eine Aufgabe zum logischen Denken (LDA; vgl. Shingledecker 1984) auf einem Notebook an einem dem Roboter frontal gegenüberliegenden Steharbeitsplatz zu meistern. Die Qualitätskontrolle soll mit vorrangiger Priorität behandelt werden. Die Anzahl der zu bearbeitenden Aufgaben wurden für die Faktorstufen der unabhängigen Variablen konstant gehalten.

Die Auswirkung von Geschwindigkeit und Nähe des Roboters auf die Performanz, die Gefahrenkognition und die Beanspruchung der Probanden wurde in einem gemischten 2x2x2 faktoriellen Design mit 28 Probanden (20 männlich;  $M = 38,4$ ,  $SD = 12,9$  Jahre) untersucht. Die Aufgabenbearbeitung wurde in Distanzen zum Roboter mit 30 cm und 140 cm innerhalb eines Versuchsdurchgangs variiert (matched samples) und die Reihenfolge der Distanzen über Probanden balanciert ( $N_{\text{nah-weit}} = 15$ ,  $N_{\text{weit-nah}} = 13$ ). Die Geschwindigkeit des Roboters wurde mit 25 cm/s und 150 cm/s abgestuft. Zur Bewertung der Auswirkungen von Geschwindigkeit und Nähe des Roboters wurden Parameter der Aufgabenleistung, der Psychophysiologie und des Empfindens (zur Gefahrenkognition vgl. Naber et al. 2012a,b, zum Angst-Empfinden nach STAI, vgl. Laux et al. 1981 und zur Beanspruchung nach NASA-TLX, vgl. Hart & Staveland 1988) erhoben.

## 3. Ergebnisse

Die Auswertung der Performanz für die Bearbeitung der Qualitätskontrollaufgabe während der RIA (vgl. Abbildung 1) zeigten signifikant kürzere Antwortzeiten in der näheren Distanz ( $M_{\text{nah}} = 5,14$ ,  $SD_{\text{nah}} = 0,84$ ) im Vergleich zur weiteren Distanz ( $M_{\text{weit}} = 5,45$ ,  $SD_{\text{weit}} = 0,99$ ) ( $F(1,24) = 12,45$ ,  $p = 0,002$ ,  $\eta_{p2} = 0,34$ ). Ein systematischer Einfluss der Geschwindigkeit des Roboters auf die Aufgabenbearbeitung der RIA konnte nicht aufgedeckt werden. Die Bearbeitungsqualität der Aufgabe war ebenso nicht signifikant

durch die Distanz zum Roboter oder durch die Robotergeschwindigkeit beeinflusst. Sowohl die Antwortzeit ( $F(1,24) = 10,79$ ,  $p = 0,002$ ,  $\eta_{p2} = 0,31$ ) als auch ihre Qualität (Prozent der richtigen Antworten) ( $F(1,24) = 4,89$ ,  $p = 0,037$ ,  $\eta_{p2} = 0,169$ ) zur Bearbeitung der Fertigungstätigkeit (LDA) wiesen einen signifikant unterschiedlichen Einfluss der Robotergeschwindigkeit auf. Für die Bearbeitung dieser Aufgabe fielen bei der schnelleren Robotergeschwindigkeit die Antwortzeiten geringer aus ( $M_{\text{langsamer}} = 8252$  ms,  $SD_{\text{langsamer}} = 1668$ ,  $M_{\text{schneller}} = 6496$  ms,  $SD_{\text{schneller}} = 1316$ ) und wiesen weniger Bearbeitungsfehler auf ( $M_{\text{langsamer}} = 79,42\%$ ,  $SD_{\text{langsamer}} = 12,69$ ,  $M_{\text{schneller}} = 88,13\%$ ,  $SD_{\text{schneller}} = 11,06$ ).



**Abbildung 1:** Performanz der Fertigungstätigkeit und erlebtes Angstempfinden (Summenwert STAI-S) bei unterschiedlichen Robotergeschwindigkeiten und Distanzen zum Roboter

Dem gegenüber zeigten allerdings die Analysen zum Angstempfinden, zur Gefahrenkognition und zur Gefahrenwahrnehmung ein anderes Bild. Die empfundene Angst nach STAI-Swar bei näherer Distanz zum Roboter ( $M_{\text{nah}} = 41,00$ ,  $SD_{\text{nah}} = 8,04$ ) signifikant höher als bei weiterer Distanz ( $M_{\text{weit}} = 38,54$ ,  $SD_{\text{weit}} = 7,33$ ;  $F(1,24) = 4,34$ ,  $p = 0,045$ ,  $\eta_{p2} = 0,153$ ). Auch in der Gefahrenkognition spiegelte sich ein solcher Effekt wider. Die unterschiedenen Robotergeschwindigkeiten zeigten keinen signifikanten Einfluss auf das Angstempfinden und die Gefahrenkognition.

#### 4. Diskussion

Die vorliegende Studie weist für die Bearbeitung von Aufgaben in einer virtuellen MRK systematische Auswirkungen sowohl der Robotergeschwindigkeit als auch der Distanz zum Roboter auf die Performanz und das Erleben der Probanden aus. Die Auswertung der Leistung der Fertigungstätigkeit (LDA) suggeriert zunächst überraschend eine bessere Leistung bei der höheren Robotergeschwindigkeit. Durch die Berücksichtigung einer niedrigen Geschwindigkeit, wie sie im Wartungsbetrieb verwendet wird, kann vermutet werden, dass die Probanden ihren Arbeitsrhythmus besser an die relativ höhere Geschwindigkeit adaptieren konnten. Dafür sprechen konsistente Erkenntniseaus anderen Studien der MRI (z.B. Etherton & Sneckenberger 1990; Bortot et al. 2012). Außerdem könnte eine verminderte Leistung bei der langsameren Geschwindigkeit auch durch notwendige Wartezeiten entstanden sein, da der Roboter mehr Zeit benötigte um die Bearbeitungspositionen anzufahren.

Die Ergebnisse zur Performanz der RIA erschienen ebenso zunächst ungewöhnlich, da diese Aufgabe bei naher Distanz zum Roboter schneller bearbeitet werden konnte. Allerdings zeigte sich auch, dass die Aufgabenbearbeitung in näherer Distanz zum Roboter als gefährlicher wahrgenommen wurde. Mit Bezug auf hier relevant er-

scheinende Kompensationsmechanismen menschlicher Arbeitsleistung nach Richter & Hacker (1998) könnte auch davon ausgegangen werden, dass insbesondere das höhere Angstempfinden und die höhere Gefahrenkognition bei näherer Distanz Steigerung der Aktivierung und damit der Bearbeitungsleistung bewirkten.

Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Wahl angemessener Robotergeschwindigkeiten und Distanzen zum Roboter spezifisch auf den Kontext der Aufgabenbearbeitung abgestimmt werden sollte. Eine differenzierte Klärung mit feineren Abstufungen, der hier berücksichtigten Faktoren, erscheint dringend erforderlich, bevor verbindliche Empfehlungen aus Human Factors Sicht abgegeben werden. Die Arbeitswissenschaft und insbesondere die Arbeitsschutzforschung sind in diesem Bereich gefordert, um zu einer Differenzierung von Anforderungen aus Human Factors für die Gestaltung einer sicheren MRK beizutragen.

## 5. Literatur

1. Bortot, D., Hawe, B., Schmidt, S. & Bengler, K. 2012. Industrial robots - the new friends of an aging workforce? In: S. Trzcieliński & W. Karwowski (Hrsg.), *Advances in ergonomics in manufacturing*, 4th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, San Francisco, July 21-25 2012. Boca Raton: CRC Press, 253–262.
2. DIN EN ISO 10075-1: 2000, Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 1: Allgemeines und Begriffe. Berlin: Beuth.
3. DIN EN ISO 10218-1: 2012, Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 1: Roboter. Berlin: Beuth.
4. DIN EN ISO 10218-2: 2012, Industrieroboter- Sicherheitsanforderungen - Teil 2: Robotersysteme und Integration. Berlin: Beuth.
5. DIN EN ISO 13855: 2010, Sicherheit von Maschinen – Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen. Berlin: Beuth.
6. Etherton, J. & Sneckenberger, J. E. 1990, A robot safety experiment varying robot speed and contrast with human decision cost, *Applied Ergonomics*, 21, 231-263.
7. Hart, S.G. & Staveland, L. E. 1988, Development of the NASA task load index (TLX): Results of empirical and theoretical research. In: P.A. Hancock & N. Meshkati (Ed.), *Human mental workload*. Amsterdam: North-Holland, 139-183.
8. ISO/TS 15066: 2011, Robots and robotic devices – Collaborative robots (under development). Genf: ISO.
9. Karwowski, W., Pasai, H., Soundararajan, A. & Pongpatanasuegsa, N. 1992, Estimation of Safe Distance from the Robot Arm as a Guide for Limiting Slow Speed of Robot Motions In: *Proceedings of the Human Factors Society 36th Annual Meeting 1992*, 992-996.
10. Koppenborg, M., Lungfiel, A., Naber, B. & Nickel, P. 2013, Auswirkung von Autonomie und Geschwindigkeit in der virtueller Mensch-Roboter-Kollaboration. In: *Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg.), Chancen durch Arbeits-, Produkt- und Systemgestaltung - Zukunftsfähigkeit für Produktions- und Dienstleistungsunternehmen*. Dortmund: GfA-Press, 417.
11. Laux L., Glanzmann, P. Schaffner, P. & Spiegelberger, C. 1981, *State Trait Angst Inventar (STAI)*. Weinheim: Beltz.
12. Naber, B., Nickel, P. Huelke, M. & Lungfiel, A. 2012a, Einfluss von Geschwindigkeit und Nähe eines Roboters auf Leistung und Beanspruchung in virtueller Mensch-Roboter-Kollaboration. In: *GfA (Hrsg.) Gestaltung nachhaltiger Arbeitssysteme*. Dortmund: GfA Press, 227-230.
13. Naber, B., Nickel, P., Huelke, M. & Lungfiel, A. 2012b, An Investigation in Virtual Reality on Human Factors Requirements for Human-Robot-Collaboration, In: *Proceedings of the 6th International Working on Safety Conference 'Towards Safety Through Advanced Solutions' (WOS2012)*, Sep 11-14, Sopot, Poland, 72-73.
14. Richter, P. & Hacker, W. 1998, *Belastung und Beanspruchung. Stress, Ermüdung und Burnout im Arbeitsleben*. Kröning: Asanger.
15. Schenk, M. & Elkmann, N. 2012, Sichere Mensch-Roboter-Interaktion: Anforderungen, Voraussetzungen, Szenarien, und Lösungsansätze. In: E. Müller (Ed.), *Demographischer Wandel – Herausforderung für die Arbeits- und Betriebsorganisation der Zukunft*. Berlin: GITO-Verlag, 109-120.



Gesellschaft für  
Arbeitswissenschaft e.V.

**Chancen durch Arbeits-,  
Produkt- und  
Systemgestaltung –  
Zukunftsfähigkeit für  
Produktions- und  
Dienstleistungsunternehmen**

59. Kongress der  
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Fachhochschule Krefeld

27. Februar bis 01. März 2013

Bericht zum 59. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 27.02. bis 01.03.2013  
an der FH Niederrhein, herausgegeben von der  
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Dortmund: GfA-Press

ISBN 3- 978-3-936804-14-0

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript gedruckt. Diese Schrift ist nur bei der Gesellschaft für  
Arbeitswissenschaft e.V., Ardeystraße 67, 44139 Dortmund, erhältlich.  
E-Mail: [gfa@ifado.de](mailto:gfa@ifado.de), Internet: [www.gfa-online.de](http://www.gfa-online.de)

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**

**Schriftleitung: apl. Prof. Dr. M. Schütte**

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist  
es nicht gestattet, die Broschüre oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Foto-  
kopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen.

Druck: City Druck, Heidelberg      Technische Gestaltung: Stefan Cavadini  
Printed in Germany





Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Jahresdokumentation 2013

---

# **Chancen durch Arbeits-, Produkt- und Systemgestaltung – Zukunftsfähigkeit für Produktions- und Dienstleistungsunternehmen**

Bericht zum 59. Kongress der  
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft  
vom 27. Februar bis 01. März 2013

herausgegeben von der  
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V.