

Auswirkung von Autonomie und Geschwindigkeit in der virtuellen Mensch-Roboter-Kollaboration

Markus KOPPENBORG, Andy LUNGFIEL, Birgit NABER und Peter NICKEL

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

Kurzfassung. Mit kollaborierenden Robotern sollen industrielle Arbeitsplätze entstehen, die durch einen gemeinsamen, überlappenden Arbeitsraum von Mensch und Roboter gekennzeichnet sind. Roboter sind in ihrer Bewegungsgeschwindigkeit und in ihrer Autonomie zur Bewegungsführung flexibel. Diese Studie soll untersuchen, inwiefern sich höhere Bewegungsgeschwindigkeiten und ein höheres Maß an Autonomie des Roboters auf die Beanspruchung des Menschen auswirken. Hierfür bearbeiteten Probanden Aufgaben mit einem kollaborierenden Roboter in virtueller Realität. Eine höhere Autonomie des Roboters führte zu Leistungseinbußen bei der Aufgabenbearbeitung. Höhere Bewegungsgeschwindigkeiten gehen mit höherer erlebter Anstrengung einher. Implikationen für eine sichere und beeinträchtigungsfreie Mensch-Roboter-Kollaboration werden diskutiert.

Schlüsselwörter. Mensch-Roboter-Kollaboration, Beanspruchung, Prävention, virtuelle Realität, Human Factors.

1. Einleitung

Bei zukünftigen Roboterarbeitsplätzen sollen sich Mensch und Roboter einen gemeinsamen, überlappenden Arbeitsraum teilen. Diese Konstellation verspricht Vorteile, da sich Mensch und Roboter hervorragend ergänzen und ihre jeweiligen Stärken besonders in kollaborativer Form genutzt werden können (Green et al. 2008). Vorgaben zur Vermeidung mechanischer Gefährdungen bei kollaborierenden Robotern wurden bereits formuliert, jedoch sind die Anforderungen in Bezug auf psychische Belastung (DIN EN ISO 10075-2: 2000) noch vage formuliert (ISO TS 15066: 2011). Um solche Arbeitsplätze menschengerecht und sicher zu gestalten, müssen die Arbeitsbedingungen und damit die Belastung so angepasst werden, dass sie beim Nutzer eine optimale Beanspruchung bewirken. Beanspruchung kann sich dabei auf der Ebene des Verhaltens (z.B. Performanz), des Erlebens (z.B. Anstrengung) und psychophysiologischer Reaktionen (z.B. Herzfrequenz) manifestieren (Hacker 1998).

Roboter sind in ihrer Bewegungsgeschwindigkeit und in der Planung ihrer Trajektorie relativ flexibel. Sowohl die Geschwindigkeit als auch die Art der Trajektorie des Roboters können sich auf die Beanspruchung des Menschen auswirken (Naber et al. 2012; Kulic & Croft 2005). Studien zu Human Factors von kollaborierenden Robotern im industriellen Kontext liegen mangels Umsetzung in der betrieblichen Praxis bisher noch nicht vor. Die vorliegende Simulationsstudie untersucht daher in VR, wie sich Bewegungsgeschwindigkeiten und Autonomie (i.S.v. Vorhersehbarkeit von Trajektorien) eines kollaborierenden Roboters in einem industriellen Nutzungskontext auf die Beanspruchung des Menschen auswirken.

2. Methode

Für die Untersuchung wurde eine Arbeitsumgebung mit einem kollaborierenden Industrie-Roboter nach realem Vorbild im SUTAVE-Labor des IFA simuliert (www.dguv.de/ifa/sutave; Nickel et al. 2012) (vgl. Abbildung 1). In einem virtuellen Szenario bearbeiteten Probanden zwei Aufgaben parallel, welche die perzeptuelle und kognitive Belastung von Fertigungstätigkeiten nachbilden sollten. Eine Qualitätskontroll-Aufgabe (QK) wurde in direkter Zusammenarbeit mit dem Roboter durchgeführt, wobei der Roboter dem Probanden Werkstücke zur Prüfung vorlegte und diese abhängig von den Anweisungen des Probanden unterschiedlichen Behältern zufügte. Eine Produktions-Aufgabe (PR) wurde ohne direkte Interaktion mit dem Roboter im Kollaborationsraum ausgeführt. Dadurch sollte für die Probanden eine Doppelaufgabensituation mit konkurrierenden kognitiven Anforderungen entstehen.

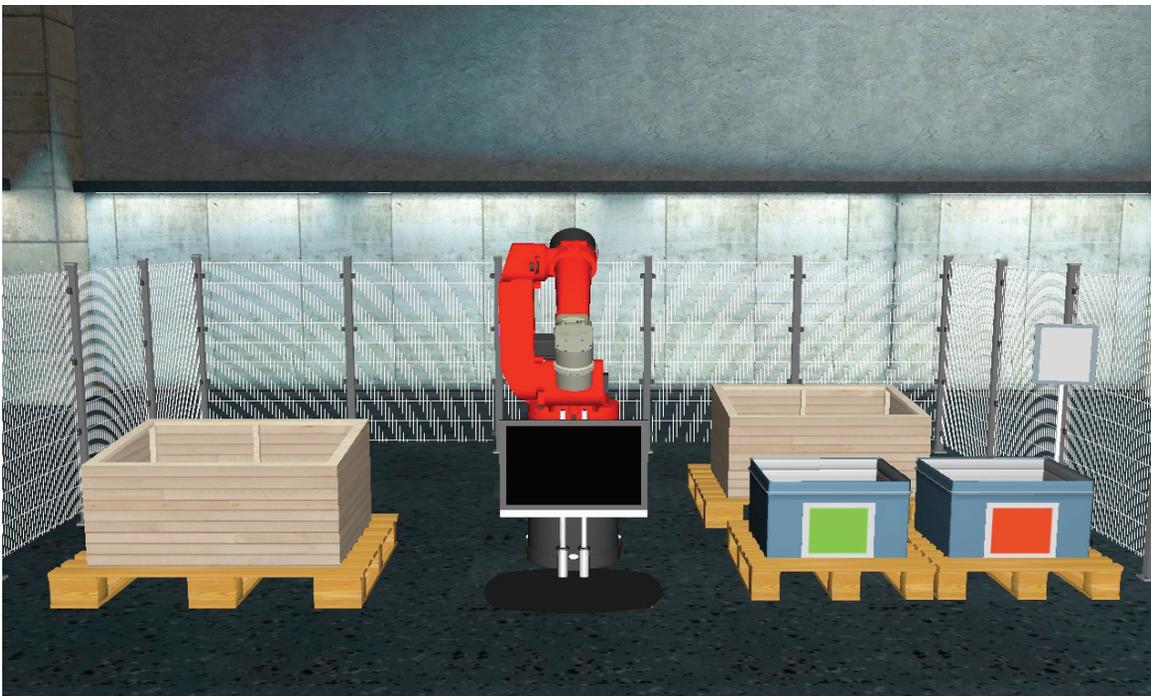


Abbildung 1: Virtuelle Arbeitsumgebung mit kollaborierendem Industrie-Roboter

Die Auswirkungen der Bewegungsgeschwindigkeit und der Autonomie des Roboters auf die Beanspruchung wurden in einem $2 \times 2 \times 2$ faktoriellen Design und 28 Probanden untersucht. Die Bewegungsgeschwindigkeit wurde als Innersubjektfaktor mit 75 cm/s und 140 cm/s variiert. Autonomie wurde als Zwischensubjektfaktor variiert, wobei hohe Autonomie (A+) mit häufigen Richtungswechseln und Abweichungen der Bewegungsbahnen einherging, sodass diese für die Probanden unvorhersehbar waren. Bei geringer Autonomie (A-) folgten die Roboterbewegungen einem sich wiederholenden und damit für die Probanden vorhersehbaren Muster. Aufgrund der Messwiederholung wurde als zweistufiger Kontrollfaktor die Reihenfolge der Darbietung balanciert.

Als Maß für die Beanspruchung wurde die Performanz bei der Aufgabenbearbeitung herangezogen (Antwortzeit, Prozent korrekter Antworten), außerdem die erlebte Anstrengung (NASA-TLX, Hart & Staveland 1988), sowie Gefahrenkognition (Naber et al. 2012) und das Angstempfinden bei der Bearbeitung (STAI, Laux et al. 1981). Zusätzlich wurde als psychophysiologisches Maß die Herzfrequenz erfasst.

3. Ergebnisse

Die Performanz als mittlere Antwortzeit für korrekt bearbeitete QK-Aufgaben zeigte einen marginal signifikanten Effekt für Autonomie ($F(1,24) = 4,1, p = 0,055$). Bei vorhersehbaren Roboterbewegungen konnten die Aufgaben vergleichsweise schneller bearbeitet werden ($M_V = 4,3 \text{ s}, SD_V = 1,0$ vs. $M_N = 4,9 \text{ s}, SD_N = 0,5$) (vgl. Abbildung 2). Andere Performanzmaße zeigten vergleichbare Ergebnisse. Für die Bearbeitung der PR-Aufgabe ergaben sich keine statistisch bedeutsamen Performanz-Unterschiede.

Die erlebte Anstrengung lag bei langsamer Robotergerwindigkeit bei 40,7 (SD = 13,3), bei schneller Geschwindigkeit hingegen bei 44,7 (SD = 13,6) und war damit signifikant unterschiedlich ($F(1,24) = 6,15, p < 0,05, \eta^2 = 0,2$) (s. Abb. 2). Die Analyse der Daten zur Gefahrenkognition, zum Angstempfinden und zum Wohlbefinden kommen zu konvergenten Ergebnissen. Die Effektstärken fallen bei diesen Maßen relativ niedrig aus.

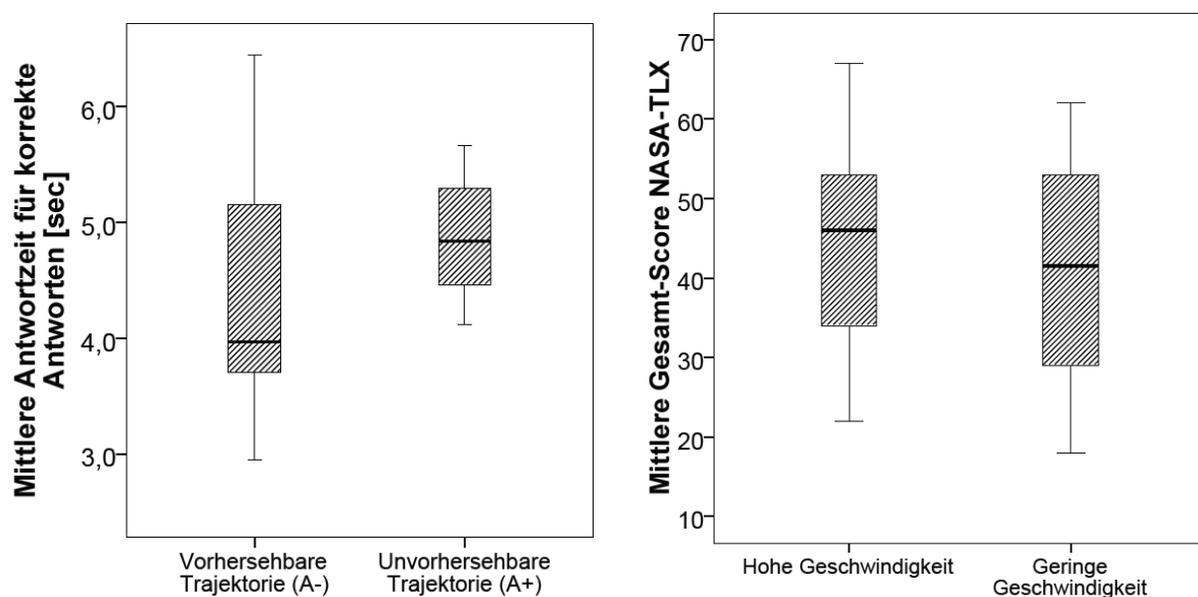


Abbildung 2: Performanz (links; mittlere Antwortzeit) und erlebte Anstrengung (rechts; mittlerer Score NASA-TLX) bei unterschiedlichen Ausprägungen von Autonomie und Geschwindigkeit des Roboters

4. Diskussion

Die Untersuchung zeigt, dass sich in einem Szenario der Mensch-Roboter-Kollaboration sowohl die Geschwindigkeit als auch die Autonomie im Bewegungsverlauf des Roboters auf die Performanz und die erlebte Anstrengung auswirken. Da sich für die PR-Aufgaben keine Unterschiede ergaben, kann vermutet werden, dass sich Auswirkungen im Leistungsverhalten eher auf die Bedingungsvariation als auf eine Kompensation zwischen beiden parallel bearbeiteten Aufgaben zurückführen lassen. Dabei legt der Autonomie-Effekt in den QK-Aufgaben nahe, dass autonome, für den Nutzer nicht vorhersehbare Roboterbewegungen zu langsameren Antwortzeiten bei der Aufgabebearbeitung führen und damit auf eine höhere Beanspruchung schließen lassen. Dies stimmt mit Befunden von Dehais et al. (2011) überein, die höhere Komfort- und Sicherheits-Ratings bei vorhersehbaren Bewegungsbahnen nachweisen konnten. Ebenso konnten Ikeura et al. (2003) positivere emotionale Reaktionen des Nutzers zeigen, wenn Roboterbewegungen per Signal angekündigt wurden und damit vorhersehbar waren.

Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass die Aufgabenbearbeitung bei höheren Bewegungsgeschwindigkeiten als anstrengender empfunden wird. Dieser Befund konvergiert mit Ergebnissen von Or et al. (2008), welche ebenfalls höhere Beanspruchung und höhere Gefahreinschätzung bei schnelleren Roboterbewegungen zeigen konnten. Beide Teilergebnisse sprechen dafür, dass autonome und schnelle Bewegungen eines kollaborierenden Industrie-Roboters beim Nutzer zu einer erhöhten Beanspruchung führen, wobei sich diese auf der Ebene der Performanz und/oder des Erlebens manifestieren kann (Hacker 1998).

Damit weist die Studie auf relevante Human Factors hin, die bei der Gestaltung von Mensch-Roboter-Systemen in industriellen Anwendungen beachtet werden sollten, um bei Nutzern beeinträchtigende Folgen der Beanspruchung zu vermeiden. Inwieweit diese Ergebnisse auf sicherheitskritische Beeinträchtigungen kognitiver Prozesse für eine sichere Mensch-Roboter-Kollaboration hinweisen, kann auf der Basis der vorliegenden Untersuchung noch nicht abschließend beurteilt werden.

Die Ergebnisse liefern Hinweise für die Weiterentwicklung und Konkretisierung der oben erwähnten Normen und dienen als Diskussionsgrundlage für die Gestaltung von Situationen der Mensch-Roboter-Kollaboration in der betrieblichen Praxis. Ausgehend von diesen Befunden sollten zukünftige Studien zu differenzierteren Ergebnissen kommen, weitere Geschwindigkeitsabstufungen untersuchen oder die Wirkung anderer Faktoren und ihrer Wechselwirkungen einbeziehen.

5. Literatur

1. Dehais, F., Sisbot, E., Alami, R. & Causse, M. 2011, Physiological and subjective evaluation of a human-robot object hand-over task, *Applied Ergonomics*, 42, 785-791.
2. DIN EN ISO 10075-2: 2000, Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 2: Gestaltungsgrundsätze. Berlin: Beuth.
3. Green, S., Billinghamurst, M., Chen, X. & Chase, J. 2008, Human-Robot Collaboration: A Literature Review and Augmented Reality Approach in Design, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 5, 1-18.
4. Hacker, W. 1998, Arbeitstätigkeitsanalyse, Analyse und Bewertung psychischer Arbeitsanforderungen. Heidelberg: Asanger.
5. Hart, S. & Staveland, L. 1988, Development of the NASA task load index (TLX): Results of empirical and theoretical research. In: P.A. Hancock & N. Meshkati (Hrsg.), *Human mental workload*. Amsterdam: North-Holland, 139-183.
6. Ikeura, R., Hagiwara, A., Kosha, T. & Mizutani, K. 2003, Previous Notice Method of Three Dimensional Robotic Arm Movement for Suppressing Threat to Humans. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Oct 31 – Nov 2, Millbrae, USA, 353-357.
7. ISO TS 15066: 2012, Robots and robotic devices - Collaborative Robots. Genf: ISO.
8. Kulic, D. & Croft, E. 2005, Safe Planning for Human-Robot Interaction, *Journal of Robotic Systems*, 22, 383-396.
9. Laux, L., Glanzmann, P., Schaffner, P. & Spielberger, C. 1981, *State Trait Angst Inventar (STAI)*. Weinheim: Beltz.
10. Naber, B., Nickel, P., Huelke, M. & Lungfiel, A. 2012, 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.
11. Nickel, P., Lungfiel, A., Naber, B., Hauke, M. & Huelke, M. 2012, Virtual Reality in Occupational Safety and Health for Product Safety and Usability. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems (SIAS)*, Montreal, Canada, Oct 11-12, 2012, 41-46.
12. Or, C., Duffy, V. & Cheung, C. 2009, Perception of safe robot idle times in virtual reality and real industrial environments, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39, 807-812.



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, Internet: 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.