

# Einfluss von Geschwindigkeit und Nähe eines Roboters auf Leistung und Beanspruchung in virtueller 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.** Zukünftige Roboterarbeitsplätze sollen eine Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) erlauben. In einem virtuellen industriellen Arbeitszenario der MRK werden die ergonomischen Grundgrößen Geschwindigkeit und Nähe eines Roboters in einer empirischen Untersuchung untersucht. Vorläufige Ergebnisse zeigen eine relativ höhere Leistung bei der schnelleren Geschwindigkeit mit einer insgesamt hohen Beanspruchung.

**Schlüsselwörter:** Mensch-Roboter-Kollaboration, Virtuelle Realität, Arbeitsgestaltung, Beanspruchung, Arbeitsschutz.

## 1. Einleitung

Roboter arbeiten meist hinter trennenden Schutzzäunen in einer gesicherten Zelle. Zukünftige industrielle Arbeitsplätze sollen auch eine Kollaboration von Mensch und Roboter (z.B. eine raum-zeitliche Zusammenarbeit im gemeinsamen Bewegungsbe- reich) erlauben, wenn Anforderungen des Arbeitsschutzes an die Gestaltung und Auslegung solcher Arbeitssysteme umgesetzt sind (Ottersbach & Huelke 2010). Während Anforderungen an die Gestaltung zur Vermeidung z.B. mechanischer Gefährdungen bereits international abgestimmt werden (vgl. ISO TS 15066), liegen noch keine konkreten Anforderungen zu Human Factors vor. Diese würden sich auf Prozesse menschlicher Informationsverarbeitung bei der Gestaltung einer Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) beziehen und darauf abzielen, Fehlhandlungen oder Beeinträchtigungen des Mitarbeiters während der Aufgabenbearbeitung zu vermeiden. So weist die Literatur zur Mensch-Roboter-Interaktion (z.B. Rahimi & Karwowski 1992; Beauchamp & Stobbe 1995; Or et al. 2009) die Bewegungsgeschwindigkeit von Robotern als einen der Faktoren aus, die nicht nur als mechanische, sondern auch als Gefährdung aus Sicht von Human Factors für die Gestaltung von Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern relevant erscheinen. Aus Simulationsstudien der 1990er Jahre deutet sich an, dass auch Robotergeschwindigkeiten von ca. 25 cm/s als relativ hoch bewertet werden können. Über die Begrenzung von Geschwindigkeiten wurde meist das Ziel verfolgt, den Roboter rechtzeitig anhalten zu können, dem Menschen genügend Zeit einzuräumen den Roboter zu stoppen oder ihm auszuweichen, bevor es zu einer Kollision oder einem Unfall kommen kann. Das Verbundprojekt "EsMiP", gefördert von der Bayerischen Forschungsförderung, führt derzeit Studien zur effizienten und sicheren Interaktion von Menschen mit intelligenten Produktionsanlagen durch. Eine der Projektstudien des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) beschäftigt sich mit Anforderungen an eine sichere und ergonomische Gestaltung einer MRK. In dieser Simulationsstudie wird der Frage nachgegangen, inwieweit sich bei solchen zukünftigen Arbeitsformen die Robotergeschwindigkeit und -distanz auf Prozesse der menschlichen Infor-

mationsverarbeitung auswirken kann.

## 2. Methode

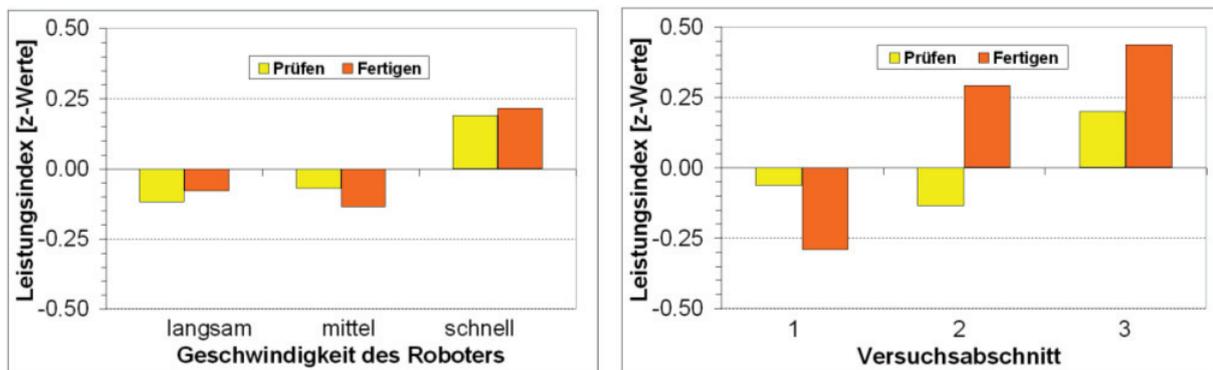
Im SUTAVE-Labor des IFA ([www.dguv.de/ifa/sutave](http://www.dguv.de/ifa/sutave)) wurde zur Bearbeitung von Prüf- und Fertigungsaufgaben ein industrielles Arbeitsszenario der MRK in gemischter Realität aufgebaut. Durch die Simulation eines Roboters in virtueller Realität (VR) im Arbeitsbereich des Menschen ging von potentiellen Gefährdungen keine reale Gefahr aus, es konnte aber dennoch realitätsnahes Verhalten in der MRK erfasst werden. Der Roboter bearbeitete Werkstücke, legte sie dem Probanden zur Prüfung vor, und führte sie abhängig von ihrer Qualität auf Anweisung des Probanden verschiedenen Behältern über festgelegte Trajektorien zu. In diesen Prozess war eine Wahlreaktionsaufgabe eingebettet, die vom Probanden mit vorrangiger Priorität zu bearbeiten war. Parallel dazu bearbeitete der Proband eine weitere Aufgabe, die eine hohe informatorische Belastung in Fertigungstätigkeiten nachbildet. Zur Umsetzung dieser Belastung wurde eine Aufgabe zum logischen Denken auf hoher Schwierigkeitsstufe (Shingledecker 1984) zur Bearbeitung am Notebook des Steharbeitsplatzes mit Einsicht in den Bewegungsbereich des Roboters herangezogen. Dadurch wurde eine Doppelaufgabensituation geschaffen, die an den Probanden konkurrierende Anforderungen an die Informationsaufnahme, -verarbeitung und -umsetzung stellten. Die Auswirkungen von Geschwindigkeit und Nähe des Roboters auf die Leistung und Beanspruchung des Probanden wurde in einem gemischten 3x3 faktoriellen Design untersucht. Die Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters wurde mit 25, 70 oder 140 cm/s innerhalb eines Versuchsdurchgangs variiert (matched samples) und die Nähe des Roboters zum Probanden wurde mit 30, 70 oder 140 cm abgestuft. Die Faktorstufen wurden im Arbeitsszenario so umgesetzt, dass die Anzahl der Wahlreaktionsaufgaben konstant gehalten wurde, während Geschwindigkeit und Nähe über die Versuchsreihen variiert wurden. Zum Zeitpunkt der Abfassung dieses Beitrages konnten sechs der geplanten 36 Versuchsdurchgänge mit gestuften Geschwindigkeiten bei naher Mensch-Roboter-Distanz abgeschlossen werden ( $M = 37,7$  Jahre,  $SD = 10,44$ ). Aufgrund der kleinen Stichprobe werden Ergebnistendenzen anhand vorliegender Daten beschrieben und es wird auf statistische Analysen verzichtet. Ein Einfluss aus der Aufgabenbearbeitung auf die Leistung der Probanden wurde auf der Grundlage von Antwortzeiten, Quantität und Qualität der bearbeiteten Teilaufgaben aus den beiden o.g. Aufgaben vorgenommen. Zur Ermittlung eines Leistungsindex i.S.e. 'speed-accuracy trade-off' wurde eine additive Verknüpfung von z-transformierten Antwortzeiten und Fehlern berechnet (vgl. Nickel & Nachreiner 2003). Während der Arbeitsprozesse wurden kardiovaskuläre Parameter (z.B. Herzfrequenzvariabilität) erfasst. Vor dem Versuchsbeginn und zwischen den einzelnen Versuchsabschnitten wurden Informationen zur Bewertung der Simulation in VR, zur Gefahrenkognition, zum Angst-Empfinden (z.B. STAI, Laux et al. 1981) und zur Beanspruchung (z.B. NASA-TLX, Hart & Staveland 1988) erhoben.

## 3. Ergebnisse

Die Auswertung der bisher durchgeführten Versuche für die drei Geschwindigkeitsstufen des Roboters ergibt unterschiedliche Auswirkungen im Leistungsverhalten der Probanden (s. Abbildung 1). Der Leistungsindex für die Prüf- bzw. Wahlreaktionsaufgabe bildet eine Leistungssteigerung mit steigender Geschwindigkeit ab (siehe Abbildung 1a). In den drei Abschnitten jedes Versuchsdurchgangs waren die Aufgaben wiederholt zu bearbeiten, allerdings jeweils unter einer anderen Robotergeschwindigkeit, die systema-

tisch variiert wurde. Die Ergebnisse in Abbildung 1b weisen nicht darauf hin, dass es zu einer stetigen Verbesserung der Leistung über die Abschnitte kommt. Ein Effekt der Übung deutet sich somit nicht an. Eine plausible Erklärung für die Leistungssteigerung im dritten Abschnitt steht allerdings noch aus.

Für die simulierten Anforderungen an Fertigungstätigkeiten durch die Aufgabe zum logischen Denken zeigt sich ein etwas anderes Ergebnis. Die Leistung, die mit der höchsten Geschwindigkeitsstufe einhergeht, erscheint relativ besser als bei niedrigeren Geschwindigkeiten (s. Abb. 1a). Im Anstieg des Leistungsindex über die drei Versuchsabschnitte könnte sich ein Übungseffekt widerspiegeln (siehe Abbildung 1b). Da es sich bei dieser Aufgabe um jene auf hoher Schwierigkeitsstufe handelt, lässt sich selbst bei einem sich andeutenden Übungseffekt vermuten, dass die Anforderungen an Prozesse der Informationsverarbeitung relativ hoch bleiben.



**Abbildung 1:** Leistungsindexe für die abgestuften Bewegungsgeschwindigkeiten des Roboters (a) und für Abschnitte der wiederholten Versuchsdurchgänge (b)

Die hohe Aufgabenschwierigkeit kann als eine der Ursachen dafür angesehen werden, dass die empfundene Beanspruchung insgesamt als relativ hoch bewertet wird ( $M = 87,87$ ,  $SD = 20,33$ ). Im Mittel steigen die Werte zwar mit steigenden Bewegungsgeschwindigkeiten des Roboters ( $M_{\text{langsam}} = 82,3$ ,  $SD = 25,4$ ;  $M_{\text{mittel}} = 89,3$ ,  $SD = 19,7$ ;  $M_{\text{schnell}} = 92,0$ ,  $SD = 15,9$ ), allerdings kann wegen der aktuell noch relativ hohen Streuungen nicht von bedeutsamen Differenzierungen ausgegangen werden. Das empfundene Angstniveau durch eine möglicherweise als Bedrohung empfundene Bewegung oder Nähe des Roboters bewegt sich insgesamt auf einem mittleren Niveau ( $M = 46,27$ ,  $SD = 8,03$ ). Auch hier scheinen mögliche Unterschiede zwischen den Geschwindigkeitsstufen nicht bedeutsam ( $M_{\text{langsam}} = 44,7$ ,  $SD = 5,5$ ;  $M_{\text{mittel}} = 47,8$ ,  $SD = 10,6$ ;  $M_{\text{schnell}} = 46,3$ ,  $SD = 8,0$ ). In den Erhebungen zur Gefahrenkognition deutet sich eine Wunschgeschwindigkeit der Probanden auf mittlerer Geschwindigkeitsstufe an und die niedrige Geschwindigkeitsstufe wird von allen Probanden konsistent als eher störend für die Aufgabenbearbeitung empfunden.

#### 4. Diskussion

Die Auswertung der bisher abgeschlossenen Versuchsdurchgänge erscheint noch wenig aussagekräftig und kann allenfalls erste Tendenzen aufzeigen. Die Ergebnisse lassen auch noch keine Aussagen über Effekte der Nähe des Roboters zu, da alle bisherigen Versuche in nächster Nähe des virtuellen Roboters durchgeführt wurden. Es verwundert deshalb aber umso mehr, dass sich die relativ höheren Leistungen während der relativ höheren Geschwindigkeiten des Roboters zeigen und umgekehrt. Würde dieser Zusammenhang mit einer Leistungskompensation nach Haider & Rohmert (1978) ein-

hergehen, so könnte sich diese Tendenz auf Kosten einer relativ höheren Beanspruchung ergeben haben. Die empfundene Beanspruchung fällt zwar für die relativ höhere Robotergeschwindigkeit im Mittel hoch aus, allerdings weisen die Streuungen der erhobenen Daten auf keine bedeutsamen Unterschiede relativ zu geringeren Geschwindigkeitsstufen hin. Höhere Geschwindigkeiten, bei denen auch mechanische Gefährdungen wirksam vermieden werden, erscheinen hier nach Anforderungen aus Human Factors unproblematisch. Diese Aussage ist allerdings auf der Grundlage der bisher ausgewerteten Daten nicht belastbar. Es kann vermutet werden, dass die Aufgabe, mit der Prozesse aus Fertigungstätigkeiten nachgebildet werden, so hohe Anforderungen an die menschliche Informationsverarbeitung stellt, dass die virtuelle Welt des Roboters in den Hintergrund des Geschehens tritt und insofern eine nachgeordnete Bedeutung einnimmt. Selbst in einem realen Arbeitsszenario dürfte sich ein ähnlicher Zusammenhang ergeben. Diese Argumentation ließe sich auch durch Aussagen der Probanden stützen, nach denen unterschiedliche Robotergeschwindigkeiten über die Versuchabschnitte kaum wahrgenommen werden. Konsistent dazu weisen die Ergebnisse für den STAI ein ähnliches Niveau über die Geschwindigkeitsstufen aus. Die bisher verfügbaren Ergebnisse der Simulationsstudie machen deutlich, dass für Ableitungen von Anforderungen aus Human Factors an die Gestaltung sicherer MRK komplexe Zusammenhänge beeinflussender Faktoren betrachtet werden müssen, die nur wenig Spielraum für einfache Erklärungsmuster bieten dürften. Dass insbesondere Simulationsstudien in VR eine geeignete Methode darstellen, potentielle Gefährdungen und Auswirkungen auf das menschliche Verhalten zu untersuchen, konnte mit der vorliegenden, aber auch mit anderen Untersuchungen bereits hinlänglich gezeigt werden (z.B. Or et al. 2009; Nickel et al. 2010).

## 5. Literatur

1. Beauchamp, Y. & Stobbe, T.J. 1995, A review of experimental studies on human-robot system situations and their design implications, *The International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 5, 283-302.
2. Haider, E. & Rohmert, W. 1978, Leistungs- und Beanspruchungskompensation bei informativ-scher Arbeit, *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 32, 1-5.
3. 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 (Hrsg.), *Human mental workload*. Amsterdam: North-Holland, 139-183.
4. ISO/TS 15066: 2011, Robots and robotic devices – Collaborative robots (under development). Genf: ISO.
5. Laux, L., Glanzmann, P., Schaffner, P. & Spielberger, C.D. 1981, State Trait Angst Inventar (STAI). Weinheim: Beltz.
6. Nickel, P. & Nachreiner, F. 2003, Sensitivity and Diagnosticity of the 0.1-Hz component of heart rate variability as an indicator of mental workload, *Human Factors*, 45, 575-590.
7. Nickel, P., Lungfiel, A., Nischalke-Fehn, G., Pappachan, P., Huelke, M. & Schaefer, M. 2010, Evaluation of Virtual Reality for Usability Studies in Occupational Safety and Health. In *Proceedings of the 6th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2010)*, June 14-15, 2010, Tampere, Finland. Helsinki: Finish Society of Automation, F6043, 1-6.
8. Or, C.K.L., Duffy, V.G. & Cheung, C.C. 2009, Perception of safe robot idle time in virtual reality and real industrial environments, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39, 807-812.
9. Ottersbach, H.J. & Huelke, M. 2010, Sichere Arbeitsplätze mit kollaborierenden Robotern - Von der Forschung zur Normung, *KANBrief*, 4, 3.
10. Rahimi, M. & Karwowski, W. 1992, *Human-Robot Interaction*. London: Taylor & Francis.
11. Shingledecker, C.A. 1984, A task battery for applied human performance assessment research (AFAMRL-Technical Report 84-071; AD-A153 677). Dayton: AFAMRL.