

## **Altersdifferenzierte Evaluierung von Belastung und Beanspruchung bei der kopfbasierten Steuerung eines kooperierenden Roboters**

Jochen NELLES, Friederike SCHMITZ-BUHL, Julia SPIES, Susanne KOHNS,  
Sonja KWEE-MEIER, Christina BRÖHL, Christopher BRANDL,  
Alexander MERTENS, Christopher M. SCHLICK †

*Lehrstuhl und Institut für Arbeitswissenschaft (IAW) der RWTH Aachen University  
Bergdriesch 27, D-52062 Aachen*

**Kurzfassung:** Die ergonomische Gestaltung von freihändig gesteuerten Leichtbaurobotern bietet Potential für Arbeitsplätze in der Mensch-Roboter-Kooperation. Eine altersdifferenzierte Studie (N = 24) untersucht die mit der Robotersteuerung einhergehenden Kopfbewegungen mittels Motion Capture und nimmt die resultierende Beanspruchung mittels Oberflächen-Elektromyographie und der Rating Scale for Mental Effort auf (abhängige Variablen). Die unabhängigen Variablen sind das Alter mit zwei Altersgruppen (18-39 Jahre, 40-67 Jahre), zwei Steuerungskonzepte (Cursor, Geste) sowie drei Kopfbewegungen mit jeweils zwei Ausprägungen: Flexion/Extension, Rotation im (Gegen-)/Uhrzeigersinn, Lateralflexion links/rechts. Eine Varianzanalyse zeigt, dass die Flexion/Extension die geringste muskuläre Beanspruchung aufweist. Die Cursorsteuerung ist in Hinblick auf die muskuläre und mentale Beanspruchung weniger beanspruchend als die Gestensteuerung.

**Schlüsselwörter:** Mensch-Roboter-Interaktion, Mensch-Roboter-Kooperation, Belastungs-Beanspruchungs-Konzept, EMG, Motion Capture

### **1. Einleitung**

Bei Montageaufgaben mit hoher Komplexität, hoher Variantenvielfalt und geringer Losgröße sind die Arbeitspersonen besonders gefordert und benötigen häufig beide Hände gleichzeitig. Ein Arbeitsplatzsystem, welches sich adaptiv an die Arbeitsperson anpasst, eine ergonomische Körperhaltung unterstützt und Werkzeuge sowie Bauteile zum richtigen Zeitpunkt in der richtigen Reihenfolge bereitstellt, kann die Arbeitsperson entlasten.

Ein Lösungsansatz für ein solches Arbeitsplatzsystem basiert auf der Mensch-Roboter-Kooperation (MRK). Durch eine freihändige kopfbasierte Steuerung eines Knickarmroboters kann die Arbeitsperson bei der Arbeit unterstützt werden.

Vor dem Hintergrund der soziotechnischen Gestaltung des digitalen Wandels sind bei der Entwicklung eines MRK-Arbeitsplatzes technische (bspw. die Sicherheitsanforderungen an Robotersysteme nach DIN EN ISO 10218-2), ergonomische (bspw. die Grundsätze der Dialoggestaltung nach DIN EN ISO 9241-110), organisationale, ethische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte (bspw. der demographische Wandel) zu beachten (Manzeschke 2013, Nelles 2016a).

In diesem Beitrag werden angesichts der Anforderungen an eine ergonomische und altersgerechte Gestaltung eines solchen MRK-Arbeitsplatzes zwei Steuerungskonzepte (Gesten- und Cursorsteuerung) sowie die mit der Robotersteuerung einhergehenden Kopfbewegungen und Interaktionsgesten altersdifferenziert

untersucht. Als methodische Grundlage für die empirische Studie dient das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept von Rohmert (1984), welches die Zusammenhänge zwischen den belastenden Ursachen für den arbeitenden Menschen und den sich daraus ergebenden Wirkungen (Beanspruchung) erklärt (Rohmert 1984). Die gleiche Belastung kann zu unterschiedlicher Beanspruchung führen (Kirchner, 1986). Des Weiteren wird die Beziehung zwischen dem Ausmaß an Belastung und dem Maß der Beanspruchung durch das jeweilige Verhalten einer Person bestimmt (Rohmert et al. 1973).

In dieser Studie werden die physische Belastung durch die drei Kopfbewegungen (Flexion/Extension, Rotation, Lateralflexion), die physische Beanspruchung durch die Muskelaktivität der Nacken- und Schultermuskulatur und die psychische Beanspruchung durch die subjektive Einschätzung der mentalen Beanspruchung der Probanden erhoben. Zur Erfassung der Muskelaktivität wurden in einer Vorstudie die oberflächlich liegenden Nackenmuskeln M. trapezius pars descendenz, M. sternocleidomastoideus und M. splenius capitis ausgewählt (Nelles 2016b).

Ziel der Studie ist es, anhand der aufgenommenen Daten Rückschlüsse über die Belastung und Beanspruchung der jeweiligen Kopfbewegungen sowie über die Eignung der verwendeten Steuerungskonzepte zu ziehen. Dabei sollen die folgenden Hypothesen geprüft werden:

- H<sub>1</sub>: Die für die Robotersteuerung verwendete Kopfauslenkung, die Auskunft über die Belastung geben soll, wird durch das Alter signifikant beeinflusst.
- H<sub>2</sub>: Die Kopfauslenkungen führen zu unterschiedlicher Beanspruchung der aufgenommenen Muskeln.
- H<sub>3</sub>: Das verwendete Steuerungskonzept beeinflusst signifikant die Kopfauslenkung.
- H<sub>4</sub>: Das Steuerungskonzept beeinflusst signifikant die Muskelaktivität.
- H<sub>5</sub>: Das Steuerungskonzept hat einen signifikanten Einfluss auf die mentale Beanspruchung.

Auf Grundlage der Ergebnisse werden Gestaltungsempfehlungen hinsichtlich eines MRK-Arbeitsplatzes und eines kopfbasierten Steuerungskonzeptes abgeleitet.

## **2. Methodik**

### *2.1 Stichprobe*

In der Studie (N = 24) haben zwölf Versuchspersonen im Alter von 18 bis 39 Jahren (AG 1) und zwölf im Alter von 40 bis 67 Jahren (AG 2) teilgenommen. Im Durchschnitt sind die Probanden 40,7 Jahre alt (SD: 15,61). In jeder Altersgruppe haben jeweils sechs männliche und sechs weibliche Probanden teilgenommen.

### *2.2 Roboter und kopfbasierte Steuerung*

Der in der Studie verwendete UR5-Knickarmroboter der Firma Universal Robots hat sechs Freiheitsgrade sowie einen weiteren Freiheitsgrad durch einen am Endeffektor befestigten Greifer. Der Roboter wird mit der an einem Haarreif befestigten Inertial Measurement Unit (IMU) FSM-9 der Firma Hillcrest Laboratories gesteuert, siehe Abbildung 1. Die Messeinheit besteht aus je drei Beschleunigungs-, Drehraten- und Magnetfeldsensoren sowie einem Datenprozessor und erfasst die Kopfbewegungen um die X-, Y- und Z-Achse. Die sieben Freiheitsgrade des

Roboters (mit Greifer) werden anhand eines Steuerungsparadigmas auf die drei Freiheitsgrade des menschlichen Kopfes anhand von vier Steuerungsgruppen (horizontale Ebene, vertikale Ebene, Orientierung im Raum, Greifer) übertragen (Rudigkeit 2014). Der Wechsel zwischen den vier Gruppen erfolgt über eine auf einem 27“ Monitor angezeigte graphischen Benutzungsoberfläche. Im Rahmen dieser Studie wurde für den Menüwechsel zwischen den Gruppen sowohl eine Cursor-Steuerung (analog zur Steuerung mit einem Mauszeiger) als auch eine Gesten-Steuerung (mit den Gesten Nicken, Lateralflexion nach rechts, Lateralflexion nach links) verwendet. Die Steuerung des Knickarmroboters bzw. des Endeffektors erfolgt über die Kopfauslenkung relativ zu einer vorab kalibrierten Ruheposition.



**Abbildung 1:** Versuchsaufbau, UR5-Roboter mit Greifer, Monitor, Haarreif mit IMU und Motion Capture Kameras.

### 2.3 Motion Capture und Oberflächen-Elektromyographie

Die Kopfbewegungen wurden mithilfe eines Motion Capture Systems der Firma Vicon aufgenommen, welches aus vier Infrarotlicht Kameras (100 Hz) des Modells Vicon Bonita 10, reflektierenden Markerkugeln und der Software Nexus 2.1 besteht. Die Kopfbewegungen wurden durch die Bewegungslaufbahn der Markerkugeln erfasst, die folgendermaßen positioniert wurden: drei Marker auf dem Haarreif (rechts, links und mittig), drei im Schulterbereich, davon zwei Marker auf den Schultern (links und rechts) und einer mittig auf der Wirbelsäule.

Die Muskelaktivität wurde mittels Oberflächen-Elektromyographie ermittelt. Dazu erfasste ein EMG-System der Firma Noraxon, das aus dem TeleMyo DTS Belt Receiver, sechs DTS EMG Transmittern, den Elektroden und der Software MyoResearch XP 1.07 Clinical Edition besteht, die Aktivitäten der Nackenmuskeln (M. trapezius pars descendens, M. sternocleidomastoideus und M. splenius capitis) jeweils auf der rechten und linken Körperseite.

### 2.4 Rating Scale for Mental Effort, Interview und Thinking Aloud

Zur Messung der mentalen Beanspruchung während der Versuchsaufgabe wurde die von Zijlstra (1993) konzipierte Rating Scale for Mental Effort (RSME) verwendet. Die Skala reicht von 0 („absolut keine Anstrengung“) bis 150 („unerträgliche Anstrengung“). Weiterhin wurde ein Thinking-Aloud-Protokoll geführt, dessen enthaltene Aussagen entsprechend der Grundsätze der Dialoggestaltung in die Kategorien Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Erwartungs-

konformität, Lernförderlichkeit, Steuerbarkeit, Fehlertoleranz und Individualisierbarkeit eingeordnet wurden (DIN EN ISO 9241-110). Zudem wurde am Ende des Versuchs ein semi-strukturiertes Interview mit dem Probanden durchgeführt, in dem die physische Beanspruchung, der Erstkontakt zum MRK-Arbeitsplatz, die Versuchsaufgaben, die Steuerung des Roboterarms, die Gebrauchstauglichkeit der Benutzungsoberfläche, die Dialoggestaltung und mögliche Anwendungsszenarien im beruflichen und privaten Kontext abgefragt wurden.

## *2.5 Versuchsablauf*

Vor Beginn der Versuchsdurchführung wurde ein demographischer Fragebogen ausgefüllt und ein Landolt-Sehtest mit den Probanden durchgeführt. Im Anschluss wurden die Probanden an den MRK-Arbeitsplatz geführt und haben ein Einführungsvideo zur Robotersteuerung gesehen. Nach der Anbringung der EMG-Sensorik und der Motion Capture Marker wurde die Robotersteuerung kalibriert.

In einer Initialisierungsaufgabe hat der Proband seinen Kopf jeweils für ca. 10 s in der Ruheposition gehalten, in der Flexions- und Extensionsbewegung ausgelenkt, im (Gegen-)Uhrzeigersinn rotiert sowie eine Lateralflexion nach rechts und links ausgeführt. Nach der Kalibrierung und Initialisierung der Steuerung konnte der Proband die Steuerung zehn Minuten frei ausprobieren.

In der Hauptaufgabe führte der Proband, jeweils randomisiert mit der Cursor- und Gestensteuerung, die vom Versuchsleiter vorgegebenen Arbeitsschritte durch. Hierbei sollten quadratische Objekte anhand der kopfbasierten Steuerung gegriffen und an definierten Orten abgelegt werden. Die Aufgaben umfassen die Grundbewegungen Hinlangen, Greifen, Bringen, Positionieren und Loslassen der Objekte.

## *2.6 Studiendesign und statistische Analyse*

Bei dem Studiendesign handelte es sich um ein 3 x 2 Design mit Messwiederholung für die Initialisierung beziehungsweise um ein 2 x 2 Design mit Messwiederholung für die Hauptaufgabe. Die abhängigen Variablen bildeten die aufgenommenen Messdaten des Motion Capture und der EMG-Messung sowie die von den Probanden geäußerten RSME Werte. Die zwei Altersgruppen, die zwei Steuerungen sowie die Kopfbewegungen bildeten die unabhängigen Variablen. Durchgeführt wurde eine Varianzanalyse (ANOVA mit Messwiederholung) mit einem Signifikanzlevel von  $\alpha = 0,05$  sowie unabhängige t-Tests. Der Post-hoc-Test wurde mittels einer Bonferroni-Korrektur und einem Signifikanzlevel von  $\alpha = 0,05$  durchgeführt. Die Ergebnisse wurden auf die durchschnittlichen Werte der Ruheposition normiert und jeweils für die Initialisierung und die Hauptaufgabe getrennt analysiert. Mit den Ergebnissen der RSME Werte wurden eine mehrfaktorielle ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt.

## **3. Ergebnisse**

Ein Vergleich der unabhängigen t-Tests für die jeweiligen Initialisierungsbewegungen der Altersgruppen und der durchschnittlich gemittelten Kopfhaltung von der Ruheposition an hat ergeben, dass die Belastung durch die linke Lateralflexion bei der AG 2 stärker ausfiel als bei der AG 1 ( $t(13) = 2.787$ ,  $p < .05$ ). Die Kopfauslenkung der linken Lateralflexion war in der AG 1 mit einem Mittelwert von

27.5780 ° signifikant höher als in der AG 2 mit einem Mittelwert von 20.3784 °. Auch bei den Kopfbewegungen in der Hauptaufgabe konnte ein signifikanter Unterschied bei der linken Lateralflexion festgestellt werden. Dabei zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Steuerung ( $F(1, 15) = 12.165$ ,  $p < .005$ ,  $\eta^2 = .448$ ). Hierbei ergab sich bei der Gestensteuerung in beiden Altersgruppen eine signifikant höhere Kopfauslenkung im Vergleich zur Cursorsteuerung.

Bei der Auswertung der Werte der Initialisierungsbewegungen für die muskuläre Beanspruchung ergaben sich signifikante Haupteffekte für die Faktoren Muskeln ( $F(5, 413) = 10.405$ ,  $p < .001$ ) und Initialisierungsbewegung ( $F(2, 413) = 9.034$ ,  $p < .001$ ). Der Post-hoc-Test mit Bonferroni-Korrektur zeigte, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen den Initialisierungsbewegungen Flexion/Extension und den Bewegungen Rotation ( $p < .001$ ) und Lateralflexion ( $p < .001$ ) gibt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Flexion/Extension bei den Initialisierungsbewegungen die geringste und die Lateralflexion die höchste Beanspruchung für die Muskeln darstellen.

In der Hauptaufgabe ergab sich für den Faktor Steuerung ein signifikanter Haupteffekt ( $F(1, 264) = 4.597$ ,  $p < .05$ ). Des Weiteren konnten signifikante Interaktionseffekte zwischen Steuerung und Muskeln ( $F(5, 264) = 3.837$ ,  $p < .01$ ) und Steuerung und Altersgruppe ( $F(1, 264) = 5.421$ ,  $p < .05$ ) ausgemacht werden. Ferner zeigte sich, dass die Muskeln – bis auf den rechten M. trapezius pars descendens – bei der Gestensteuerung signifikant mehr beansprucht wurden als bei der Cursorsteuerung. Die Post-hoc-Analyse für den Vergleich der beiden Altersgruppen zeigte jedoch, dass es lediglich in der AG 2 einen signifikanten Unterschied bei der muskulären Beanspruchung zwischen den beiden Steuerungen gab. So konnte für die AG 2 gezeigt werden, dass die Cursorsteuerung eine deutlich geringere muskuläre Beanspruchung darstellt.

Bei der RSME-Auswertung zeigte sich, dass für beide Altersgruppen die Cursorsteuerung mental weniger beanspruchend war als die Gestensteuerung. Besonders deutlich war der Unterschied in der AG 2 (Mittelwert Cursorsteuerung: 4.27, Mittelwert Gestensteuerung: 14.11) Im Vergleich dazu unterschied sich die mentale Beanspruchung in der AG 1 nicht so deutlich (Mittelwert Cursorsteuerung: 6.61, Mittelwert Gestensteuerung: 10.36). Bei der Varianzanalyse ergab sich ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Steuerung ( $F(1,22) = 11.328$ ,  $p < .005$ ,  $\eta^2 = 0.340$ ). Die Gestensteuerung ist mental beanspruchender als die Cursorsteuerung.

#### **4. Diskussion und Ausblick**

In der Studie wurde der Einsatz eines freihändig kopfbasiert gesteuerten kollaborierenden Roboters hinsichtlich Belastung und Beanspruchung, die mit der Steuerung einhergehen und aus den verwendeten Kopfbewegungen sowie den verwendeten Steuerungskonzepten resultieren, untersucht. Dabei wurde die Belastung der Probanden mittels Motion Capture und die Beanspruchung mittels Oberflächen-EMG untersucht. Die erste Hypothese konnte nur teilweise durch die Ergebnisse belegt werden, da lediglich die Kopfauslenkung bei der linken Lateralflexion signifikant durch das Alter beeinflusst wurde. Ferner konnten die Ergebnisse die zweite Hypothese belegen, da die Kopfbewegungen zu unterschiedlicher Beanspruchung der aufgenommenen Muskeln führten. Dabei zeigte sich, dass die Flexion/Extension die geringste muskuläre Beanspruchung aufweist. Weiterhin konnten die Hypothesen drei bis fünf durch die Ergebnisse teilweise belegt werden. So konnte gezeigt werden, dass die Cursorsteuerung

sowohl im Hinblick auf die Kopfauslenkung bei der linken Lateralflexion, der muskulären Beanspruchung und der mentalen Beanspruchung weniger beanspruchend ist als die Gestensteuerung. Anhand der Ergebnisse kann geschlussfolgert werden, dass zukünftige Steuerungssysteme zur ergonomischen Gestaltung eines MRK-Arbeitsplatzes auf Extensions- und Flexionsbewegungen aufbauen sollten. Hierzu eignet sich vor allem das Konzept der Cursorsteuerung. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Optimierung der Gestensteuerung.

Durch die verwendeten Methoden konnten erste Erkenntnisse über die Belastung und Beanspruchung eines kopfgesteuerten kooperierenden Roboters gewonnen werden. Herausfordernd waren die genaue Positionierung der Motion Capture Marker und die Befestigung der EMG-Elektroden, da diese durch die Kopfbewegungen mehrfach verrutscht sind. Ferner ist zu beachten, dass zukünftige Studien für die Untersuchung der muskulären Beanspruchung Maximalkrafttests durchführen sollten, um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen. Neben Probanden ohne körperliche Einschränkung konnten Menschen mit körperlicher Einschränkung wie Tetraplegie als eine weitere Zielgruppe für den Einsatz eines kopfbasiert gesteuerten kooperierenden Leichtbauroboters ermittelt werden, da ihnen dadurch die Teilhabe am Berufsleben ermöglicht werden könnte.

## 5. Literatur

- DIN EN ISO 9241-110 (2008). Ergonomie der Mensch-System-Interaktion–Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung (ISO 9241-110: 2006); Deutsche Fassung EN ISO 9241-110: 2006.
- DIN EN ISO 10218-2 (Juni 2012). Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 2: Robotersysteme und Integration.
- Kirchner, J. H. (1986). Belastungen und Beanspruchungen – Einige begriffliche Klärungen zum Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. In *Arbeitsorganisation und Neue Technologien* (pp. 553-569). Springer Berlin Heidelberg.
- Manzeschke, A., Weber, K., Rother, E., & Fangerau, H. (2013). Ethische Fragen im Bereich Altersgerechter Assistenzsysteme.
- Nelles, J., Bröhl, C., Spies, J., Brandl, C., Mertens, A., Schlick, C. M., (2016a) „ELSI-Fragestellungen im Kontext der Mensch-Roboter-Kollaboration,“ in *Arbeit in komplexen Systemen. Digital, vernetzt, human?! Bericht zum 62. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 03. - 05. März 2016*, Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (GfA), GfA-Press: Dortmund, 2016, pp. 1-6.
- Nelles, J., Kohns, S., Spies, J., Brandl, C., Mertens, A., & Schlick, C. M. (2016b). Analysis of Stress and Strain in Head Based Control of Collaborative Robots – A Literature Review. In: *Advances in Physical Ergonomics and Human Factors* (pp. 727-737). Springer International Publishing.
- Rohmert, W. (1984). Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 38(4), 193-200.
- Rohmert, W., Laurig, W., Philipp, U., & Luczak, H. (1973). Heart rate variability and workload measurement. *Ergonomics*, 16(1), 33-44.
- Rudigkeit, N., Gebhard, M., Gräser, A. (2014) Towards a user-friendly AHRS-based human-machine interface for a semi-autonomous robot, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Workshop on Assistive Robotics for Individuals with Disabilities: HRI Issues and Beyond*.
- Zijlstra, F. R. H. (1993). *Efficiency in work behaviour: A design approach for modern tools*. TU Delft, Delft University of Technology.

**Danksagung:** Das MeRoSy-Projekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projektträger VDI/VDE Innovation + Technik GmbH betreut (FKZ: 16SV7190). Die Autoren bedanken sich bei den Konsortialpartnern, insbesondere bei der Forschungsgruppe von Prof. Dr. Gebhard (Sensortechnik und Aktorik in der Medizintechnik, Westfälischen Hochschule), für die gemeinsame Durchführung der Studie.



Gesellschaft für  
Arbeitswissenschaft e.V.

## **Soziotechnische Gestaltung des digitalen Wandels – kreativ, innovativ, sinnhaft**

63. Kongress der  
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

FHNW Brugg-Windisch, Schweiz

15. – 17. Februar 2017

---

**GfA Press**

---

**Bericht zum 63. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 15. – 17. Februar 2017**

**FHNW Brugg-Windisch, Schweiz**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Dortmund: GfA-Press, 2017

ISBN 978-3-936804-22-5

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 Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen.

USB-Print: Dr. Philipp Baumann, Olten

**Screen design und Umsetzung**

© 2017 fröse multimedia, Frank Fröse

[office@internetkundenservice.de](mailto:office@internetkundenservice.de) · [www.internetkundenservice.de](http://www.internetkundenservice.de)