

## Ergonomische Evaluation eines Handwerker-Kraftassistenzsystems

Sabrina BRINGELAND<sup>1</sup>, Tobias HEINE<sup>1</sup>, Marian HOFFMANN<sup>2</sup>, Thorsten STEIN<sup>2</sup>,  
Barbara DEML<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation,  
Karlsruher Institut für Technologie, Kaiserstraße 12, D-76131 Karlsruhe*

<sup>2</sup> *BioMotion Center, Institut für Sport und Sportwissenschaft,  
Karlsruher Institut für Technologie, Engler-Bunte-Ring 15, D-76131 Karlsruhe*

**Kurzfassung:** Im Rahmen des BMBF-Projektes „3. Arm“ wird ein tragbares System zur Unterstützung von physisch beanspruchenden Arbeitstätigkeiten im Trockenausbau entwickelt. Um einer Fehlanpassung zwischen Mensch und Maschine entgegenzuwirken, wurde eine Evaluation von zwei Demonstratoren in der frühen Entwicklungsphase durchgeführt. Dabei wurde anhand einer subjektiven Einschätzung beurteilt, wie effektiv und zufriedenstellend ein Zielpunkt erreicht werden konnte. Die Ergebnisse zeigen unter anderem, dass das Gewicht, insbesondere die Gewichtsverteilung, sowie die Bewegungsmöglichkeiten mit dem System entscheidend für die Akzeptanz eines körpergetragenen Kraftassistenzsystems sind.

**Schlüsselwörter:** Mensch-Roboter-Interaktion, Kraftassistenzsystem, ergonomische Evaluation, Komfort, Diskomfort, Handwerker

### 1. Einleitung

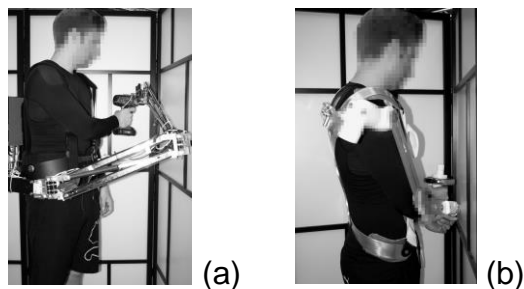
Trotz moderner Technologien gibt es zahlreiche Tätigkeiten in den Bereichen Montage, Bau und Handwerk, in denen unterstützende technische Systeme aufgrund von wenig Standardisierung und hoher Flexibilität der Tätigkeit noch nicht zum Einsatz kommen (Thiemermann 2004). Hohe physische Anforderungen in diesen Bereichen führen zu Einschränkungen im Muskelskelettsystem und erhöhen zudem das Unfallrisiko. Besonders kritisch sind Tätigkeiten über Kopf (Rempel et al. 2007; 2010a; 2010b; Welch et al. 1995), da diese nicht nur Belastungen in der oberen Extremität, dem Schulter-Nacken-Bereich und der Wirbelsäule darstellen, sondern auch Absturzrisiken von Leitern, Hebebühnen oder Gerüsten mit sich bringen können (Rempel et al. 2010a). Im Rahmen dieses Vorhabens soll deshalb ein tragbares System entwickelt werden, welches risikobehaftete Arbeitstätigkeiten im Trockenausbau unterstützt und so eine Steigerung der Arbeitseffizienz und Arbeitsqualität bewirken soll.

Neben der technischen Realisierung stellt insbesondere auch die biomechanische und physische Anpassung an den Menschen eine große Herausforderung dar (Ren et al. 2009). Diese Anpassung bildet aus Sicht der ergonomischen Produktentwicklung unter anderem einen wichtigen Faktor für die Zufriedenheit des potentiellen Benutzers. Die Zufriedenheit ist neben der Effektivität und der Effizienz ein wichtiges Maß für die Gebrauchstauglichkeit (DIN EN ISO 9241-11). Dabei sollen nachteilige Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, Sicherheit und Leistung, die bei der Nutzung des Systems entstehen, ausgeschlossen werden. Ebenso besteht das Ziel, den Benutzer in seiner Selbständigkeit und Flexibilität nicht zu beeinflussen (DIN EN

ISO 9241-210). Die hier vorgestellte Evaluation zweier Demonstratoren zielt darauf ab, Indikatoren für Beeinträchtigungen in verschiedenen Arbeitspositionen zu diagnostizieren, um möglichst früh in der Produktentwicklung einer Fehlanpassung zwischen Mensch und Technik entgegenzuwirken. Ebenso sollen Erkenntnisse darüber gewonnen werden, welche Faktoren die Zufriedenheit beeinflussen können.

## 2. Methodisches Vorgehen

Evaluiert wurden zwei Demonstratoren, die sich anhand der Tragevorrichtung, des Gewichtes und der Lokalisierung des Assistenzarmes unterscheiden (s. Abb. 1). Zur Identifizierung der Fehlanpassung wurden die Effektivität und Zufriedenheit erfasst. Ersteres wurde über die Beurteilung der Bewegungsbeeinträchtigung bei der Einnahme von Arbeitspositionen erhoben. Die Zufriedenheit wurde über Komfort- und Diskomfortfaktoren erfragt. Nach dem Komfort-/Diskomfortmodell von Zhang et al. (1996) steht Komfort mit ästhetischen Faktoren und Diskomfort mit physiologischen und biomechanischen Aspekten im Zusammenhang. Komfort hängt von einem Gefühl des Wohlbefindens und der Entspannung ab (Knoll 2006). Das Empfinden von Diskomfort hingegen wird mit Schmerz, Unbehagen und Müdigkeit assoziiert, die durch physische Faktoren wie Körperhaltung oder Druck auf den Körper vermittelt werden (Zhang et al. 1996). Aus diesem Grund wurde der Diskomfort mit einer Druckwahrnehmung und Komfort über eine Zufriedenheitsabfrage von ästhetischen Faktoren erhoben. Die Erhebung dieser Daten fand in zwei Teilen statt: einer Positionsaufgabe und einem Zufriedenheitsfragebogen.

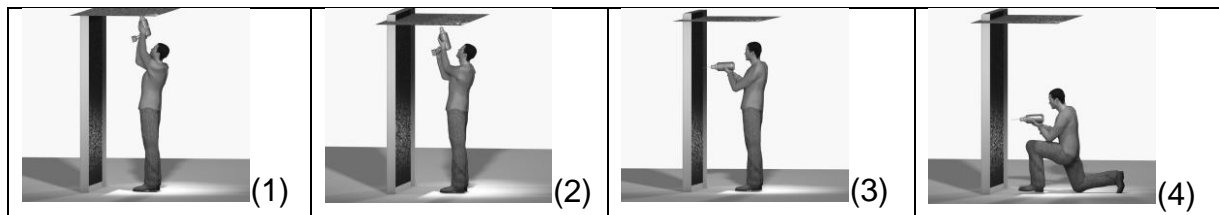


**Abbildung 1:** (a) Demonstrator A mit rucksackähnlicher Tragevorrichtung mit einem am Becken befestigten „3.Arm“ (Gesamtgewicht 11,4 kg) (b) Demonstrator B verfügt über eine körpernahe Lösung des „3. Armes“ und einer starren Tragevorrichtung (Gesamtgewicht 4,1 kg).

An der Studie nahmen 15 männliche Probanden teil ( $24,5 \pm 3,4$  Jahre). Da beide Demonstratoren im aktuellen Entwicklungsstadium auf das 50. Perzentil Mann (179 cm) (DIN EN ISO 33402-2) ausgelegt sind, wurde als Auswahlkriterium eine Größe zwischen 174 – 184 cm festgelegt. Die durchschnittliche Körpergröße der Probanden betrug 179,8 cm ( $\pm 3,7$  cm).

Die Probanden wurden instruiert, vier Arbeitspositionen (s. Abb. 2) mit jeweils einem der beiden Demonstratoren einzunehmen. Die Reihenfolge der Arbeitshaltungen und Demonstratoren wurde dabei randomisiert. Jede Haltung wurde dreimal eingenommen. Parallel zur jeweils letzten Einnahme der Arbeitsposition sollten die Probanden nachspüren, ob ein Diskomfort im Sinne von Druckempfinden der Tragevorrichtung wahrgenommen wurde und diesen mit Hilfe der CP50-Skala („Category Partitioning Scale“, Shen & Parson 1997) angeben. Die CP50-Skala erfasst Diskomfort in zwei Stufen. Im ersten Schritt wählen die Probanden eine von sechs Oberkatego-

rien („kein Diskomfort“ bis „sehr starker Diskomfort“). Im zweiten Schritt erfolgt eine Differenzierung der gewählten Oberkategorie anhand von 10 Stufen. Die zu bewertenden Körperregionen wurden mit Hilfe einer Bodymap visualisiert (Hartung 2006).



**Abbildung 2:** Die verschiedenen Arbeitspositionen (1) Oberarm  $60^\circ$  über der Schulterhorizontalen (2) Oberarm  $30^\circ$  über der Schulterhorizontalen (3) Oberarm  $< -30^\circ$  unter der Schulterhorizontalen (4) Oberarm  $< -30^\circ$  unter der Schulterhorizontalen kniend

Daran anschließend erfolgte die Erfassung der Bewegungsbeeinträchtigung anhand einer Ratingskala von 1 („überhaupt nicht beeinträchtigt“) bis 10 („außerordentlich beeinträchtigt“). Zusätzlich sollten die Probanden beschreiben, welche Komponenten beim Bewegungsablauf als besonders störend empfunden wurden.

Nachdem alle vier Arbeitspositionen mit einem Demonstrator eingenommen und bewertet wurden, wurde die Zufriedenheit anhand eines Fragebogens bewertet. Folgende Aspekte wurden zur Bewertung angegeben: Gewicht, An- und Ausziehen, Material, Design, Gurtführung, Verschluss des Gurtes, Funktionalität und konzeptionelle Position des „3. Armes“ an der Tragevorrichtung. Abschließend wurde ein subjektiver Gesamteindruck erfragt. Alle Angaben wurden über eine Smiley-Analog-Skala (Jäger 2004) abgefragt.

Die Datenanalyse erfolgte mit Hilfe des Wilcoxon-Tests. Dies ist ein nichtparametrischer Test, der anhand zwei verbundener Stichproben die Gleichheit der zentralen Tendenz überprüft (Bortz 2005, S. 133). Im Anschluss wurde eine Korrelationsanalyse nach Spearman mit den Faktoren des Zufriedenheitsfragebogens berechnet.

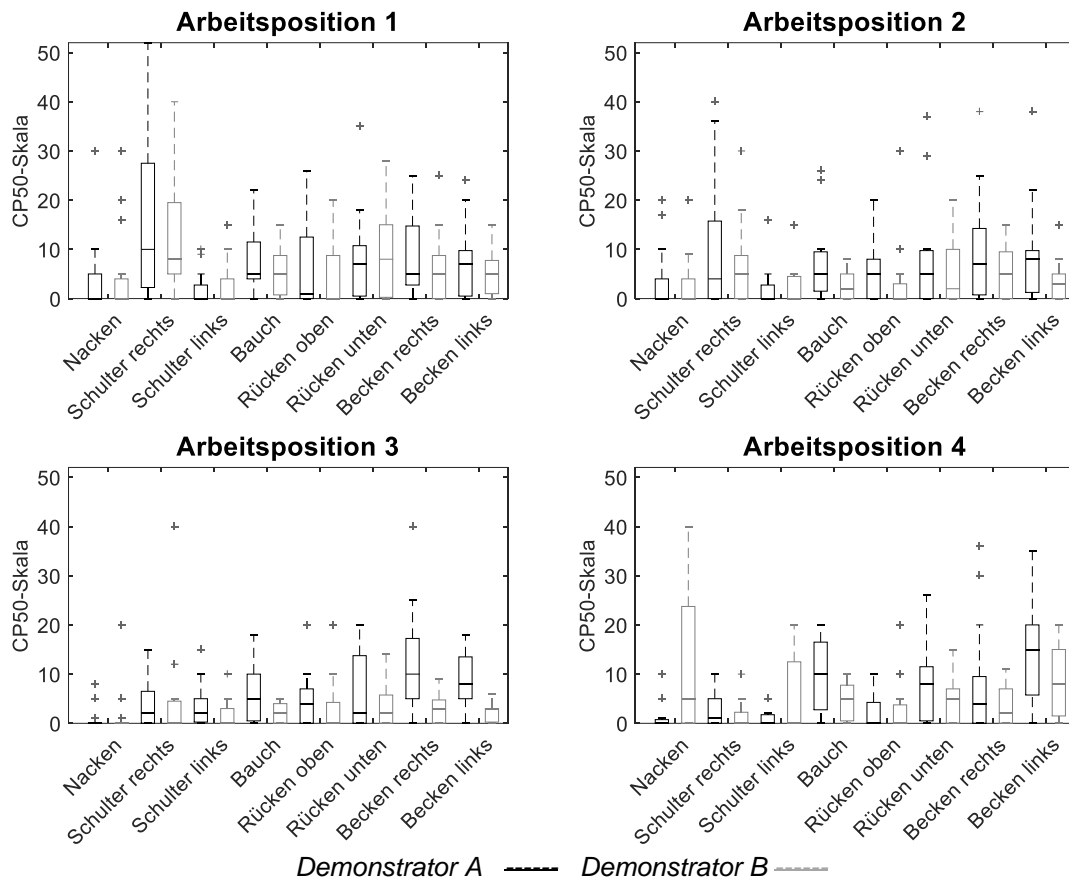
### 3. Ergebnisse

Die Werte in der Arbeitsposition 1 (Abb. 3) zeigen, dass es keine signifikanten Unterschiede im Diskomfortempfinden zwischen den beiden Demonstratoren gibt. Die Druckwahrnehmung liegt im unteren Bereich der Skala in den Kategorien sehr geringer oder geringer Diskomfort. Die Ergebnisse der Diskomfortempfindung der Tragevorrichtungen in der Arbeitsposition 2 ergeben signifikante Unterschiede in der Beurteilung des Drucks auf den Bauch und am linken Becken (s. Abb. 3 und Tab. 1).

**Tabelle 1:** Signifikante Ergebnisse der Diskomfortbewertung. Dargestellt sind die Medianwerte der Bewertung, z-Werte ( $N=15$ ) und das Signifikanzniveau ( $p < 0,05$  \*,  $p < 0,01$  \*\* und  $p < 0,001$  \*\*\*) in den verschiedenen Arbeitspositionen (AP).

Körperregionen	Demonstrator A	Demonstrator B	z-Wert	Sig.
AP 2: Bauch	5,00	2,00	-2,81	0,005**
AP 2: Becken links	8,00	3,00	-2,13	0,033*
AP 3: Bauch	5,00	2,00	-2,67	0,008**
AP 3: Becken rechts	10,00	3,00	-3,07	0,002**
AP 3: Becken links	8,00	3,00	-3,06	0,002 **
AP 4: Nacken	0,00	5,00	-2,55	0,011*
AP 4: Bauch	10,00	5,00	-2,52	0,012*

In der Arbeitsposition 3 bestehen signifikante Unterschiede in der Diskomfortwahrnehmung am Bauch sowie am Becken rechts und links (s. Abb. 3 und Tab. 1) zwischen den Demonstratoren. Das Diskomfortempfinden in den weiteren Körperarealen wird als sehr gering angegeben. Ein unterschiedliche Beurteilung zwischen den Demonstratoren zeigt sich im Nacken und Bauch in der Arbeitsposition 4 (s. Abb. 3 und Tab. 1). Diese Ergebnisse zeigen, dass die Druckverteilung der Tragvorrichtungen des Demonstrators A deutlich unterschiedlicher wahrgenommen wird als die des Demonstrators B. Beide Demonstratoren scheinen in der Arbeitsposition 3 die gleichmäßigste Druckverteilung aufzuweisen.



**Abbildung 3:** Dargestellt sind die Medianwerte und Quartile der Beurteilung des Druckempfindens (Diskomfort) in den vier verschiedenen Arbeitspositionen (N = 15, Ausreißer = +).

In der Beurteilung der Bewegungseinschränkung schneidet der Demonstrator A signifikant schlechter ab, Arbeitsposition 3 wird von beiden Demonstratoren gleichermaßen gut erreicht, während das Einnehmen der Arbeitspositionen 1, 2 und 4 von Demonstrator A eher beeinträchtigt wurde (s. Tab. 2).

**Tabelle 2:** Signifikante Ergebnisse der Beurteilung der Bewegungsbeeinträchtigung zur Erreichung eines Zielpunktes (1 = überhaupt nicht und 10 = außerordentlich). Dargestellt sind die Medianwerte der Bewertung, z-Werte (N=15) und das Signifikanzniveau ( $p < 0,05$  \*,  $p < 0,01$  \*\* und  $p < 0,001$ \*\*\*).

Beeinträchtigung	Demonstrator A	Demonstrator B	z-Wert	Sig.
Arbeitsposition 1	10,00	2,00	-3,43	0,001**
Arbeitsposition 2	10,00	1,00	-3,47	0,001**
Arbeitsposition 3	1,00	2,00	-0,26	0,797
Arbeitsposition 4	6,00	2,00	-3,21	0,001**

In der Zufriedenheitsbewertung wurde der Demonstrator B in folgenden Aspekten signifikant besser bewertet als der Demonstrator A (s. Tab 3): Gewicht, Funktionalität Gewicht, Position des 3. Armes und dem Gesamteindruck.

**Tabelle 3:** Signifikante Ergebnisse der Beurteilung der Zufriedenheit (1 = sehr unzufrieden bis 5 = sehr zufrieden). Dargestellt sind die Medianwerte der Bewertung, z-Werte (N=15) und das Signifikanzniveau ( $p < 0,05$  \*,  $p < 0,01$  \*\* und  $p < 0,001$ \*\*\*).

Zufriedenheit	Demonstrator A	Demonstrator B	z-Wert	Sig.
Gewicht	2,00	4,00	-3,33	0,001**
Gurtführung	4,00	3,00	-0,64	0,520
Design	4,00	4,00	-1,15	0,248
An- und Ausziehen	4,00	4,00	-1,25	0,210
Funktionalität	2,00	4,00	-3,24	0,001**
Material	4,00	4,00	-0,80	0,430
Position des 3. Armes	2,00	4,00	-3,00	0,003**
Verschluss	4,00	4,00	-0,16	0,874
Gesamteindruck	3,00	4,00	-2,95	0,003**

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Spearman zeigen, dass der Gesamteindruck des Demonstrators A positiv mit dem Gewicht ( $r_s = 0,55$ ,  $p < 0,05$ \*), der Gurtführung ( $r_s = 0,56$ ,  $p < 0,05$ \*), der Funktionalität ( $r_s = 0,78$ ,  $p < 0,001$ \*\*\*) und dem Material ( $r_s = 0,56$ ,  $p < 0,05$ \*) des Demonstrators A korreliert. Der Gesamteindruck des zweiten Demonstrators B korreliert mit den Faktoren Gurtführung ( $r_s = 0,70$ ,  $p < 0,01$ \*\*), An- und Ausziehen ( $r_s = 0,53$ ,  $p < 0,05$ \*) und der Funktionalität ( $r_s = 0,66$ ,  $p < 0,01$ \*\*).

#### 4. Diskussion

Die Ergebnisse der Diskomfortbewertung bilden ab, dass beide Demonstratoren für die Arbeitsposition 3 am besten geeignet sind. Die Probanden fühlten sich in dieser Position am wenigsten im Bewegungsablauf beeinträchtigt, ebenso ist das Diskomfortempfinden am homogensten verteilt. Sobald mehr Bewegungsfreiheit der Extremitäten benötigt wird, verändern sich die Beurteilungen des Druckempfindens. Das lässt darauf schließen, dass die Tragevorrichtungen bei beiden Demonstratoren nicht optimal am Körper angepasst waren und sich bei den verschiedenen Bewegungen verschoben haben. Folglich veränderte sich die Druckverteilung und somit die Gewichtsübernahme für den Probanden. Ebenso scheint es Körperbereiche zu geben, die besonders belastet oder empfindlicher als andere waren (z. B. Bauch). Diese sollten in weiteren Untersuchungen näher spezifiziert werden.

Je zufriedener die Probanden mit dem Gewicht, der Gurtführung, der Funktionalität, dem Material und dem Verschluss des Demonstrators A waren, desto besser fiel auch die Gesamtbewertung aus. Beim Demonstrator B zeigte sich ein Zusammenhang zwischen den Aspekten Gurtführung, An- und Ausziehen, der Funktionalität und der Gesamtbeurteilung. Folglich scheinen vor allem die Beurteilung der Funktionalität und der Gurtführung einen Einfluss auf die Gesamtbewertung aufzuweisen. Demnach ist es den Probanden wichtig, wie funktionell das System ist und wie das Assistenzsystem am Körper getragen wird. In diesem Punkt wurde der Demonstrator B deutlich besser bewertet.

Diskomfortaspekte, wie das Gewicht und das An- und Ausziehen, scheinen die Bewertungen der Zufriedenheit ebenso zu beeinflussen. Nach Helander und Zhang

(1997) besitzt der Diskomfort einen dominanteren Effekt. Das heißt, wenn in Diskomfortbeurteilungen ein unangenehmes Empfinden vorherrscht, kann es das Komfortleben überlagern und eine Beurteilung kann negativer ausfallen. Auf die vorliegenden Ergebnisse übertragen kann es sein, dass die Bewertung des Gewichts des Demonstrators A alle angenehmen Empfindungen überlagert hat und aus diesem Grund eine deutlich schlechtere Bewertung zustande kam. Folglich sollte in der weiteren Entwicklung neben den Komfortaspekten vor allem auch das Tragegewicht im Fokus behalten werden. Außerdem sollten Änderungen am Tragesystem vorgenommen werden, sodass die Bewegungsfreiheit des Nutzers erhalten bleibt.

## 5. Literatur

- Bortz, J. (2005). Statistik für Sozialwissenschaftler (6. Aufl.). Heidelberg: Springer. S. 132.
- DIN EN ISO 9241-11:1998, Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmen Teil 11: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit- Leitsätze. (ISO 9241-11:1998-03)
- DIN EN ISO, 9241-210:2010 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme. (ISO 9241-210:2010)
- DIN EN ISO 33402-2:2005-12. Ergonomie – Körpermaße des Menschen Teil 2: Werte. (ISO 33402-2:2005-12)
- Hartung J (2006) Objektivierung des statischen Sitzkomforts auf Fahrzeugsitzen durch die Kontaktkräfte zwischen Mensch und Sitz (Doctoral Dissertation, Technische Universität München)
- Helander MG & Zhang L (1997). Field studies of comfort and discomfort in sitting. *Ergonomics*, 40 (9): 895-915.
- Jäger, R. (2004). Konstruktion einer Ratingskala mit Smilies als symbolische Marken. *Diagnostica*, 50 (1), 31–38.
- Knoll CM (2006). Einfluss des visuellen Urteils auf den physisch erlebten Komfort am Beispiel von Sitzen (Doctoral Dissertation, Technische Universität München)
- Rempel DM, Star D, Barr A, Blanco MM, & Janowitz I (2010a). Field evaluation of a modified intervention for overhead drilling. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 7(4), 194-202.
- Rempel DM, Star D, Barr A, & Janowitz I (2010b). Overhead drilling: Comparing three bases for aligning a drilling jig to vertical. *Journal of safety research*, 41(3), 247-251.
- Rempel DM, Star D, Gibbons B, Barr A, & Janowitz I (2007) Development and evaluation of a new device for overhead drilling. *Professional safety*, 52(11), 30.
- Ren Y, Park HS, & Zhang Sr LQ (2009). Developing a whole-arm exoskeleton robot with hand opening and closing mechanism for upper limb stroke rehabilitation. In *Rehabilitation Robotics, 2009. ICORR 2009. IEEE International Conference on* (pp. 761-765). IEEE.
- Shen W & Parsons KC (1997). Validity and reliability of rating scales for seated pressure discomfort. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 20(6), 441-461
- Thiemermann S (2004). Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilmontage mit einem SCARA-Roboter. Stuttgart: Universität Stuttgart
- Welch LS, Hunting KL & Kellogg J (1995). Work-related musculoskeletal symptoms among sheet metal workers. *American journal of industrial medicine*, 27(6), 783-791
- Zhang L, Helander MG & Drury CG (1996). Identifying factors of comfort and discomfort in sitting. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 38(3), 377-389.

**Förderung:** Ein Die hier dargestellten Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „3. Arm: Handwerker-Kraftassistenzsystem mit adaptiver Mensch-Technik-Interaktion“ durchgeführt. Dieses Projekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung sowie des Europäischen Sozialfonds unter dem Förderkennzeichen 16SV6172 unterstützt. Projektpartner sind: Würth Elektronik GmbH & Co.KG, Robert Bosch GmbH, O.T.W.-Orthopädie Winkler, Mechatronik-Zentrum Hannover (LUH), Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation (KIT).