

## **Ermittlung des Stützbereichs und Eingrenzung der Unterstützkraftspanne eines chirurgischen Armassistenzsystems am distalen Unterarm bei statischen Präzisionsaufgaben**

Ferdinand LANGER, Sara KARAKOLCU,  
Othmen Taieb BEN MANSOUR, Thomas MAIER

*Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design,  
Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design, Universität Stuttgart,  
Pfaffenwaldring 9, D-70569 Stuttgart*

**Kurzfassung:** Bei Operationen ergeben sich häufig statische, nicht komfortable Arm- und Oberkörperhaltungen. Um dem entgegenzuwirken, wurde ein chirurgisches Armassistenzsystem entwickelt, das die oberen Extremitäten durch eine Unterstützkraft physisch entlastet und den Unterarmbewegungen uneingeschränkt folgt. Es werden verschiedene Kombinationen des Stützbereichs, bestehend aus Stützlänge und -position, am distalen Unterarm untersucht. Dabei zeigt sich, dass die Stützung des Unterarms mit einer Stützlänge von 100 mm und einer Stützposition von 25 % zu einem höheren Komfort bei gleichzeitiger Nutzbarkeit für unterschiedliche Perzentilgruppen führt. In der davon unabhängigen Studie der Unterstützkraftspanne wird ein Bereich der Unterstützkraft in Abhängigkeit des Körpergewichts untersucht und eingegrenzt.

**Schlüsselwörter:** Armassistenzsystem, Exoskelett, Mensch-Maschine-Interaktion, Unterarmauflage, Stützbereich, Unterstützkraft

### **1. Einleitung**

Bei offen-chirurgischen, laparoskopischen und neurochirurgischen Operationen ergeben sich häufig nicht komfortable Arm- und Oberkörperhaltungen, welche zu einer hohen Beanspruchung der oberen Extremitäten der Chirurgeninnen und Chirurgen und muskuloskelettalen Erkrankungen führen (Szeto et al. 2012, Lave et al. 2020). Dadurch kann es bei Präzisionsaufgaben zu Ermüdung und Effektivitätsreduzierung kommen (Galleano et al. 2006). Um dem entgegenzuwirken, wurden ein chirurgisches Armassistenzsystem (CAS) und ein mechanisches chirurgisches Armassistenzsystem (mCAS) entwickelt, welche die oberen Extremitäten des Operators während chirurgischer Eingriffe physisch entlasten (Karlovic 2019, Langer & Maier 2023). Dies wird durch die aktive Unterstützung der Unterarme mit einer individuell an das Körpergewicht adaptierbaren Unterstützungskraft erreicht (Karlovic 2019). Die Mensch-Maschine-Schnittstelle stellt die Unterarmauflage dar. Eine Stützung des distalen Unterarms hat, gegenüber der Stützung am proximalen Unterarm und keiner Stützung, objektiv und subjektiv einen positiven Einfluss auf die Effektivität und Zufriedenheit bei der Aufgabenausführung einer statischen Präzisionsaufgabe (Langer & Maier 2023).

In der ersten Studie wird im Rahmen dieser Veröffentlichung und im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsprojektes

(DFG 430136438) zunächst der optimale Stützbereich am distalen Unterarm untersucht. Dabei wird ein absoluter Wert in [mm] für die Stützlänge und ein relativer Wert in [%] für die Stützposition abgeleitet. Aufbauend darauf wird in der zweiten Studie die Unterstützkraftspanne für den distalen Unterarm bei einer statischen Aufgabenausführung untersucht. Daraus wird ein Bereich einer möglichen optimalen Unterstützkraft in Abhängigkeit des Körpergewichts in [%] eingegrenzt.

## 2. Methode

### 2.1 Stützbereich

Um den Stützbereich des distalen Unterarms auf der flachen Unterarmauflage zu untersuchen, werden sechs Stützlengthen (25 mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm, 125 mm und 150 mm) und vier Stützpositionen (20 %, 25 %, 30 % und 35 %) kombiniert. Aus den Studienergebnissen soll eine Stützlength als absoluter Wert in [mm] abgeleitet werden, welche über möglichst alle Nutzendenperzentile (5-perzentil Frau bis 95-perzentil Mann) hinweg eingesetzt werden kann. Damit soll erreicht werden, dass bei einem Wechsel der Nutzenden des Armassistenzsystems, über unterschiedliche Perzentilgruppen hinweg, im Praxiseinsatz kein Anpassen der Länge der Unterarmauflage nötig ist.

Die Stützposition wird definiert als der Abstand vom Handgelenk (Styloid-Fortsatz des Ellenknochens (Ulna)) zum Mittelpunkt der Unterarmauflage (siehe Abb. 1). Dieser Abstand der Stützposition in [mm] wird individuell pro Proband berechnet als Faktor der Ellenbogen-Handgelenk-Länge gemessen nach DIN EN ISO 7250-1 (2017). Aus der Studie soll ein Faktor in [%] der Stützposition abgeleitet werden, wodurch die individuelle Unterarmlänge der Nutzenden bei der Interaktion miteinbezogen wird.

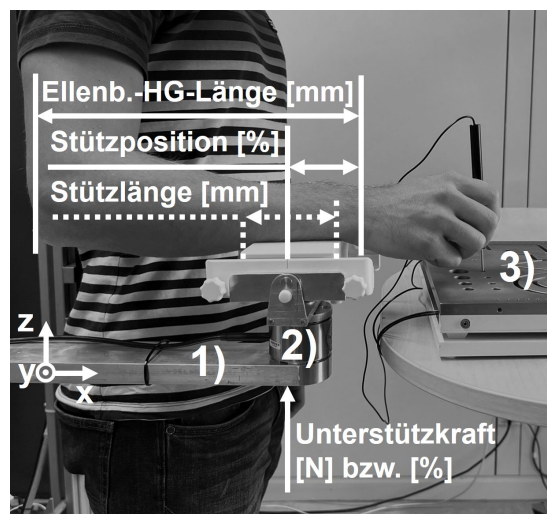
Die Kombination unterschiedlicher Stützlengthen und -positionen ergibt 24 mögliche Stützbereiche. Es werden Stützbereiche mit Fokus auf den distalen Unterarm untersucht, wodurch Kombinationen aus Stützlengthe und -position, welche das Handgelenk oder die Grenze zwischen distalem und proximalem Unterarm überschreiten, probandenspezifisch ausgeschlossen werden.

Die Auswahl der Probanden basiert auf den Merkmalen Alter zwischen 18 und 67 Jahren sowie keine körperlichen Einschränkungen im Schulter-, Arm- und Handbereich der dominanten Hand. 31 Probanden (Alter:  $\bar{X}$  = 28,4 Jahre, SD = 8,7 Jahre, Range = 19-62 Jahre; 35,5 % weiblich; 64,5 % männlich) nehmen an der Studie teil. Die Probanden sind zu 87,1 % rechtshändig und zu 12,9 % linkshändig. Zu Beginn werden die Körpermaße der Probanden nach DIN EN ISO 7250-1 (2017) mit besonderem Fokus auf die Ellenbogen-Handgelenk-Länge (Ellenb.-HG-Länge;  $\bar{X}$  = 280 mm, SD = 24 mm, Range = 236-325 mm) erfasst.

Zur Untersuchung des Stützbereichs wird ein abstraktes Versuchsszenario, angelehnt an einen offen-chirurgischen Eingriff, aufgebaut. In der Studie „Stützbereich“ führen Probanden eine statische Präzisionsaufgabe mit der dominanten Hand durch, während der um 90° gebeugte dominante Unterarm (Flexion) in randomisierter Reihenfolge auf der Unterarmauflage des mechanischen chirurgischen Armassistenzsystems mit unterschiedlichen Stützpositionen und -lengthen gestützt wird (siehe Abb. 1). Die Höhe der Versuchsaufgabe und der Unterarmauflage sowie die Unterstützkraft (1,50 % des Körpergewichts) des mCAS werden vor der Durchführung

probandenspezifisch angepasst (Langer & Maier 2023).

Die Effektivität der Aufgabenausführung bzw. die Handruhe (Steadiness) der Stützbereiche wird mit der Motorischen Leistungsserie des Wiener Testsystems durch das Halten eines Stiftes (Durchmesser = 2,0 mm) in einer Bohrung in einer Metallplatte (Durchmesser = 4,8 mm) getestet (Schuhfried 2015). Das Ziel dabei ist, die Metallplatte nicht bzw. möglichst wenig mit der Stiftspitze zu berühren. Die Anzahl der Kontakte zwischen Stift und Metallplatte (Fehleranzahl) werden mit dem Wiener Testsystem aufgezeichnet. Die Ausführungszeit der Präzisionsaufgabe beträgt 32 Sekunden. Zusätzlich werden die Probanden jeweils im Anschluss an jeden Durchlauf zu Komfort, Präzision, Förderung und Sicherheit befragt. Dabei wird auf eine bipolare, fünfstufige Likert-Skala zurückgegriffen.



**Abbildung 1:** Versuchsaufbau mit rechthändigem Probanden; Tragarm Armassistenzsystem (1) mit Mensch-Maschine-Schnittstelle, Unterarmauflage (2), Versuchsaufgabe Steadiness (3); in Anlehnung an (Langer & Maier 2023)

## 2.2 Unterstützkraftspanne

Auf der Untersuchung des Stützbereichs aufbauend wird in der zweiten Studie die Unterstützkraft in Abhängigkeit des Körpergewichts des mechanischen chirurgischen Armassistenzsystems auf den distalen Unterarm gegenüber keiner Stützung untersucht. Dabei wird nach Langer & Maier (2023) die Ausgangskraft der Unterstützkraft von 1,50 % des Körpergewichts angewendet. Davon ausgehend werden mit der Normzahlreihe R10 jeweils drei geringere und drei höhere Unterstützkraften durch Division bzw. Multiplikation mit 1,25, 1,60 und 2,00 berechnet und miteinbezogen. Die Stützlänge beträgt 100 mm und die Stützposition 25 %.

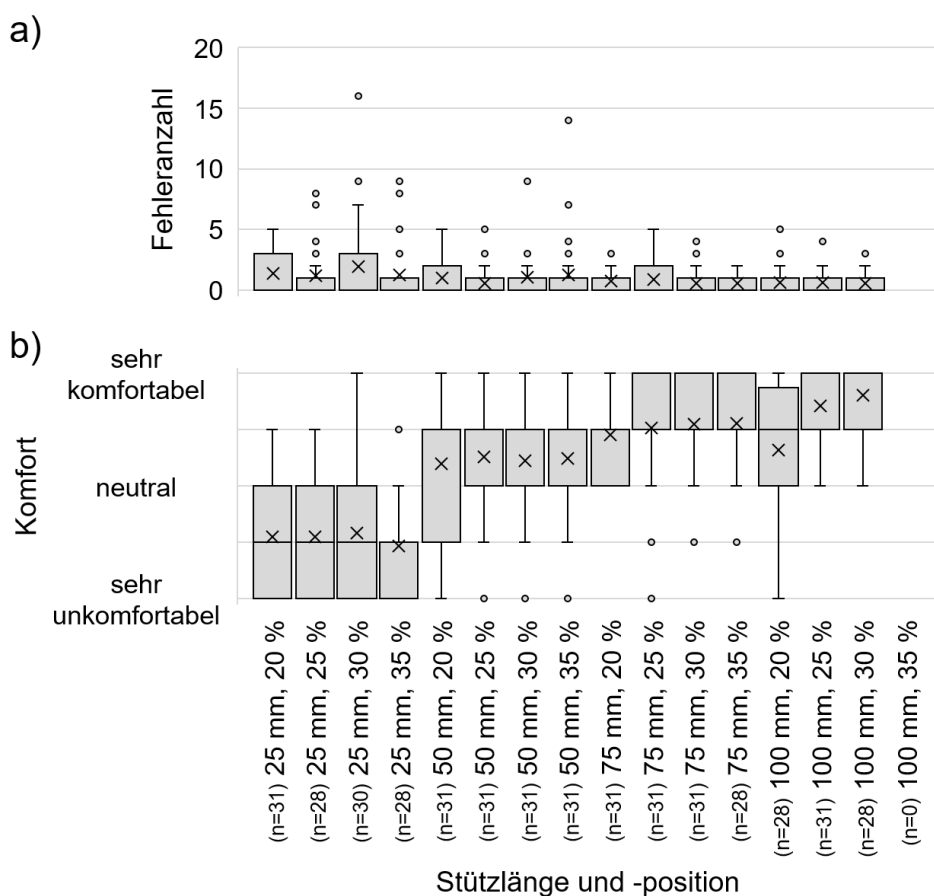
Die Auswahl der Probanden basiert auf den Merkmalen Alter zwischen 18 und 67 Jahren ohne körperliche Einschränkungen im Schulter-, Arm- und Handbereich der dominanten Hand. 30 Probanden (Alter:  $\bar{X}$  = 23,5 Jahre, SD = 2,4 Jahre, Range = 19-30 Jahre; 33,3 % weiblich; 66,7 % männlich) nehmen an der Studie teil. Die Probanden sind zu 90,0 % rechtshändig und zu 10,0 % linkshändig. Zu Beginn werden die Körpermaße der Probanden nach DIN EN ISO 7250-1 (2017) mit besonderem Fokus auf das Körpergewicht ( $\bar{X}$  = 76,4 kg, SD = 14,2 kg, Range = 58,1-130,0 kg) erfasst.

In der Probandenstudie wird die gleiche Präzisionsaufgabe, wie bei der Untersuchung des Stützbereichs eingesetzt (siehe Abb. 1). Die Unterstützungskraft in Abhängigkeit des Körpergewichts in [%] wird basierend auf dem Körpergewicht individuell pro Proband in Newton berechnet und in randomisierter Reihenfolge am mCAS eingestellt. Die Durchführung mit „keiner Stützung“ (KS) des Unterarms wird ebenfalls im Versuchsablauf randomisiert integriert. Zusätzlich zu dem objektiven Parameter Fehleranzahl werden die Probanden jeweils im Anschluss an jeden Durchlauf zu Komfort, Präzision, Förderung und Sicherheit befragt. Dabei wird eine bipolare, siebenstufige Likert-Skala verwendet.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Stützbereich

Die Ergebnisse der Fehleranzahl und des Komforts sind in Abbildung 2 dargestellt. Stützlängen von 125 mm und 150 mm werden in die Auswertung nicht miteinbezogen, da bei diesen ein Großteil der Kombinationen nicht angewendet wurde, weil das Handgelenk oder die Mitte des Unterarms bei distaler Stützung überschritten würde. Daraus folgt ebenfalls die unterschiedliche Probandenanzahl (n) je Stützbereich.



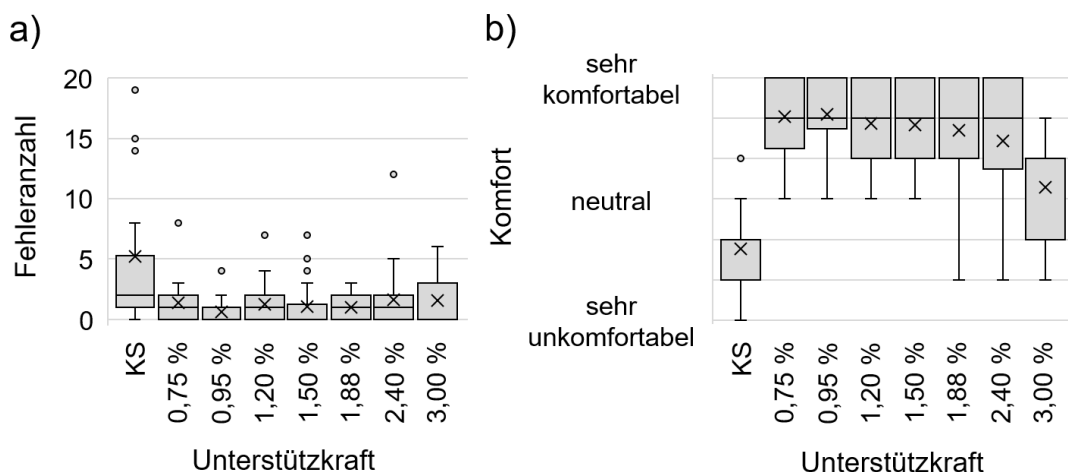
**Abbildung 2:** Ergebnisse der objektiven Parameter Fehleranzahl (a) und der subjektiven Komfortbewertung (b) in Abhängigkeit des Stützbereichs bestehend aus Stützlänge [mm] und Stützposition [%]

Abb. 2a) zeigt die Fehleranzahl je nach Stützbereich. Die durchschnittliche Fehleranzahl liegt in einem Bereich von  $\bar{X} = 0,58$  (SD = 0,99) bei einer Stützlänge von 75 mm mit einer Stützposition von 30 % bis  $\bar{X} = 2,03$  (SD = 3,53) bei 25 mm mit 30 %. Abb. 2b) veranschaulicht die Bewertung des Komforts (sehr unkomfortabel = -2, neutral = 0, sehr komfortabel = 2) bei der Ausführung der Präzisionsaufgabe je nach Stützbereich. Der höchste durchschnittliche Komfort tritt mit  $\bar{X} = 1,42$  (SD = 0,56) bei einer Stützlänge von 100 mm und einer Stützposition von 25 % sowie mit  $\bar{X} = 1,61$  (SD = 0,57) bei 100 mm und 30 % auf. Demgegenüber beträgt der minimale Komfort  $\bar{X} = -1,06$  (SD = 0,96) bei 25 mm und 35 %.

### 3.2 Unterstützkraftspanne

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse „Fehleranzahl“ und „Komfort“ bezüglich der Unterstützkraft dargestellt. Bei einer Unterstützkraft von 0,75 % kann die Aufgabe durch zwei Probanden wegen geringer Unterstützkraft ( $< 4,5$  N) technisch nicht durchgeführt werden.

Abb. 3a) zeigt die durchschnittliche Fehleranzahl für keine Stützung (KS)  $\bar{X} = 5,20$  (SD = 7,02) sowie eine minimale durchschnittliche Fehleranzahl  $\bar{X} = 0,60$  (SD = 1,10) bei der Unterstützkraft 0,95 %. In Abb. 3b) ist die Bewertung des Komforts (sehr unkomfortabel = -3, neutral = 0, sehr komfortabel = 3) je nach Unterstützkraft dargestellt. Der durchschnittliche Komfort bei keiner Stützung beträgt  $\bar{X} = -1,23$  (SD = 0,94). Demgegenüber beträgt dieser maximal  $\bar{X} = 2,10$  (SD = 0,84) bei einer Unterstützkraft von 0,95 % und minimal  $\bar{X} = 0,30$  (SD = 1,24) bei 3,00 %. Bei der Förderung (sehr schlecht = -3, neutral = 0, sehr gut = 3) ergeben sich zwischen einer Unterstützkraft von 0,95 % und 1,88 % durchschnittliche Bewertungen größer 2,00 im Gegensatz zu den anderen Unterstützkraften und keiner Stützung.



**Abbildung 3:** Ergebnisse der objektiven Parameter Fehleranzahl (a) und der subjektiven Komfortbewertung (b) in Abhängigkeit der Unterstützkraft [%]

## 4. Diskussion

Die Untersuchung des Stützbereichs in der ersten Studie zeigt, dass die Kombinationen der Stützlänge von 100 mm und der Stützposition von 25 % und 30 % einen

positiven Einfluss auf die subjektive Bewertung gegenüber den anderen Stützbereichen aufweist. Der Komfort bei der 100 mm langen flachen Unterarmauflage erreicht durchschnittlich eine bessere Bewertung als andere Stützlängen. Die Stützposition 25 % bietet gegenüber der Stützposition 30 % den Vorteil, dass diese der Mitte des distalen Unterarms entspricht und somit bei einer größtmöglichen Anzahl an Nutzenden ein Übertreten in Handgelenk oder proximalen Unterarm verhindert wird, was zu einer perzentilübergreifenden (ab einer 1-perzentil Frau bzgl. Ellenbogen-Handgelenklänge) Anwendbarkeit führt. Daraus folgt, dass eine Stützlänge von 100 mm in Kombination mit einer Stützposition von 25 % als Stützbereich für die Interaktion mit einem Armassistenzsystem bei Unterstützung am distalen Unterarm empfohlen werden kann.

In der zweiten Studie zeigt die Untersuchung der Unterstützkraftspanne am distalen Unterarm, dass diese gegenüber keiner Stützung objektiv zu weniger Fehlern und subjektiv zu einem höheren Komfort führt. Die Untersuchung zeigt, dass der Bereich zwischen 0,75 % und 2,40 % des Körpergewichts einen höheren Komfort bieten als 3,00 % Unterstützkraft. Die Unterstützkraften 0,95 % bis 1,88 % bieten durchschnittlich eine subjektiv bessere Förderung bei der Bearbeitung der Aufgabe als geringere oder höhere Unterstützkraften.

Die Ergebnisse der Studien können für die Entwicklung der Mensch-Maschine-Schnittstelle von chirurgischen Armassistenzsystemen und Exoskeletten genutzt werden. Insbesondere umfasst dies die tiefergehende Untersuchung der Unterstützkraft für Stützung des distalen Unterarms mit Armassistenzsystemen und die damit einhergehende Flächenpressung zwischen Unterarmauflage des chirurgischen Armassistenzsystems und dem Unterarm der Nutzenden.

## 5. Literatur

- DIN EN ISO 7250-1 (2017) Wesentliche Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung – Teil 1: Körpermaßdefinitionen und -messpunkte, 9–45.
- Galleano R, Carter F, Brown S, Frank T, Cuschieri A (2006) Can Armrests Improve Comfort and Task Performance in Laparoscopic Surgery? In: *Annals of Surgery*, Vol. 243, No. 3:329–333.
- Karlovic K (2019) Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit der Mensch-Maschine-Schnittstelle interaktionsbasierter, adaptiv physischer Assistenzsysteme. IKTD, Universität Stuttgart: Dissertation, 8–147.
- Langer F, Maier T (2023) Einfluss der Position der Unterarmauflage eines Armassistenzsystems auf die Genauigkeit bei statischen Präzisionsaufgaben in chirurgischen Anwendungsfällen, GfA Frühjahrskongress, Hannover, 2023, B.6.9
- Lave A, Gondar R, Demetriades A, Meling T (2020) Ergonomics and musculoskeletal disorders in neurosurgery: a systematic review. In: *Acta Neurochirurgica* 162: 2213–2220.
- Szeto GPY, Cheng SWK, Poon JTC, Ting ACW, Tsang RCC, Ho P (2012) Surgeons' Static Posture and Movement Repetitions in open and Laparoscopic Surgery. In: *Journal of Surgical Research* 172: e19–e31.
- Schuhfried GmbH (2015) Wiener Testsystem – Motorische Leistungsserie – Manual Version 30 Revision 1. Mödling, Österreich, 3–17.

**Danksagung:** Diese Forschungsarbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Forschungsprojekts „Usability-Optimierung der Interfaceparameter Form und Material bei einem interaktionsbasierten Armassistenzsystem“ (Projektnummer 430136438) gefördert.



Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

## Arbeitswissenschaft in-the-loop

**Mensch-Technologie-Integration  
und ihre Auswirkung auf Mensch,  
Arbeit und Arbeitsgestaltung**

70. Kongress der  
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Institut für Arbeitswissenschaft und  
Technologiemanagement IAT  
Universität Stuttgart

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für  
Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

06. – 08. März 2024

---

## GfA-Press

---

**Bericht zum 70. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 06. – 08. März 2024**

**Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart**

**In Zusammenarbeit mit: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Sankt Augustin: GfA-Press, 2024

ISBN 978-3-936804-34-8

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle (s. u.) erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Sankt Augustin, Schriftleitung: Prof. Dr. Rolf Ellegast**

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,
- den Kongressband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

### **Geschäftsstelle der GfA**

Simone John, Tel.: +49 (0)30 1300-13003, Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin

[info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de](mailto:info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de) · [www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de](http://www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de)

### **Screen design und Umsetzung**

© 2024 fröse multimedia, Frank Fröse,

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