

Einfluss der Position der Unterarmauflage eines Armassistenzsystems auf die Genauigkeit bei statischen Präzisionsaufgaben in chirurgischen Anwendungsfällen

Ferdinand LANGER, Thomas MAIER

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

Kurzfassung: Bei laparoskopischen Operationen ergeben sich häufig statische, nicht komfortable Arm- und Oberkörperhaltungen. Um dem entgegenzuwirken, wurde ein interaktionsbasiertes Armassistenzsystem entwickelt, das die oberen Extremitäten durch eine Unterstützungskraft physisch entlastet und den Unterarmbewegungen uneingeschränkt mit der Armauflage folgt. Es werden drei kritische Haltungen der Stützposition am Unterarm untersucht. Dabei zeigt sich, dass die Stützung des distalen Unterarms zu einer geringeren Fehleranzahl und Fehlerzeit gegenüber dem proximalen Unterarm und ohne Stützung führt. Die Untersuchung der Gewichtskraft des distalen Unterarms auf die Auflage des Assistenzsystems zeigt, dass diese mit Körpergewicht und Unterarmumfang korreliert.

Schlüsselwörter: Armassistenzsystem, Exoskelett, Mensch-Maschine-Interaktion, Unterarmauflage, Stützposition, Unterarmgewicht

1. Einleitung

Bei einer laparoskopischen Operation ergeben sich häufig statische, nicht komfortable Arm- und Oberkörperhaltungen, welche zu einer hohen Beanspruchung der oberen Extremitäten der Chirurgen führt (Galleano et al. 2006; Szeto et al. 2012; Choi 2012). Dadurch kann es bei Präzisionsaufgaben zu Ermüdung und Effektivitätsreduzierung mit erhöhter Fehlerrate kommen (Galleano et al. 2006). Um dem entgegenzuwirken, wurde im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojekts (IoC 103) ein interaktionsbasiertes chirurgisches Armassistenzsystem (CAS) entwickelt, das die oberen Extremitäten des Operateurs während laparoskopischer Eingriffe physisch entlastet (Abbildung 1). Dies wird durch die aktive Unterstützung der Unterarme erreicht. Dabei wirkt auf die Unterarme proximal eine individuell an das Körpergewicht adaptierbare Unterstützungskraft (Karlovic 2019). Die Mensch-Maschine-Schnittstelle stellt die Unterarmauflage dar. Die Stützposition am proximalen Unterarm verringert bei Unterarmauflagen ohne reibungsarme Rotationsfreiheitsgrade für die Unterarmdrehung den Einfluss der Überkreuzung von Radius und Ulna bei Pronations- und Supinationsbewegungen mit Zwangsverschiebung der Hand (Karlovic 2019). Der Einsatz des chirurgischen Armassistenzsystems zur Stützung des proximalen Unterarms hat einen positiven Einfluss auf die Fehlerreduktion bei der dynamischen Aufgabenausführung im Vergleich zu keiner Unterstützung, ohne die

Ausführungszeit negativ zu beeinflussen (Langer et al. 2022a). Ein Lösen des Unterarms vom chirurgischen Armassistenzsystem muss in sicherheitskritischen Situationen jederzeit möglich sein. Dies geschieht durch eine schnelle vertikale Bewegung der Arme nach oben (Karlovic 2019). Folglich können die Unterarme nicht fest, z. B. durch ein Klettband, mit der Unterarmauflage verbunden werden. Die Interfaceparameter Form und Material der Unterarmauflage sind Kriterien für die effektive und effiziente Interaktion mit dem CAS. Diese Interfaceparameter werden im Rahmen eines Forschungsprojekts (DFG 430136438) untersucht. Es zeigt sich bei der Stützung am proximalen Unterarm ein Vorteil einer perzentiladaptierten anthropomorphen Form gegenüber einer flachen Unterarmauflage und gegenüber keiner Stützung (Langer et al. 2022b).

Aufbauend auf bisherigen Erkenntnissen wird im Rahmen dieser Veröffentlichung untersucht, ob sich die Stützung des distalen Unterarms gegenüber dem proximalen Unterarm vorteilhaft auf die Effektivität einer statischen Aufgabenausführung auswirkt. Dazu werden im ersten Teil drei kritische Fälle der Haltung bzw. Stützposition des Unterarms (UA) auf der Unterarmauflage untersucht. Es werden keine Stützung des UA, Stützung des proximalen UA und Stützung des distalen UA untersucht. In der zweiten Studie wird die Kraft untersucht, mit der der distale Unterarm bei einer statischen Haltung auf eine Unterarmauflage wirkt. Damit soll der Bereich der benötigten Unterstützkraft zur dynamischen Stützung des distalen Unterarms erfasst werden.

2. Methode

2.1 Stützposition

Um drei kritische Haltungen der Stützposition des Unterarms auf der Unterarmauflage zu untersuchen, wird ein abstraktes Versuchsszenario, angelehnt an einen offen-chirurgischen Eingriff, aufgebaut und eine Probandenstudie durchgeführt. Die Auswahl der Probanden basiert auf den Merkmalen Alter zwischen 18 und 67 Jahren und keine körperlichen Einschränkungen im Schulter-, Arm- und Handbereich der dominanten Hand. 17 Probanden (Alter: \bar{X} = 26,8 Jahre, SD = 7,5 Jahre, Range = 20-54 Jahre; 29,4 % weiblich; 70,6 % männlich). Die Probanden waren zu 94,1 % Rechtshänder und zu 5,9 % Linkshänder. Zu Beginn werden die Körpermaße der Probanden nach DIN EN ISO 7250-1 (2017) erfasst.

In der Probandenstudie „Stützposition“ werden keine Stützung des Unterarms, Stützung des proximalen Unterarms und Stützung des distalen Unterarms untersucht. Probanden führen eine statische Präzisionsaufgabe mit der dominanten Hand durch, während der um 90° gebeugte Unterarm (Flexion) in randomisierter Reihenfolge auf der Unterarmauflage des feststehenden chirurgischen Armassistenzsystems distal (dUA) oder proximal (pUA) oder nicht abgestützt (KS) wird. Die Höhe der Versuchsaufgabe und der Unterarmauflage des CAS werden vor der Durchführung probandenspezifisch angepasst. Die Unterstützungsfunktion des CAS wird deaktiviert und es dient somit als feststehende, statische Stütze.

Im Falle der Stützung des distalen Unterarms (dUA) wird dieser auf einer 80 mm langen flachen Form abgelegt, sodass der Styloid-Fortsatz des Ellenknochens (Ulna) mit dem distalen Ende der Unterarmauflage eine Linie bildet und die Hand weiterhin

frei beweglich bleibt (vgl. Abbildung 1). Bei der Stützung des proximalen Unterarms (pUA) bildet das Olecranon der Ulna entsprechend eine Linie mit dem proximalen Ende der flachen Unterarmauflage.

Die Effektivität der Aufgabenausführung bzw. die Handruhe (Steadiness) der beiden Stützpositionen bzw. keiner Stützung wird mit der Motorischen Leistungsserie des Wiener Testsystems durch das Halten eines Stiftes (Durchmesser = 2,0 mm) in einer vorgegebenen Bohrung in einer Metallplatte (Durchmesser = 4,8 mm) getestet (Schuhfried 2015). Das Ziel ist dabei, die Metallplatte nicht bzw. möglichst wenig zu berühren. Die Anzahl der Kontakte zwischen Stift und Metallplatte (Anzahl der Fehler) und die Kontaktdauer (Fehlerzeit) werden mit dem Wiener Testsystem aufgezeichnet. Die Ausführungszeit der Aufgabe beträgt 32 Sekunden und wird durch den Versuchsleiter gestartet. Zusätzlich zu den objektiven Parametern Fehleranzahl und Fehlerzeit werden die Probanden im Anschluss an die Versuchsdurchführung befragt, welche Stützposition bzw. ob keine Stützung die subjektiv sicherste Aufgabenausführung zur Folge hatte, mit den Antwortmöglichkeiten „keine Stützung“, „Stützung proximaler Unterarm“, „Stützung distaler Unterarm“ oder „keine Angabe“.

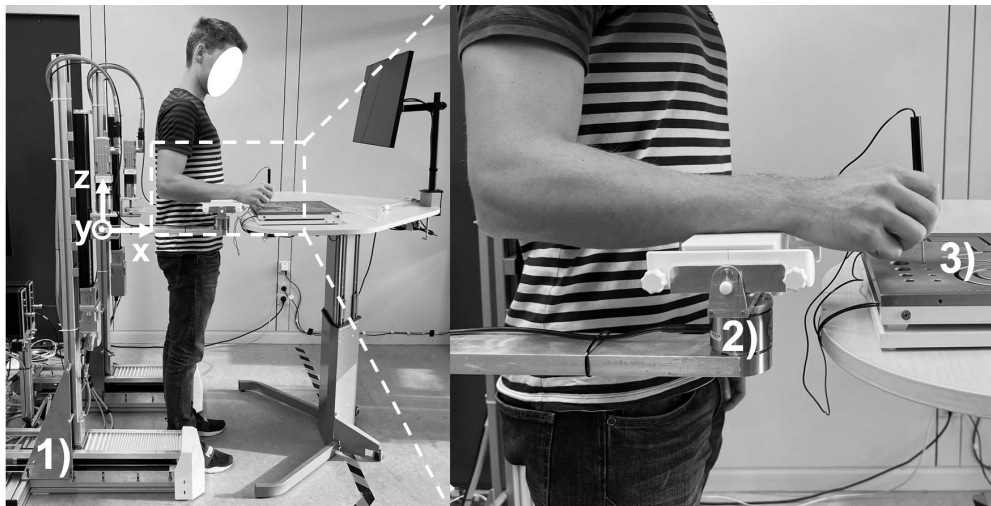


Abbildung 1: Versuchsaufbau mit rechtshändigem Probanden; interaktionsbasiertes Armassistenzsystem CAS (1), Mensch-Maschine-Schnittstelle Unterarmauflage (2), Versuchsaufgabe Steadiness (3)

2.2 Unterarmgewicht

Um die Kraft zu untersuchen, mit der der distale Unterarm in einer statischen Haltung auf eine Unterarmauflage wirkt, wird dessen Gewichtskraft mit CAS aufgezeichnet und eine Probandenstudie durchgeführt. Die Auswahl der Probanden basiert auf den Merkmalen Alter zwischen 18 und 67 Jahren und keine körperlichen Einschränkungen im Schulter-, Arm- und Handbereich der dominanten Hand. 32 Probanden (Alter: \bar{X} = 24,6 Jahre, SD = 5,3 Jahre, Range = 18-42 Jahre; 37,5 % weiblich; 62,5 % männlich). Die Probanden waren zu 93,7 % Rechtshänder und zu 6,3 % Linkshänder. Zu Beginn werden die Körpermaße der Probanden nach DIN EN ISO 7250-1 (2017) erfasst (Körpergewicht: \bar{X} = 75,1 kg, SD = 13,1 kg, Range = 50,2-115,0 kg). Der Unterarmumfang der Probanden wurde in drei verschiedenen Armhaltungen gemäß DIN EN ISO 7250-1 (2017), der anthropometrischen Datenbank iSize (Avalution 2009) und der Gebrauchshaltung des CAS

während der Studie (90° Beugung zwischen Unterarm und Oberarm) gemessen und daraus pro Proband der Durchschnitt berechnet (Unterarmumfang: $\emptyset = 27,0$ cm, SD = 2,6 cm, Range = 23,1-34,7 cm).

In der Probandenstudie „Unterarmgewicht“ wird die Kraft untersucht, mit der der distale Unterarm in einer statischen Haltung auf eine Unterarmauflage wirkt. Damit soll der Bereich der benötigten Unterstützungskraft zur dynamischen Stützung des distalen Unterarms erfasst werden. Die Probanden legen den Unterarm der dominanten Hand auf eine 80 mm lange flachen Form ab, sodass der Styloid-Fortsatz des Ellenknochens (Ulna) mit dem distalen Ende der Unterarmauflage eine Linie bildet und die Hand weiterhin frei beweglich bleibt. Bei der Versuchsdurchführung wird keine Präzisionsaufgabe ausgeführt. Dabei sollen Unterarm, Oberarm und Schulter locker ohne Muskelspannung abgelegt werden. Die flache Unterarmauflage ist mit einem 6-Achs-Kraftsensor mit dem feststehenden chirurgischen Armassistenzsystem verbunden. Die Höhe der Unterarmauflage des CAS wird vor der Durchführung probandenspezifisch angepasst, um eine Flexion des Unterarms zum Oberarm von 90° zu erreichen. Anschließend wird die zum Boden orthogonal wirkende Gewichtskraft des Unterarms auf die Unterarmauflage auf dem Kraftsensor gemessen und dokumentiert.

3. Ergebnisse

3.1 Stützposition

Die Ergebnisse der objektiv gemessenen Parameter, Ausführungszeit und Fehleranzahl der Studie sind in Abbildung 2 dargestellt. Abb. 2a) zeigt die Fehleranzahl je nach Haltung. Die durchschnittliche Fehleranzahl bei keiner Stützung (KS) beträgt $\emptyset = 13,76$ (SD = 12,75, Ausreißer mit 36 und 53 Fehlern), bei Stützung des proximalen Unterarms (pUA) $\emptyset = 3,35$ Fehler (SD = 3,79) und bei Stützung des distalen Unterarms (dUA) $\emptyset = 1,47$ (SD = 2,15).

Abb. 2b) veranschaulicht die kumulierte Fehlerzeit pro Haltung bei der Ausführung der Präzisionsaufgabe je nach Stützposition bzw. keiner Stützung. Die durchschnittliche Fehlerzeit ohne Stützung beläuft sich auf $\emptyset = 1,01$ s (SD = 1,08 s). Demgegenüber beträgt sie bei Stützung des proximalen Unterarms $\emptyset = 0,35$ s (SD = 0,42 s) und bei Stützung des distalen Unterarms $\emptyset = 0,11$ s (SD = 0,18 s).

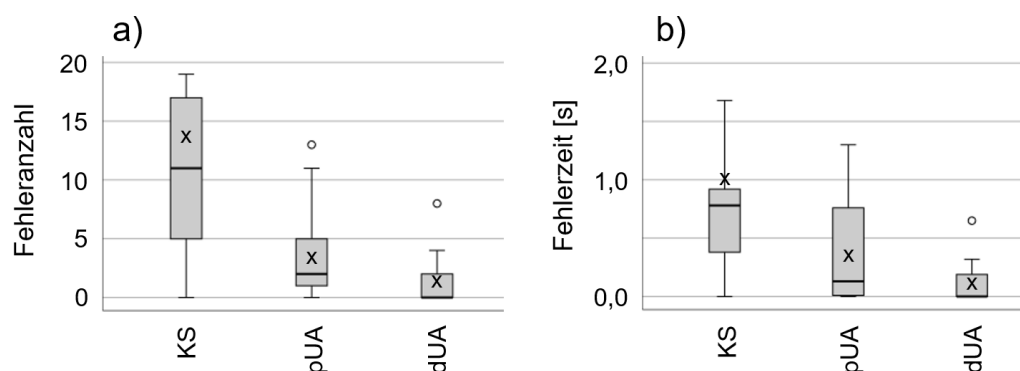


Abbildung 2: Ergebnisse der objektiven Parameter Fehleranzahl (a) und Fehlerzeit (b) aller Probanden in Abhängigkeit der Haltung

Bei der Befragung im Anschluss an die Versuchsdurchführung geben 88,2 % der Probanden an, dass die Stützung des distalen Unterarms die subjektiv sicherste Aufgabenausführung gewährleistet. Demgegenüber geben 11,8 % an, dass dies bei der Stützung des proximalen Unterarms der Fall ist. Kein Proband empfindet keine Stützung als sicherste Haltung für die Aufgabenausführung.

3.2 Unterarmgewicht

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Aufnahme des Unterarmgewichts des distalen Unterarms dargestellt. Abb. 3a) zeigt die Korrelation aus Unterarmumfang und Unterarmgewicht (Abb. 3a) schwarz) sowie aus Körpergewicht und Unterarmgewicht (Abb. 3a) grau). In Abb. 3b) ist das Verhältnis aus Unterarmgewicht und Körpergewicht dargestellt. Die durchschnittliche Gewichtskraft, mit welcher der distale Unterarm auf den Kraftsensor wirkt, beträgt $\bar{O} = 11,2 \text{ N}$ ($SD = 3,5 \text{ N}$, Range = 5,8-19,9 N). Dies entspricht einer durchschnittlichen Masse des UA von $\bar{O} = 1,15 \text{ kg}$ ($SD = 0,36 \text{ kg}$, Range = 0,59-2,03 kg). Das probandenspezifische Verhältnis aus Unterarmgewicht und Körpergewicht beträgt $\bar{O} = 1,5 \%$ ($SD = 0,4 \%$, Range = 0,7-2,2 %).

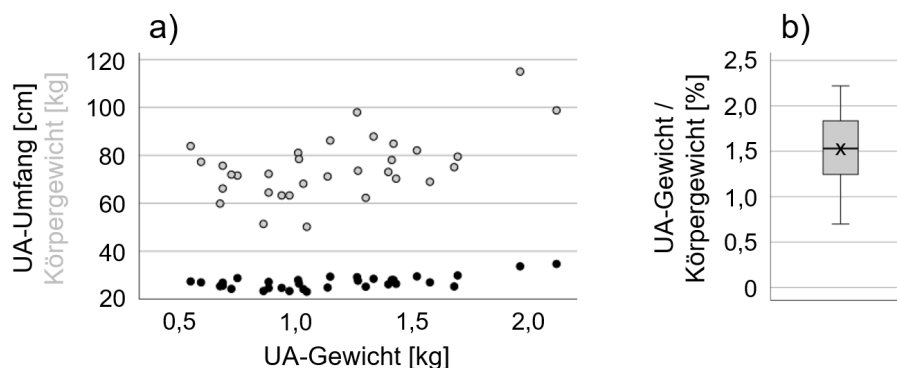


Abbildung 3: Korrelation aus UA-Umfang zu UA-Gewicht (a, schwarz) und Körpergewicht zu UA-Gewicht (a, grau) sowie Verhältnis aus UA-Gewicht zu Körpergewicht (b)

4. Diskussion

Die Untersuchung der Stützposition in der ersten Studie zeigt, dass die Stützung des Arms einen positiven Einfluss auf die Fehleranzahl und die Fehlerzeit im Gegensatz zum nicht abgestützten Arm hat. Weiterhin sind die Fehleranzahl und die Fehlerzeit bei der Stützung des distalen Unterarms geringer als bei der Stützung des proximalen Unterarms. Daraus lässt sich folgern, dass die Stützung des distalen UA zu einer Verringerung des Tremors der Hand und im Rahmen dieser Studie zu einer erhöhten Effektivität bei der Ausführung einer statischen Präzisionsaufgabe führt. Die Streuung der Fehleranzahl und der Fehlerzeit ist bei der Stützung des distalen UA geringer als bei der des proximalen UA und diese ist wiederum geringer als bei keiner Stützung. Dies erlaubt den Rückschluss, dass die Unterschiedlichkeit der Probanden in Bezug auf die Effektivität bei der Aufgabenausführung ohne Stützung durch die Stützung allgemein und durch die Stützung des distalen Unterarms im Besonderen weniger Einfluss hat. Die Befragung zeigt, dass die subjektiv sicherste Haltung für die Aufgabenausführung, die mit Stützung am distalen Unterarm ist, gefolgt von der am proximalen Unterarm. In weiteren Untersuchungen sollte eine größere Anzahl an

Probanden miteinbezogen werden, um mögliche statistische Signifikanzen auszuwerten.

Die Untersuchung der statischen Gewichtskraft des distalen Unterarms auf eine Unterarmauflage zeigt, dass diese mit dem Körpergewicht (Korrelationskoeff. = 0,53) und Unterarmumfang (Korrelationskoeff. = 0,61) korreliert. Der relative Masseanteil des Unterarms entspricht nach Wank (2021) zwischen 1,60 % und 2,28 % (gerundet ca. 2 %) des Körpergewichts. Für die effektive Gewichtskraft des Unterarms bei distaler Stützung auf die statische Unterarmauflage kann in der Studie durchschnittlich 1,5 % des Körpergewichts als Faktor ermittelt werden. Der Unterschied ergibt sich aus der biomechanischen Annäherung an den relativen Masseanteil des gesamten UA in der Literatur, wogegen hier der Fokus auf der Gewichtskraftbestimmung am distalen Unterarm liegt. Der neu ermittelte Faktor von 1,5 % spiegelt für den Fall der distalen Stützung die anwendungsnähere Approximation dar.

Die gewonnenen Erkenntnisse zur Stützposition am distalen Unterarm sollen in weiteren Studien Anwendung finden, um die Mensch-Maschine-Schnittstelle der Unterarmauflage insbesondere in Bezug auf die Unterarmdrehung und den dabei dominanten Einfluss der Zwangsverschiebung der Hand bei Pronation und Supination zu optimieren und zu untersuchen. Des Weiteren soll mit den Erkenntnissen zum Unterarmgewicht bei distaler Stützung die optimale Unterstützkraft durch ein chirurgisches Armassistenzsystem bei Präzisionsaufgaben untersucht werden.

5. Literatur

- Avalution GmbH (2009) Reihenmessung der deutschen Bevölkerung. <https://portal.i-size.net/>.
- Choi S (2012) A review of the ergonomic issues in the laparoscopic operating room. In: Journal of Healthcare Engineering, Vol. 3, No. 4: 587–603.
- 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, Cay E, Maier T. (2022a) Experimentelle Untersuchung der Form einer Unterarmauflage eines interaktionsbasierten Armassistenzsystems in der laparoskopischen Chirurgie. In: 68. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, Magdeburg, 2022, B.9.4.
- Langer F, Matschuck T, Dreshaj N, Maier T (2022b) Experimental investigation of anthropomorphic forms of a forearm support of a surgical arm assistance system in precision tasks. In: Triennial conference on Healthcare Systems Ergonomics and Patient Safety. Delft, Niederlande, 2022.
- 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.
- Wank V (2021) Biomechanik der Sportarten. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 64.

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.

Nachhaltig Arbeiten und Lernen

**Analyse und Gestaltung lernförderlicher
und nachhaltiger Arbeitssysteme
und Arbeits- und Lernprozesse**

69. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

01. – 03. März 2023

GfA-Press

Bericht zum 69. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 01. – 03. März 2023

**Fakultät Maschinenbau, Institut für Berufswissenschaften der Metalltechnik (IBM) und
Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA), Leibniz Universität Hannover**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Sankt Augustin: GfA-Press, 2023
ISBN 978-3-936804-32-4

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 · www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de

Screen design und Umsetzung

© 2023 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de