

Gestaltung und multidimensionale Bewertung von physischen Schnittstellen exoskelettaler Systeme

Niclas HOFFMANN^{1,2}, Tim SCHUBERT², Lennart RALFS¹, Robert WEIDNER^{1,2}

*¹ Institut für Mechatronik, Professur für Fertigungstechnik,
Universität Innsbruck*

Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck

*² Laboratorium Fertigungstechnik,
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr
Holstenhofweg 85, D-22043 Hamburg*

Kurzfassung: Industrielle Exoskelette sollen die Belegschaft bei körperlich anstrengenden Tätigkeiten unterstützen. Neben bspw. der technischen Funktionalität und Eignung am Arbeitsplatz beeinflusst auch der subjektiv empfundene Tragekomfort die Systemakzeptanz und Gebrauchstauglichkeit. Hierauf können die physischen Schnittstellen zur Systemanbindung und Kraftübertragung neben der Mensch-Technik-Interaktion einen großen Einfluss besitzen. Vor diesem Hintergrund werden in diesem Beitrag Einflüsse und resultierende Effekte bei der Gestaltung der Kraftübertragung über Schnittstellen präsentiert. Aufbauend wird auszugsweise auf eine Analyse von Interaktionskräften eingegangen.

Schlüsselwörter: Exoskelette, Mensch-Technik-Schnittstelle, Evaluation, Tragekomfort

1. Einleitung

Im industriellen Kontext können Tätigkeiten in ergonomisch verbesserungs-bedürftigen Körperhaltungen, mit Lasthandhabung oder einer hohen Anzahl an Wiederholungen auf lange Sicht arbeitsbedingte Muskel-Skelett-Erkrankungen in der Belegschaft hervorrufen (Sluiter et al. 2001). Ein Einsatz von Exoskeletten zur physischen Unterstützung kann in diesem Zusammenhang sowohl gesundheitsförderlich als auch produktivitätssteigernd wirken (Bogue 2018). Die Systeme sind dabei gemäß dem TOP-Prinzip des Arbeitsschutzes als personenbezogene Maßnahme besonders geeignet, wenn andere technische oder organisatorische Initiativen nicht anwendbar sind. Dies betrifft insbesondere vielfältige, ortsflexible, temporäre oder schwer zugängliche Arbeitsplätze. Für die Wirksamkeit der Maßnahme ist entscheidend, dass die Systeme von der Belegschaft akzeptiert und im Arbeitsalltag verwendet werden. Hierfür müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden, die bspw. die Nutzungssicherheit, die grundsätzliche Eignung im Anwendungskontext (u.a. Bedienung von Geräten, Arbeiten in engem Arbeitsumfeld, Kombinierbarkeit mit vorgeschriebener persönlicher Schutzausrüstung) und die technische Funktionalität (u.a. spürbare Unterstützung, Robustheit, Störungsfreiheit) betreffen. Insbesondere bei einer längeren Tragezeit ist auch der subjektiv empfundene Tragekomfort entscheidend (Huysamen et al. 2018). Dieser ist das Resultat verschiedener Dimensionen, die sich auch gegenseitig beeinflussen können (vgl. Abbildung 1) und u.a. durch die Gestaltung der Schnittstellen bedingt werden (Linnenberg & Weidner 2019).

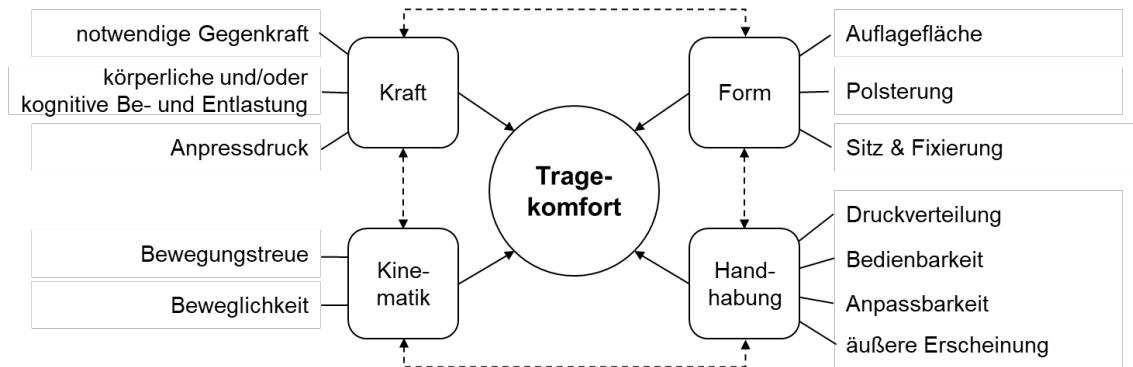


Abbildung 1: Auswahl möglicher Einflussfaktoren auf den subjektiv empfundenen Tragekomfort.

Im Folgenden zeigt dieser Beitrag verschiedene Aspekte und Kriterien, die bei der Schnittstellengestaltung berücksichtigt werden sollten. Aufbauend werden exemplarische Ergebnisse einer Laborstudie mit einer hochauflösenden Sensormatte präsentiert. Anhand der Analyse von Druckzuständen in einer Schnittstelle können mögliche Einflüsse von unterschiedlichen Bewegungsaufgaben und -abläufen sowie der gewählten Unterstützungskraft auf den subjektiv empfundenen Tragekomfort abgeleitet werden.

2. Gestaltung von Schnittstellen bei Exoskeletten

Zur Wirkentfaltung müssen Exoskelette als tragbare Systeme über Schnittstellen mit dem Nutzer verbunden werden. Die Schnittstellen erfüllen die Funktionen „Systemanbindung bzw. -befestigung“ und „Übertragung der Systemkräfte auf den menschlichen Körper“ (Linnenberg & Weidner 2019).

In Bezug auf exoskelettale Schnittstellen fasst Abbildung 2 zentrale Einflussgrößen der Ausgangssituation und mögliche resultierende Effekte zusammen. Dabei sollten fünf zentrale Aspekte bei der grundsätzlichen Gestaltung berücksichtigt werden, weil sie erfahrungsgemäß häufiger beim späteren Tragen auftreten können:

- Veränderungen der Muskelform aufgrund von Muskelkontraktionen,
- Scherkräfte aufgrund von Relativbewegungen zwischen System und Nutzer,
- ungleiche Kraftverteilung auf menschlicher Haut aufgrund individueller Eigenschaften des Weichteilgewebes (Fett- und Muskelmasse, Knochenlage),
- eingeschränkter Blutfluss aufgrund von Vasokonstriktionen sowie
- Hitze, Schweiß und Feuchtigkeit an Kontaktfläche der Schnittstelle.

Die Gestaltung der Schnittstelle hängt stark von der Funktionsweise und Kinematik des Exoskeletts ab. Entsprechend existieren in der Praxis unterschiedliche Gestaltungsmöglichkeiten (u.a. Form, Steifigkeit, Härte, Arretierung, Position). Größtenteils zeigt sich jedoch ein zirkulärer Aufbau mit einer gepolsterten Hartschale, die mit einem Gurtsystem zusätzlich fixiert wird (Weidner et al. 2020). An den Rändern der Auflagefläche sind die Druckverhältnisse in der Regel am größten (Levesque et al. 2017), weshalb die Kanten der Schnittstellen häufig weicher gepolstert bzw. abgerundet werden. Bei der Polsterung muss grundsätzlich ein Kompromiss aus effektiver Kraftübertragung und möglichst hohem Tragekomfort eingegangen werden (Asbeck et al. 2015). Zudem zeigen Materialien mit erhöhter Steifigkeit wie Neopren eine bessere Anpassbarkeit an den Körper mit gleichmäßigerer Druckverteilung als weiche und dicke Materialien (Levesque et al. 2017, Xiloyannis et al. 2019). Für eine bessere Druckverteilung sollte eine möglichst große Kontaktfläche am Körper aufliegen (Sposito et

al. 2019) und der Anbindungsort am Körper sinnvoll gewählt werden. Des Weiteren kann die Höhe der Unterstützungskraft einen Einfluss auf mögliche resultierende Effekte besitzen.

Die Krafteinleitung in den menschlichen Körper kann sowohl subjektiv als auch objektiv bewertet werden. Denkbar ist, dass Nutzer in Fragebögen Feedback geben oder dass mögliche Druckstellen beobachtet oder mit Messequipment genauer analysiert werden. Auch sollte stets die Güte der Mensch-Technik-Interaktion betrachtet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollten anschließend in die Optimierung bestehender sowie auch die Gestaltung neuer Schnittstellen einfließen.

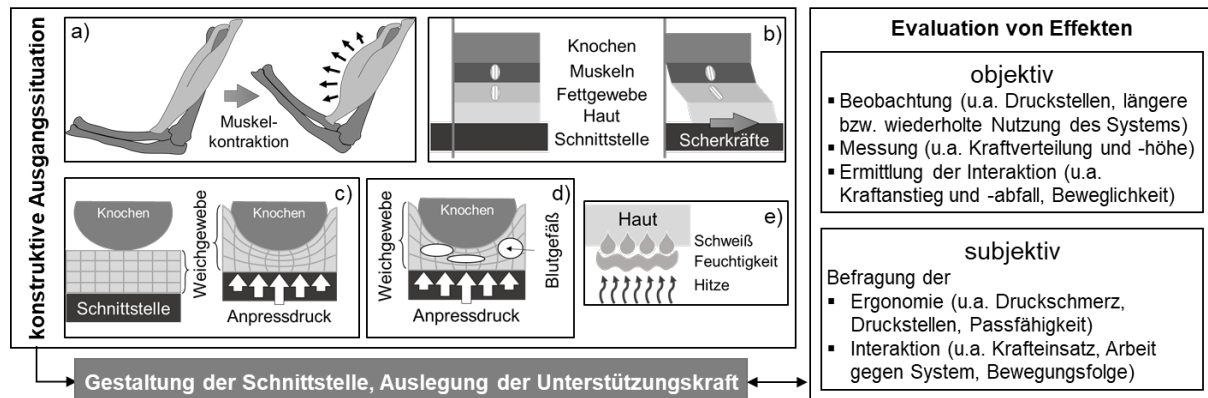


Abbildung 2: Einflüsse auf die Gestaltung der physischen Schnittstelle und mögliche Effekte.

3. Laborstudie zur Messung von Druckzuständen in Schnittstellen

Um den Einfluss von Tätigkeitsprofilen (u.a. Bewegungsablauf, Arbeitsgeschwindigkeiten, handzuhabende Gewichte) und der eingestellten Unterstützungskraft auf die Druckbelastung in Schnittstellen zu untersuchen, wurde eine Studie durchgeführt.

3.1 Versuchsdesign

Die Laborstudie umfasste drei dynamische Tätigkeiten an einem Versuchsstand, die ein Proband (männlich, gesund, 24 Jahre, 185 cm, normale Statur) mit dem aktiv gesteuerten, pneumatisch angetriebenen Exoskelett „Lucy 2.0“ (Otten et al. 2018) durchführte. Die 3D-gedruckte Oberarm-Schnittstelle des Systems besaß die Form einer halboffenen und ausgepolsterten Hartschale, die mit einem Klettverschluss am Oberarm fixiert wurde. Der Nutzer konnte über ein Bedienelement am Schultergurt die Unterstützungsleistung des Systems bedarfsgerecht einstellen. Die folgenden Tätigkeiten wurden jeweils mit voller und halber Unterstützungsleistung durchgeführt:

- „Bohren“: Der Proband führte aufrechtstehend einen Akkuschauber (Gewicht ca. 900 g) von Hüft- auf Überkopfhöhe (Winkel im Schulter- und Ellbogengelenk jeweils 90°). Aufgabe: 20 Wiederholungen in 30 Sekunden.
- „Streichen“: Der Proband rollte eine Malerrolle (Gewicht ca. 200 g) aufrechtstehend und mit ausgestrecktem Arm kontinuierlich in einem markierten Bereich (ca. zwischen Hüft- und Schulterhöhe des Probanden) auf und ab. Aufgabe: 20 Wiederholungen in 15 Sekunden.
- „Spachteln“: Der Proband führte eine Glättkelle (Gewicht ca. 350 g) in einer definierten Bewegungsfolge von Hüfthöhe in einer umgedrehten eckigen U-Form auf Schulterhöhe und wieder zurück auf Hüfthöhe. Aufgabe: 20 Wiederholungen in

40 Sekunden.

3.2 Messmethode und Untersuchungsgegenstand

Die Druckzustände in der Oberarm-Schnittstelle wurden mit einer hochauflösenden Sensormatte der Firma „XSensor Technology Corporation“ ermittelt. Die Matte ist speziell für ergonomische und biomechanische Anwendungszwecke entwickelt worden und nach ISO 17025 zertifiziert. Sie besitzt eine Sensorfläche von 12,7 x 25,4 cm², eine Auflösung von 23,25 Sensorpunkten/cm² und einen maximalen Messbereich von 10,34 N/cm². Aufgrund der flexiblen und dünnen Struktur kann die Sensormatte problemlos zwischen Mensch und Schnittstelle platziert werden. Mit Hilfe der Auswertungssoftware können sowohl statistische Werte der gesamten Sensorfläche oder ausgewählter Bereiche analysiert (bspw. Durchschnittsdruck, maximaler und minimaler Druck, Kontaktfläche, geschätzte Kraft, Druckzentrum) als auch zwei- oder dreidimensionale Druckkarten erzeugt werden. Bei letzterem werden unterschiedliche Druckzustände verschiedenfarblich illustriert.

In der Laborstudie wurde die Sensormatte auf Höhe der exoskelettalen Oberarm-Schnittstelle um den rechten Oberarm gewickelt und mit einem Klebeband fixiert. Anschließend wurde die durchschnittliche Druckbelastung aufgezeichnet und für eine bessere Vergleichbarkeit hinsichtlich der Zykluszeit normiert. Demnach begann der Bewegungszyklus der jeweiligen Tätigkeit bei 0 % auf Hüfthöhe, erreichte bei 50 % die Schulterhöhe und endete bei 100 % wieder auf Hüfthöhe. Aufgrund der vorherrschenden Variabilität der Druckverteilung zwischen den Bewegungs-ausführungen wurde jede Aufgabe mit zehn Wiederholungen durchgeführt und die Druckzustände anschließend gemittelt.

3.3 Ergebnisdiskussion und weitere Schritte

Exemplarische Messergebnisse bei der Ausführung der einzelnen Tätigkeiten mit maximaler Unterstützungsleistung sind in dem linken Diagramm in Abbildung 3 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass der Flächendruck beim Anheben des Arms bzw. bei einsetzender Unterstützungsleistung steigt. Der Verlauf der Druckbelastung unterscheidet sich zwischen den Tätigkeiten, wobei sich die parabelförmige Kraftkurve des Exoskeletts in Abhängigkeit zur Oberarmlage (vgl. Otten et al. 2018) stets auch in der Druckbelastung widerspiegelt. Die Unterstützungskraft des Systems gegen die Gravitation kann grob angenähert werden, indem die vertikale Kraftkomponente aus der gemessenen Normalkraft trigonometrisch in Abhängigkeit zur räumlichen Lage des Oberarms errechnet wird. Hierfür können bspw. die Winkelmesser im Unterstützungssystem (vgl. Otten et al. 2018) oder zusätzlich am Oberarm angebrachte inertielle Messeinheiten verwendet werden.

Die Bewegungsfolge und die Arbeitsgeschwindigkeit nehmen einen Einfluss auf die Druckbelastung. Beim „Spachteln“ zeigt sich bspw. links in der Abbildung ein zweiter sprunghafter Anstieg, der primär durch die horizontale Armbewegung auf Schulterhöhe bzw. einer zusätzlichen seitlichen Belastung der Schnittstelle ausgelöst wird. Von der Sprunghöhe des Druckanstiegs lassen sich bei unterschiedlichen Systemen mögliche Rückschlüsse auf die jeweilige Beweglichkeit im System ziehen.

Anhand der Druckverläufe der einzelnen Tätigkeiten kann zudem die Güte der Mensch-Technik-Interaktion bewertet werden, weil sich bspw. der Druckverlauf beim Anheben und Senken des Arms unterscheiden kann. Die meist größere Steigung beim Senken des Arms zeigt, dass das System die Bewegungsintention des Nutzers zum

Senken des Arms schnell erkennt und somit die Unterstützungskraft senkt. Die größte Druckbelastung liegt stets unmittelbar vor dem Abfall der Unterstützungskraft vor, weil hier der Nutzer anfangs noch kurzzeitig gegen das System arbeiten muss. Um die Systemsteuerung und die resultierende Bewegungstreue zukünftig genauer zu bewerten, könnte bspw. die gleiche dynamische Tätigkeit mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausgeführt werden.

Im rechten Diagramm der Abbildung 3 werden mögliche Auswirkungen der gewählten Unterstützungsleistung auf die Druckzustände in der Oberarm-Schnittstelle am Beispiel der Tätigkeit „Streichen“ betrachtet. Eine größere Unterstützungsleistung führt zwangsläufig zu einer höheren Druckbelastung am Oberarm. Die gesteigerte Druckbelastung beeinflusst zudem den subjektiv empfundenen Tragekomfort bzw. die Systemakzeptanz und sollte zukünftig mit einer größeren Stichprobe und kombiniert mit einer Fragebogenstudie näher untersucht werden. Um hier ggf. eine größere Vergleichbarkeit unter den Probanden zu erreichen, sollte die Unterstützungsleistung in der angedachten Studie stets neu an das individuelle Armgewicht des Nutzers angepasst werden (vgl. Maurice et al. 2019).

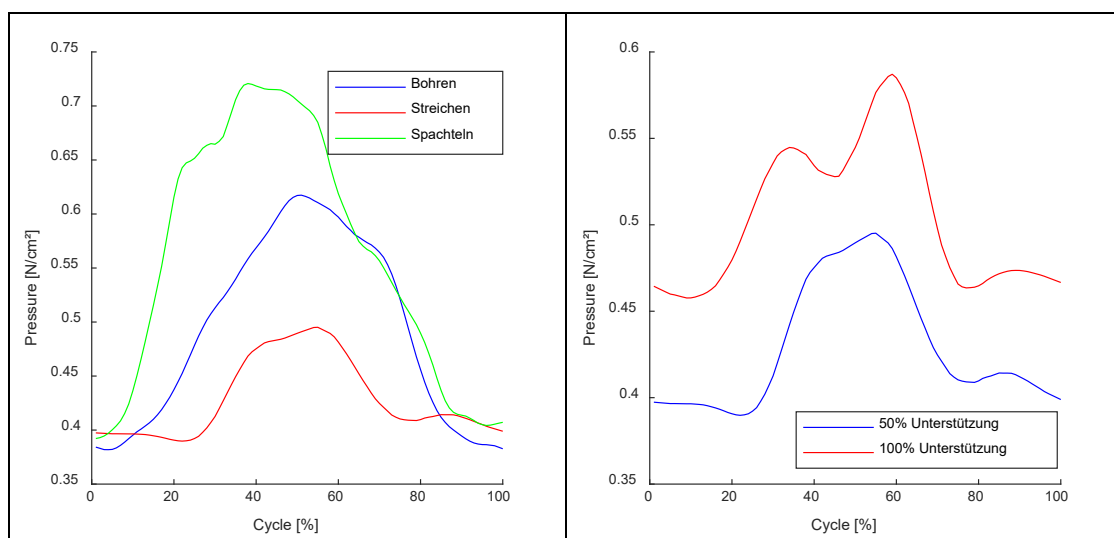


Abbildung 3: Durchschnittliche Druckbelastung am Oberarm bei verschiedenen Tätigkeiten und voller Unterstützungsleistung (links) sowie bei der Tätigkeit „Streichen“ mit unterschiedlicher Unterstützungsleistung (rechts).

Für die Zukunft könnten auch verschiedene Adaptionprozesse insbesondere für aktive Unterstützungssysteme abgeleitet werden (Otten et al. 2020), indem tätigkeits-spezifische Druckzustände bspw. ein Big-Data-gestütztes Systemanlernen sowie die Systemadaption in Echtzeit mit Hilfe von Sensoren ermöglichen, die bspw. in Schnittstellen eingebettet sind (Hoffmann et al. 2020). Eine angepasste Unterstützungsleistung bzw. form- oder steifigkeitsändernde Schnittstellen könnten anschließend den subjektiv empfundenen Tragekomfort bzw. die Systemakzeptanz steigern, den Verwendungsbereich vergrößern und allgemein gesundheitsförderlich wirken.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Aufbauend auf einer Präsentation möglicher Einflussfaktoren auf den subjektiv empfundenen Tragekomfort sowie eines vorgeschlagenen Entwicklungsprozesses zur optimierten Krafteinleitung in den menschlichen Körper wurde eine Laborstudie mit

einer Sensormatte zur Messung von Druckzuständen in einer exoskelettalen Oberarm-Schnittstelle durchgeführt. Die Studie zeigt im Ergebnis, dass die Druckbelastung in Abhängigkeit von der gewählten Unterstützungsleistung, der ausgeführten Tätigkeit und ggf. dem Nutzer (u.a. Unterschiede in Anthropometrie, Weichteilgewebe, persönliche Präferenzen) variiert. Mögliche Studienergebnisse zum Tragekomfort von Systemen sollten also nicht voreilig verallgemeinert werden, sondern nur für das spezifische untersuchte Testszenario gelten (vgl. Hoffmann et al. 2019). Auch bieten sich zukünftig verschiedene Anknüpfungspunkte zum Anlernen von aktiven Unterstützungssystemen zur Steigerung der Nutzerakzeptanz und Gebrauchstauglichkeit.

5. Literatur

- Asbeck AT, Rossi SMM, de Holt KG, Walsh CJ (2015) A biologically inspired soft exosuit for walking assistance. *The International Journal of Robotics Research* 34(6):744-762.
- Bogue R (2018) Exoskeletons – a review of industrial applications. *Indus Rob: An Int J* 45(5):585-590.
- Hoffmann N, Argubi-Wollesen A, Linnenberg C, Weidner R (2019) Towards a Framework for Evaluating Exoskeletons. In: J Wulfsberg et al. (Ed.) *Production at the leading edge of technology*, Springer Vieweg, 441-450.
- Hoffmann N, Ersoysal S, Weidner R (2020) Towards Embedded Force Sensors in Exoskeletons for Evaluating Interaction Forces in interfaces. In: T Schüppstuhl et al. (Ed.) *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics*:69-79.
- Linnenberg C, Weidner R (2019) Designing Physical Human-Machine-Interfaces for Exoskeletons Using 3D-Shape Analysis. *Proceedings of 3DBODY.TECH*, Lugano, Switzerland, 85-95.
- Levesque L, Pardoel S, Lovrenovic Z, Doumit M (2017) Experimental comfort assessment of an active exoskeleton interface. In: *Int Symp on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS)*:38-43.
- Maurice P, Camernik J, Gorjan D., Schirrmeister B, Bornmann J, Tagliapietra L, Latella C, Pucci D, Fritzsche L, Ivaldi S, Babic J (2020) Objective and Subjective Effects of a Passive Exoskeleton on Overhead Work. In: *IEEE Trans on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 28(1):152-164.
- Otten B, Weidner R, Argubi-Wollesen A (2018) Evaluation of a Novel Active Exoskeleton for Tasks at or Above Head Level. *IEEE Robotics and Automation Letters* 3(3):2408-2415.
- Otten B, Hoffmann N, Weidner R (2020) Towards Adaptive System Behavior and Learning Processes for Active Exoskeletons. In: BA Behrens et al. (Ed.) *Production at the leading edge of technology*, Springer, 476-484.
- Sluiter JK, Rest KM, Frings-Dresen MH (2001) Criteria document for evaluating the work-relatedness of upper-extremity musculoskeletal disorders. *Scand. J. Work, Environ. Health* 27:1–102.
- Sposito M, Toxiri S, Caldwell DG, Ortiz J, de Momi E (2019) Towards Design Guidelines for Physical Interfaces on Industrial Exoskeletons: Overview on Evaluation Metrics. In: MC Carrozza et al. (Ed.) *Wearable Robotics: Challenges and Trends*, Springer International Publishing, 170-174.
- Weidner R, Linnenberg C, Hoffmann N, Prokop G, Edwards V (2020) Exoskelette für den industriellen Kontext: Systematisches Review und Klassifikation. In: 66. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaften, Berlin.
- Xiloyannis M, Chiaradia D, Frisoli A, Masia L (2019) Characterisation of Pressure Distribution at the Interface of a Soft Exosuit: Towards a More Comfortable Wear. In: M Carrozza et al. (Ed.) *Wearable Robotics: Challenges and Trends*: Springer International Publishing, 35-38.

Danksagung: Teile des Beitrags sind im Rahmen des Forschungsprojekts „Exo@Work“ entstanden, welches von der Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik (BGHW) gefördert wird. Die Autoren sind alleinig für die Inhalte verantwortlich.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Arbeit HUMAINE gestalten

67. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Lehrstuhl Wirtschaftspsychologie (WiPs)
Ruhr-Universität Bochum

Institut für Arbeitswissenschaft (IAW)
Ruhr-Universität Bochum

3. - 5. März 2021

GfA-Press

Bericht zum 67. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 3. - 5. März 2021

**Lehrstuhl Wirtschaftspsychologie, Ruhr-Universität Bochum
Institut für Arbeitswissenschaft, Ruhr-Universität Bochum**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2021
ISBN 978-3-936804-29-4

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,
- 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.

Screen design und Umsetzung

© 2021 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de