

Nutzungsanalyse von formadaptiven Handgriffen ermöglicht durch die additive Fertigung

Jonathan KIESSLING¹, Karl Otto HILBIG², Thomas MAIER¹, Thomas VIETOR²

¹ *Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart,
Pfaffenwaldring 9, D-70569 Stuttgart*

² *Institut für Konstruktionstechnik, Technische Universität Braunschweig,
Hermann-Blenk-Str. 42, D-3810 Braunschweig*

Kurzfassung: Die additive Fertigung mittels Materialextrusion ermöglicht die Multi-Material-Konstruktion formadaptiver Wirkstrukturen. In einem Handgriff realisiert, ermöglichen diese die Anpassung an individuelle Hände für eine effiziente Lastübertragung. Eine Laborstudie mit 35 Probanden zeigt signifikant geringere Flächenpressungen und Diskomfort bei der Lastübertragung mit einem formadaptiven Handgriff, gegenüber personalisierten und einem für den Bedienkontext optimierten Handgriff.

Schlüsselwörter: Formadaptivität, Adaptiver Handgriff, Additive Fertigung, Multi-Material-Konstruktion, Wirkprinzipien, Probandenstudie

1. Einführung

Der ideale Handgriff passt in jeder Bediensituation exakt zur Anthropometrie der Hand eines individuellen Nutzers, indem er die anthropomorphe Gegenform bildet. Dies ermöglicht eine effiziente Lastübertragung mit minimaler Belastung der Hand in der Wirkfläche zum Griff und steigert den Komfort des Nutzers (Schmid & Maier 2017). Für mehrere Nutzer und wechselnde Bedienszenarien muss sich die Form des Griffs demzufolge verändern, um stets die optimale Gegenform zu bilden (Laßmann et al. 2019). Im Folgenden ist die Realisierung eines adaptiven Handgriffs mittels additiver Fertigung sowie dessen Nutzungsanalyse im Vergleich mit herkömmlichen Griffen beschrieben.

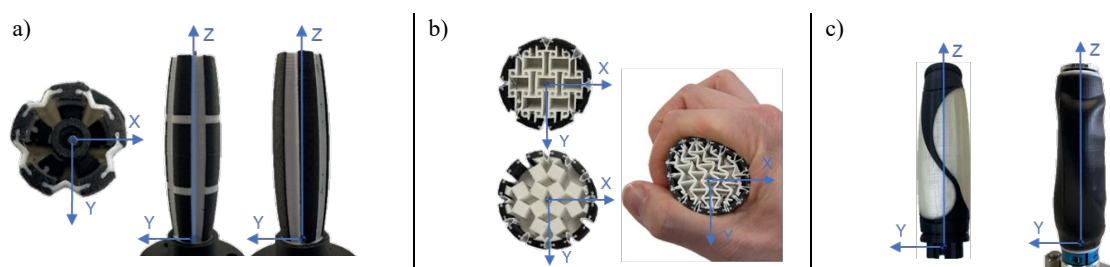
2. Additive Fertigung formadaptiver Handgriffe

Additive Fertigungsverfahren steigern den Innovationsgrad und die Funktionalität technischer Produkte (Wohlers et al. 2023). Infolge der steigenden Prozesssicherheit additiver Fertigungstechnologie in der Multi-Material-Bauweise werden formadaptive Funktionsstrukturen realisierbar. Diese ermöglichen eine Anpassung der äußeren Produktform. Innerhalb der additiven Fertigung eignen sich die Materialextrusion (MEX) sowie der Freistrahlmateriale Auftrag (MJT) für eine Multi-Material-Bauweise mit technischen Polymeren (DIN 8580 2022). Für den technischen Entwurf formadaptiver Funktionsstrukturen wird eine Sammlung von physikalischen Effekten erstellt. Diese unterstützt produktunspezifisch den Systementwurf bei der Suche nach Wirkprinzipien für die Formadaptivität. In Tabelle 1 ist ein Auszug des entwickelten Konstruktionskatalogs für formadaptive Produkt(-teil-)funktionen dargestellt.

Tabelle 1: Auszug aus dem Konstruktionskatalog für den Entwurf formadaptiver Teilfunktionen

Teilfunktion	Feldart	Physikalischer Effekt				Wirkstruktur im adaptiven Handgriff		
		Nr.:	Bezeichnung	Piktogramm	Beschreibung	Bezeichnung	Piktogramm	Beschreibung
Formadaptivität	mechanisch	1.1	Elastizität		Elastische Dehnung, Biegung oder Scherung führt zu reversibler Formänderung.	Strukturbedingte Verformung		Stützgeometrie enthält an das Deformationsverhalten angepasste Biegebalken.
		1.2 - 1.7						
		1.8	Anisotropie		Richtungsabhängige Formänderung der Produktform.	1.8.1 - 1.8.10		
	mag., elektr., therm.	2. - 4.				Strukturbedingte Anisotropie		Gitterstrukturen mit ortsabhängigen konstruktiven Parametern (insb. Zellgröße, Stabdicke).
		5.1	Druckbasierte Partikelverfestigung		Unregelmäßige Partikelgeometrie führt bei Unterdruck zu Verschränkung.	Innendruck-initiierte Partikelverfestigung		Eine dichte, elastische Hüllgeometrie ermöglicht die Speicherung von Unterdruck im System.
		5.2 - 5.3						

Die Formadaptivität beinhaltet hierbei die Zustandsänderung von einer Produktform zu einer anderen. Die hierfür eingesetzte Stellenergie ermöglicht, in Anlehnung an das Stoff-Feld-Modell nach Koltze & Souchkov (2017), eine Klassifizierung der nutzbaren physikalischen Effekten über die Feldart. Die daraus resultierenden physikalischen Effekte sind eine Zusammenstellung der Sammlung physikalischer Wirkprinzipien nach Ponn & Lindemann (2011), der Funktionsgrößenmatrix von Roth (2012), dem Prinzipienkatalog nach Koller & Kastrup (1998), den Effekten der Physik nach Ardenne et al. (2005) und der Wirkprinzipiendatenbank Oxford Creativity (2022). Durch die Kopplung der physikalischen Effekte mit der Entwurfsgestaltung der Produktform erfolgt nach Ponn & Lindemann (2011) das resultierende Wirkprinzip. Hierzu werden Wirkflächenpaare, Wirkungsbewegung, Wirkraum, Wirk- und Konturflächen sowie Leitstützstrukturen produktspezifisch ausgearbeitet. Somit ergibt sich für einen physikalischen Effekt eine endliche Anzahl von Wirkprinzipien in Abhängigkeit von der Produktform. Die Multi-Material-Bauweise ermöglicht durch eine Materialkombination eines starren mit einem flexiblen Material die Ausgestaltung der adaptiven Griffform. Hierbei werden die allgemeingültigen konstruktiven Freiheiten der additiven Fertigung nach Kumke (2018) in den Bereichen der funktionalen Komplexität, der Form- und Materialkomplexität, angewandt. Die Wirkprinzipien der Schubverformung, anisotropen Materialverhaltens und der druckbasierten Partikelverfestigung (Follmer et al. 2012) wurden in funktionalen Prototypen realisiert, siehe Abbildung 1. Aufgrund der technischen Umsetzbarkeit und der Formstabilität im adaptierten Zustand, eignet sich die druckbasierte Partikelverfestigung für die Übertragung von Lasten.

**Abbildung 1:** Funktionsprototypen der Wirkprinzip-Ermittlung für formadaptive Handgriffe in den Ausprägungen für a) Schubverformung durch mechanische Elastizität; b) Anisotropie durch Meta-Materialien und c) druckbasierte Partikelverfestigung in der Kontaktzone zur Hand

3. Nutzungsanalyse

Die Gebrauchstauglichkeit eines adaptiven Handgriffs mit dem Wirkprinzip der druckbasierten Partikelverfestigung wird hinsichtlich der Effizienz (objektive Relation aus Flächenpressung in der Wirkfläche und der effektiv übertragenen Last) und der Zufriedenstellung nach DIN EN ISO 9241-11 (2018) analysiert. Die Zufriedenstellung wird durch das Markieren subjektiv unkomfortabler Druckstellen auf der Hand erfasst.

3.1 Methodik und Versuchsaufbau

Der adaptive Handgriff wird in einer Laborstudie mit $n = 35$ Probanden (13 w / 22 m, Handlänge $160 \leq l \leq 210$ mm, Handbreite $67 \leq b \leq 97$ mm) mit personalisierten (nach Bullinger 1994) Griffen und einem für die Nutzung an Rollatoren optimierten Handgriff verglichen, siehe Abbildung 2a. Aufgrund des potenziellen Nutzens für die Zielgruppe (Laßmann et al. 2019) wird die Nutzung eines Rollators als Bedienkontext festgelegt. Aus den Bedienszenarien innerhalb dieses Kontexts (vgl. Kiessling et al. 2023) werden sechs Lastfälle, zur Übertragung von Kräften und Drehmomenten über den Handgriff, isoliert (Kiessling et al. 2022). Die Griffe und Lastfälle, siehe Abbildung 2b, bilden die unabhängigen Variablen des Versuchs. Ihre Reihenfolge wird zweistufig randomisiert.

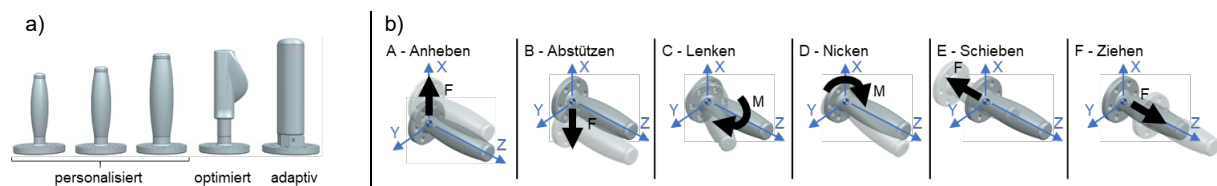


Abbildung 2: Unabhängige Variablen der Nutzungsanalyse: a) Gegenüberstellung der anthropometrie-abhängig personalisierten Griffe, des für den Bedienkontext Rollator optimierten Griffs und des formadaptiven Handgriffs; b) Visualisierung der aus den Bedienszenarien resultierenden Lastfällen

Als abhängige Variable wird die Effizienz der Lastübertragung anhand der Flächenpressung in der Wirkfläche zwischen Hand und Griff (vgl. Kong & Lowe 2005; Deboli & Calvo 2009; Pronker et al. 2020; Kiessling et al. 2022) bei vorgegebener, konstanter Lastübertragung ($F = 30$ N, $M = 5$ Nm) erfasst. Hierfür werden ein Tekscan-Folien-sensor 4256E auf einem Handschuh an der Hand des Probanden positioniert und ein 6-Achs-Kraftsensor (ME K6D80) zwischen Griff und Tragwerk des Prüfstands verwendet, siehe Abbildung 3. Die Messung erfolgt für 10 s während der Lastübertragung bei isometrischer Haltung des rechten Hand-Arm-Systems. Danach tragen die Probanden unangenehm empfundene Druckstellen für jeden Griff in einer Hand Map (nach Corlett & Bishop 1976; You et al. 2005; Kuijt-Evers 2007) ein.

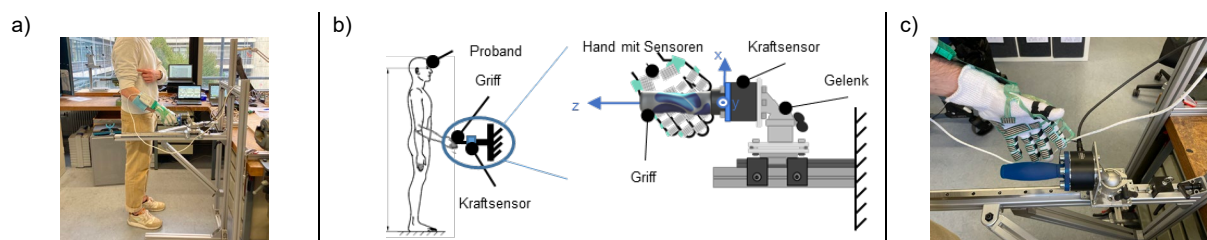


Abbildung 3: Versuchsaufbau a) im Laborraum; b) in schematischer Darstellung mit Bezeichnung der Komponenten; c) mit Detailansicht, nach (Kiessling et al. 2022)

3.2. Ergebnisse

Die Messwerte der einzelnen Zellen der Foliensensormatrix werden im Folgenden auf 21 Zonen der Hand (14 Fingerglieder, vier -grundgelenke, eine radiale und eine ulnare Handfläche, eine Handwurzel) gemittelt dargestellt, siehe Abbildung 4a. Dies entspricht den Positionen der Foliensensoren auf der Handinnenfläche. Abbildung 4b zeigt die Druckspitzen in der Wirkfläche zwischen der Hand und dem jeweiligen Griff aus allen Messungen je Proband und Lastfall. Die Messwerte der einzelnen Sensorzellen werden je Zone gemittelt, die Druckspitzen entsprechen dem Maximum dieser Flächenpressungen je Zone. Die höchste Druckspitze liegt beim adaptiven Handgriff in Zone 5 und beträgt $p_{\max_ad}(5) = 119,67 \text{ kPa}$, bei den anderen Griffen liegt sie bei $p_{\max_pers}(6) = 138,1 \text{ kPa}$ und $p_{\max_opt}(6) = 147,99 \text{ kPa}$. Personalisierte und optimierte Griffe weisen höhere Druckspitzen als der adaptive Handgriff auf.

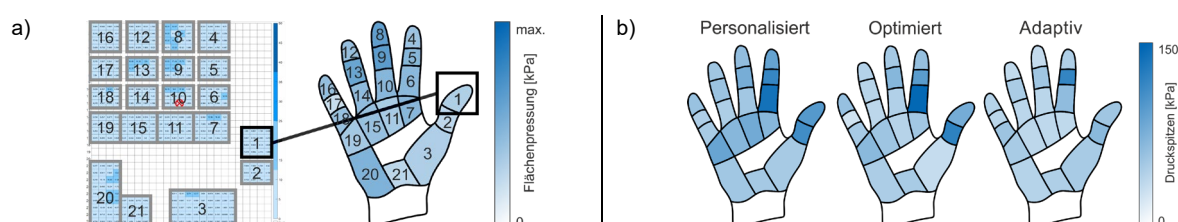


Abbildung 4: Flächenpressung a) als schematische Darstellung der Messwerte je Zone aus der Sensormatrix; b) Druckspitzen in den Zonen, nach Griff über alle Lastfälle

Die mittlere Flächenpressung je Griff wird aus den Messwerten je Zone über alle 35 Probanden und sechs Lastfälle gemittelt. Hierbei entsprechen 10 kPa einer Kraft von 1 N auf 1 cm^2 der Wirkfläche zwischen Hand und Griff. Abbildung 5a veranschaulicht die mittlere Flächenpressung in den Zonen und je Griff mit Mittelwerten (M) und Standardabweichungen (SD), Abbildung 5b die subjektiv empfundenen Druckstellen je Griff über alle Lastfälle. Insbesondere in den Zonen (siehe Abbildung 5a) der Finger (-grundgelenke) weist der adaptive Handgriff geringere Flächenpressungen auf. Unkomfortable Druckstellen wurden besonders im Bereich der ulnaren (20) und radialen (3) Handfläche sowie in den mittleren Fingergliedern (5, 9, 13, 16) markiert.

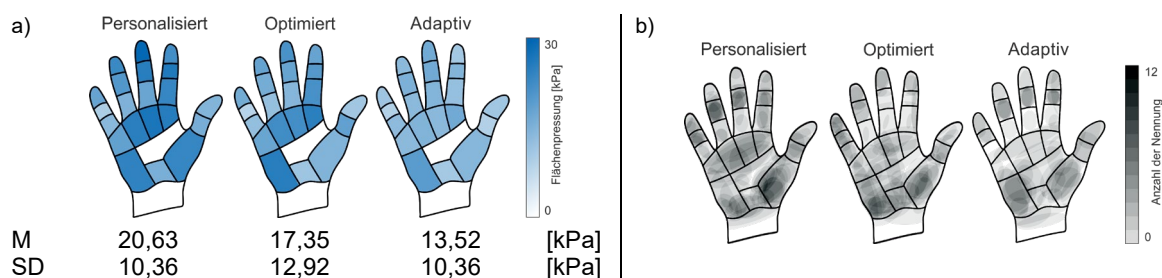


Abbildung 5: Zusammenfassung der erfassten a) mittleren Flächenpressung; b) subjektiv unkomfortabel empfundenen Druckstellen, je nach Griff über alle Lastfälle

Die Unterschiede der mittleren Flächenpressungen je Griff werden mittels einfaktorieller Varianzanalyse mit Messwiederholung überprüft. Hierfür werden $n = 4410$ Messwerte je Griff (35 Probanden \times 6 Lastfälle \times 21 Zonen) verwendet. Die Voraussetzung der Sphärizität ist nicht erfüllt, da der Mauchly-Test ($W(2) = 0,97$) mit $p < ,001$ signifikant ist. Mit $\epsilon = 0,973 > 0,75$, wird nach Girden (1992) der Huynh-Feldt-

Korrekturfaktor für die Berechnung verwendet. Es zeigt sich ein signifikanter Unterschied in der mittleren Flächenpressung ($F(1,95; 8580,21) = 722,76$; $p < ,001$; $\eta_p^2 = 0,14$). Der Bonferroni-korrigierte paarweise Vergleich der Griffe, siehe Tabelle 2, zeigt signifikante Differenzen zwischen den Griffen. Die Effektstärke von 0,53 entspricht nach Cohen (1992) einem starken Effekt. Die mittlere Flächenpressung des adaptiven Handgriffs ist damit signifikant geringer als die des optimierten und des personalisierten Griffs.

Tabelle 2: Paarweiser Vergleich der mittleren Flächenpressungen der drei Griffe

Griff 1	Griff 2	Mittlere Differenz	Standardfehler	95%-Konfidenzintervall		p
				Untergrenze	Obergrenze	
Adaptiv	Personalisiert	-7,107	0,202	-7,590	-6,624	$p < ,001$
Adaptiv	Optimiert	-3,828	0,176	-4,249	-3,406	$p < ,001$
Personalisiert	Optimiert	3,279	0,183	2,842	3,716	$p < ,001$

4. Diskussion und Ausblick

Die Realisierung formadaptiver Strukturen in Handgriffen wird durch die additive Fertigung ermöglicht. Die dadurch anpassbaren Wirkflächen zwischen Hand und Griff verringern die Belastung bei wechselnden Lastfällen signifikant. Da die Stichprobe der hier beschriebenen Nutzungsanalyse die 5- bis 95-Perzentil-Größen der DIN 33402-2 (2020) abdeckt, ist eine Übertragung der Erkenntnisse auf große Populationen von Nutzern möglich. Die Verwendung der rechten Hand zur Übertragung der niedrigen (vgl. Bullinger 1994) Lasten ist aufgrund der analogen Eignung für linkshändige Probanden (Schmauder & Solf 1998) angemessen. Die Sensoren zur Messung der Flächenpressung wurden für jeden Probanden individuell befestigt und die Haltung am Prüfstand gleich eingestellt. Dennoch ist eine Variation in der Haltung und der Position der Sensoren nicht vollständig auszuschließen. Gleichzeitig beeinflussen die Sensoren in der Wirkfläche, trotz ihrer geringen Dicke von 1,1 mm (Kießling et al. 2022), potenziell das Komfortempfinden. Die objektiven und subjektiven Daten, siehe Abbildung 5, ähneln sich ausreichend. Die Abfrage des subjektiven Diskomfort für jeden einzelnen Lastfall, statt gesamtheitlich je Griff, könnte hier weitere Erkenntnisse bringen. Die Darstellung der Messwerte der Sensormatrix auf der Hand verzerrt die Form der Sensoren, entspricht damit allerdings eher der realen, gewölbten Anbringung der Sensoren auf der Hand. Die Belastung liegt, auch für die Druckspitzen, innerhalb des erwarteten Bereichs bei der Lastübertragung über Handgriffe von $120 \leq P \leq 250$ kPa (vgl. Kong & Lowe 2005; Kabra et al. 2015). Die Aufgaben zur isometrischen Lastübertragung in der Nutzungsanalyse entsprechen einer Abstraktion der realen Bedienung. Daher ist ein Transfer der Untersuchungen adaptiver Handgriffe auf lastintensivere Bedienkontexte mit Bewegungen des Griffs, beispielsweise Elektrowerkzeuge, empfehlenswert.

5. Literatur

- Ardenne M von, Musiol G, Reball S (2005): Effekte der Physik und ihre Anwendungen. 3. Aufl. Frankfurt/Main: Verlag Harri Deutsch.
- Bender B, Gericke K (2021): Pahl/Beitz Konstruktionslehre.
- Bullinger H-J (1994): Ergonomie. Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung. Unter Mitarbeit von R. Ilg und M. Schmauder: Springer Fachmedien Wiesbaden.

- Cohen J (1992): Statistical Power Analysis. In: *Curr Dir Psychol Sci* 1 (3), S. 98–101. DOI: 10.1111/1467-8721.ep10768783.
- Corlett EN, Bishop RP (1976): A technique for assessing postural discomfort. In: *Ergonomics* 19 (2), S. 175–182. DOI: 10.1080/00140137608931530.
- Deboli R, Calvo A (2009): The Use of a Capacitive Sensor Matrix to Determine the Grip Forces Applied to the Olive Hand Held Harvesters. In: *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*.
- DIN EN ISO 9241-11:2018-11, 2018: Ergonomics of human-system interaction – Part 11: Usability: Definitions and concepts.
- DIN 33402, 2020: Ergonomie – Körpermaße des Menschen.
- DIN 8580, 2022: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung.
- Follmer S, Leithinger D, Olwal A, Cheng N, Ishii H (2012): Jamming user interfaces. In: Rob Miller (Hg.): *Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology*, S. 519–526.
- Girden ER (1992): ANOVA. Repeated Measures: SAGE.
- Kabra C, Jaiswal R, Arnold G, Abboud R, Wang W (2015): Analysis of hand pressures related to wheelchair rim sizes and upper-limb movement. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 47, S. 45–52.
- Kiessling JM, Hilbig K, Dinkel J, Schmid M, Maier T, Vietor T (2022): Exploratory Analysis of Adaptively Morphing Handle Forms for Load Transfer Use Cases. In: *Proceedings of the Design Society: DESIGN 2022* 2, S. 2117–2126. DOI: 10.1017/pds.2022.214.
- Kiessling J, Maier T, Wiesenfarth S, Mayer S (2023): User-centered design of an adaptively morphing human-machine interface. In: *Usability and User Experience. 14th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2023)*.
- Koller R, Kastrup N (1998): *Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Koltze K, Souchkov V (2017): *Systematische Innovation. TRIZ-Anwendung in der Produkt- und Prozessentwicklung*. 2., überarbeitete Auflage. München: Hanser; Ciando.
- Kong YK, Lowe BD (2005): Optimal cylindrical handle diameter for grip force tasks. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 35 (6), S. 495–507.
- Kuijt-Evers LFM (2007): *Comfort in Using Hand Tools. Theory, Design and Evaluation*. Dissertation. TU Delft.
- Kumke M (2018). *Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen* (Vol. 124). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Laßmann P, Kießling J, Mayer S, Janny B, Maier T (2019): aHa – Der adaptive Handgriff der Zukunft. In: Ralph H. Stelzer und Jens Krzywinski (Hg.): *Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design* 2019, S. 107-123.
- Oxford Creativity (2022): TRIZ Effects Database. Online verfügbar unter <https://www.triz.co.uk/triz-effects-database>, zuletzt aktualisiert am 30.09.2023, zuletzt geprüft am 02.10.2023.
- Ponn J, Lindemann U (2011): *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltungsformen*. 2. Aufl. 2011. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Pronker AJ, Abbink D A, van Paassen MM, Mulder M (2020): Estimating an LPV Model of Driver Neuromuscular Admittance Using Grip Force as Scheduling Variable. In: *IEEE Trans. Human-Mach. Syst.* 50 (5), S. 454–464.
- Roth K (2012): Allgemeine Grundlagen der Konstruktionslehre. In: Karlheinz Roth (Hg.): *Konstruktionslehre*. 3. Auflage, S. 17–52.
- Schmauder M, Solf JJ (1998): *Händigkeitsgerechte Gestaltung von Arbeitsmitteln*, S. 1–16.
- Schmid M, Maier T (2017): *Technisches Interface Design*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Wohlers TT, Campbell RI, Diegel O, Huff R, Kowen J (2023): *Wohlers Report - 3D Printing and Additive Manufacturing: Global State of the Industry*, ISBN 978-1-6220-4966-0.
- You H, Kumar A, Young R, Malzahn DE (2005): An ergonomic evaluation of manual Cleco plier designs: effects of rubber grip, spring recoil, and worksurface angle. In: *Applied Ergonomics* 36 (5), S. 575–583. DOI: 10.1016/j.apergo.2005.01.014.

Danksagung: Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Projekt „Universal Design für adaptive Handgriffe zur Anpassung an spezifische Bedienszenarien“ (Projektnr.: 452009430).



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 · www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de

Screen design und Umsetzung

© 2024 fröse multimedia, Frank Fröse,

office@internetkundenservice.de, www.internetkundenservice.de