

Prüfung der Ergonomie von PSA-Systemen – Elemente eines europäischen Normentwurfs

Peter BRÖDE¹, Kalev KUKLANE², George HAVENITH³

¹*Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund
Ardeystraße 67, D-44139 Dortmund*

²*Institute for Safety (IFV)*

P.O. Box 7112, NL-2701 AC Zoetermeer, NL

³*Environmental Ergonomics Research Centre,
Loughborough Design School of Design & Creative Arts,
Loughborough University, LE11 3TU, UK*

Kurzfassung: Die Relevanz des in einem Normentwurf zur Prüfung ergonomischer Eigenschaften von persönlicher Schutzausrüstung (PSA) im Vergleich zu einer lastfreien Referenz vorgeschlagenen Benchmark-Kriteriums von 80% wurde anhand von Messungen des Energieumsatzes (M) mit PSA relativ zu einer Sportbekleidung geprüft. Der mittlere Anstieg von M mit PSA lag mit bis zu 20% innerhalb des Benchmark-Bereichs, war jedoch statistisch signifikant, repräsentierte große Effektstärken und war mit geschätzten Einbußen der Produktivität von 5–9% assoziiert. Daher sollten Beispieldaten zur Veranschaulichung und zur Herleitung relevanter Benchmark-Kriterien in den Normentwurf integriert werden.

Schlüsselwörter: Standard, Schutzkleidung, PSA, Energieumsatz, Hitze

1. Einleitung und Fragestellung

Eine Arbeitsgruppe des CEN/TC122/WG14 erarbeitet gegenwärtig auf europäischer Ebene den Entwurf eines Standards zum Einsatz von Testpersonen zur Prüfung ergonomischer Eigenschaften von aus mehreren Komponenten bestehenden Systemen persönlicher Schutzausrüstung (PSA).

In Erweiterung erster Ansätze aus dem Feuerwehr-Bereich (BS 8469 2007) finden neben Fragen der Kompatibilität und möglicher Einschränkungen visueller, manueller oder motorischer Funktionen auch Aspekte der durch den PSA-Einsatz zusätzlich hervorgerufenen thermischen Beanspruchung (Bröde et al. 2010; Havenith & Fiala 2016) Beachtung. Der vorliegende Normentwurf beschreibt Verfahren zum Test zweier oder mehrerer Systeme untereinander (Vergleichstest) oder als Benchmark-Test im Vergleich zu einer lastfreien Referenz, wobei das zu testende System mindestens 80% der Performanz unter Referenzbedingungen erreichen soll.

Dieser Beitrag hat das Ziel, am Beispiel des mit PSA im Vergleich zu einer Referenzkleidung registrierten Energieumsatzes (Dorman 2007; Dorman & Havenith 2009) die Relevanz dieses Benchmark-Kriteriums zu quantifizieren. Dazu werden die durch die erhöhte metabolische Wärmeproduktion eingeschränkte Ausführbarkeit körperlicher Arbeit unter Hitzebelastung und damit einhergehende Produktivitätseinbußen (Bröde & Fiala 2017) simuliert.

Da der Normentwurf auch eine statistische Fallzahlplanung für den benötigten Umfang der Probanden-Kollektive behandelt (Bröde et al. 2018b), soll darüber hinaus an dem vorliegenden Beispiel die Ableitung intra- und inter-individueller Varian-

zen und Korrelationen sowie Effektstärken als dazu nötige Eingangsgrößen (Cohen 1992) aufgezeigt werden.

2. Methoden

2.1 Datenmaterial

Die Datenbasis entstammt früheren Untersuchungen (Dorman 2007; Dorman & Havenith 2009). Der Energieumsatz (M) in Watt wurde bei 6 Probanden (3w, 3m) im Labor an mehreren Tagen in verschiedenen Arbeitsbekleidungen für Rettungskräfte, Feuerwehr, Militär etc. zum Schutz vor mechanischen, chemischen, biologischen oder Kälte-Einwirkungen gemessen und mit den am jeweiligen Tag wiederholt in einer standardisierten Sportbekleidung als Referenz registrierten Werten verglichen. Die Messungen erfolgten unter Ruhebedingungen und bei unterschiedlichen Tätigkeiten (Laufbandarbeit mit 5km/h, Step-Test mit 25 Steps/min mit 20 cm Höhe, Hindernis-Parcours mit Lastenmanipulation in vorgegebenem Arbeitstakt).

2.2 Statistische Analyse

Mit Varianzanalysen (ANOVA) mit zufälligen Effekten (Littell et al. 2006) wurden getrennt für die verschiedenen Aktivitäten aus den 48 gemessenen M in Referenzkleidung (8 Wiederholungen pro Proband) Mittelwerte mit Standardfehlern und 95%-Konfidenzintervallen (KI) sowie intra- und inter-individuelle Varianzkomponenten geschätzt, aus denen Intra-Class-Korrelationen (ICC) und Variationskoeffizienten (VK) berechnet wurden.

Die Benchmark-Werte für die verschiedenen Schutzkleidungen wurden als prozentuale Änderung des Energieumsatzes relativ zur Referenzkleidung (ΔM) berechnet und mit ANOVA für wiederholte Messungen (Littell et al. 2006) analysiert.

2.3 Simulationsberechnungen zu Produktivitätsverlusten (PV) in Hitze

Die Abschätzung möglicher Produktivitätsverluste (PV) durch Hitzebelastungen gewinnt infolge des Klimawandels an Bedeutung (Gao et al. 2018; Watts et al. 2019), wobei unterschiedliche Metriken verwendet werden (Bröde et al. 2018a). Diese basieren häufig auf dem Klima-Index „Wet Bulb Globe Temperature“ $WBGT$ (ISO 7243 2017) und dessen Grenzwert $WBGT_{lim}$ in °C, der von M abhängt und für akklimatisierte Personen berechnet wird als $WBGT_{lim} = 56.7 - 11.5 \cdot \log_{10}(M)$.

Bei Überschreiten von $WBGT_{lim}$ sind Ruhepausen einzuführen (Malchaire 1979), aus denen sich der Produktivitätsverlust PV_{WBGT} in % ergibt als (Bröde et al. 2018a):

$$PV_{WBGT} = 100 - \max(0, \min(1, (WBGT_{lim,rest} - WBGT) / (WBGT_{lim,rest} - WBGT_{lim}))) \cdot 100 \quad (1)$$

Dabei bezeichnet $WBGT$ den aktuellen $WBGT$ -Wert und $WBGT_{lim,rest}$ den für Ruhebedingungen ($M=117$ W) berechneten Grenzwert.

Eine Alternativ-Metrik basiert auf einer empirisch aus Produktivitätsdaten im Projekt „Hothaps“ (Kjellstrom et al. 2009) abgeleiteten Relation (Bröde et al. 2018a):

$$PV_{Hothaps} = 100 - \min(100, \max(10, 98.33 - 9.61 \cdot (WBGT - WBGT_{lim}))) \quad (2)$$

Die Simulationen wurden mit beiden Metriken für Energieumsätze (M) von 200–600 W sowie verschiedene $WBGT$ -Werte (26, 28, 30, 32 °C) und angenommene prozentuale Änderungen des Energieumsatzes durch PSA ($\Delta M = 0\%$, $+10\%$, $+20\%$, $+30\%$) durchgeführt.

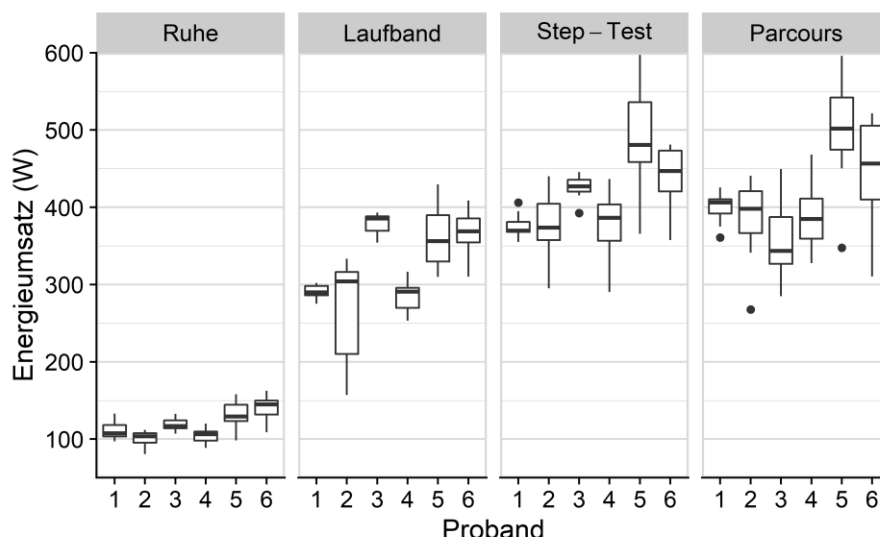


Abbildung 1: Box-Plots der Verteilung des bei 6 Probanden (3w, 3m) in wiederholten Versuchen mit Referenzkleidung unter verschiedenen Aktivitäten registrierten Energieumsatzes.

3. Ergebnisse

3.1 Wiederholte Messung in Referenzkleidung

Abbildung 1 veranschaulicht die intra- und inter-individuelle Variabilität des in Referenzkleidung registrierten Energieumsatzes, die absolut betrachtet unter Arbeitsbelastung im Vergleich zur Ruhebedingung höher waren, während sich die relative Variabilität (VK) mit Werten zwischen 11-14% für die intra-individuelle und knapp 20% für die Gesamtvarianz kaum unterschied (Tabelle 1). Letztere entsprach damit ungefähr der im Benchmark-Test erlaubten Abweichung von der Referenz.

Der Ruhe-Energieumsatz lag im Mittel nahe beim Standardwert von 117 W (ISO 7243 2017). Der Energieumsatz bei Laufbandarbeit war im Vergleich zu Step-Test und Hindernis-Parcour geringer (Tabelle 1), während die intra-individuelle Korrelation von 0.6 beim Laufband über 0.5 beim Step-Test bis zu 0.4 beim Parcours abnahm.

Tabelle 1: Mit ANOVA geschätzte Mittelwerte (AM), Standardfehler (SE) und 95%-KI des in wiederholten Versuchen mit Referenzkleidung bei verschiedenen Aktivitäten registrierten Energieumsatzes in Watt zusammen mit Intra-Class-Korrelationen (ICC) und Variationskoeffizienten für die intra-individuelle (VK_{intra}) und gesamte Variabilität (VK_{tot}).

	AM	SE	(95%-KI)	ICC	VK_{intra}	VK_{tot}
Ruhe	118	6	(102 – 134)	.55	11%	17%
Laufband	326	20	(275 – 376)	.61	11%	18%
Step-Test	413	19	(366 – 461)	.49	11%	15%
Parcours	412	21	(358 – 466)	.40	14%	18%

3.2 Benchmark-Tests unterschiedlicher Schutzbekleidungen

Abbildung 2 zeigt für die 14 Schutzbekleidungen die über die drei Arbeitsmodi gemittelten ANOVA-Schätzwerte des prozentualen Energieumsatz-Anstiegs relativ zur Referenzkleidung (ΔM), die im Mittel von 5–20% variierten, wobei oberhalb von $\Delta M = 10\%$ die 95%-Konfidenzintervalle den Referenzwert (0%) nicht überdeckten.

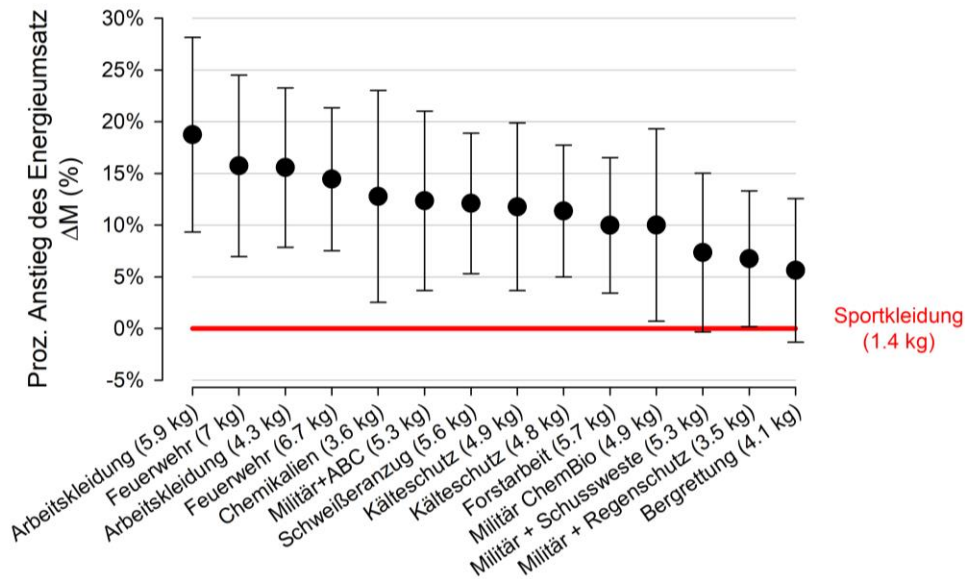


Abbildung 2: Mit ANOVA geschätzte Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervallen der über die drei Arbeitsmodi gemittelten prozentualen Anstiege des Energieumsatzes (ΔM) für 14 Schutzbekleidungen relativ zu einer Sportkleidung als Referenz.

3.3 Simulation von Produktivitätseinbußen

Die simulierten Produktivitätsverluste nahmen mit ansteigenden Energieumsätzen und Hitzebelastungen (WBGT) zu (Abbildung 3A), wobei PV_{WBGT} im Vergleich zu $PV_{Hothaps}$ bei hohem WBGT deutlich höhere Verluste anzeigte.

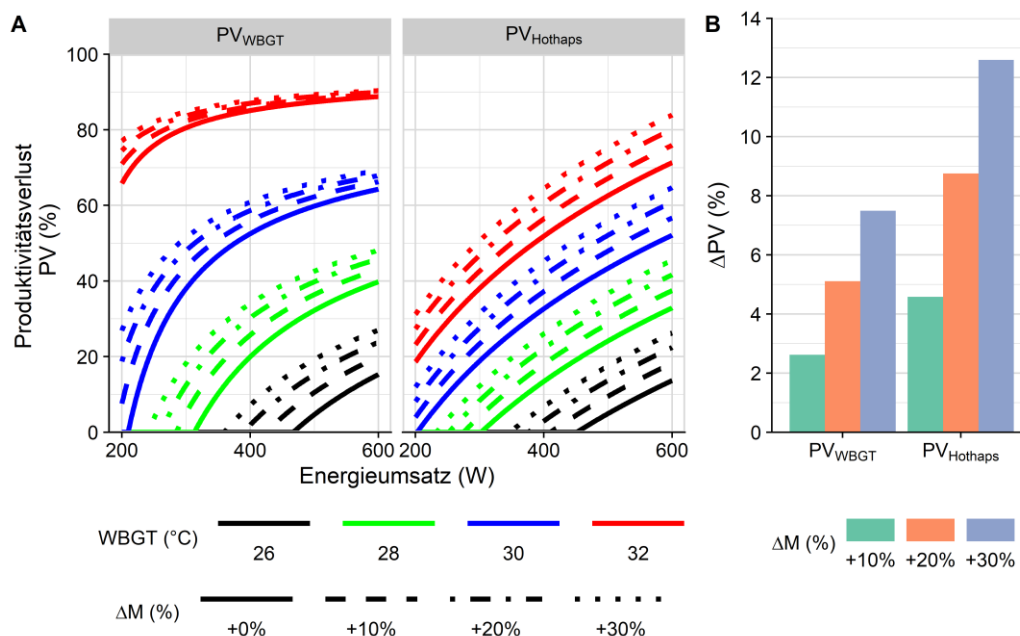


Abbildung 3: (A) Mit zwei Metriken geschätzter prozentualer Produktivitätsverlust (PV) in Abhängigkeit vom Energieumsatz für unterschiedliche Hitzebelastungen (WBGT) und angenommene prozentuale Anstiege des Energieumsatzes (ΔM) gegenüber einer Referenz ($\Delta M=0\%$). (B) Median der über den Energieumsatzbereich (200-600 W) und unterschiedliche Wärmebelastungen aus (A) integrierten PV-Zunahmen (ΔPV) für die zwei Schätz-Metriken und verschiedene angenommene prozentuale Anstiege des Energieumsatzes (ΔM).

Zunahmen des Energieumsatzes (ΔM), etwa durch PSA-Einsatz, erhöhten diese Verluste weiter. Dabei reagierte der auf empirischen Produktivitätsdaten beruhende $PV_{Hothaps}$ verglichen zum thermophysiologischen Beanspruchungsindex PV_{WBGT} empfindlicher, wie die in Abbildung 3B dargestellten, über die gesamten Energieumsatz- und WBGT-Bereiche integrierten, mittleren PV-Zuwächse (ΔPV) verdeutlichen. Pro 10%-Zuwachs im Energieumsatz (ΔM) nahm PV_{WBGT} um etwa 2.5% zu, während dieser Anstieg für $PV_{Hothaps}$ mehr als 4% betrug.

4. Diskussion

Die Auswertung des vorliegenden Datensatzes eignet sich zur Veranschaulichung der im Normentwurf enthaltenen Konzepte des Vergleichs oder Benchmark-Tests von PSA-Systemen; denn sie ermöglichte z.B. Aussagen über Effektstärken und intra-individuelle Korrelation als wesentliche Eingangsgrößen bei der statistischen Fallzahlabschätzung (Bröde et al. 2018b).

Die wiederholte Messung des Energieumsatzes in Referenzkleidung erlaubte auch die Abschätzung der intra-individuellen und Gesamtvarianz. Letztere lag mit knapp 20% in gleicher Größenordnung wie die bei einem Benchmark-Kriterium von 80% noch erlaubte Abweichung. Damit ergibt sich für die erlaubte Abweichung die Effektstärke als Cohen's $d > 1$, was einen mittleren bis starken Effekt noch als angemessen anzeigen würde (Cohen 1992; Hopkins et al. 2009).

Auch die mit einem 20%igen Anstieg des Energieumsatzes assoziierte Zunahme des Produktivitätsverlustes unter Hitzebelastung von 5% bzw. 9% je nach Metrik kann abhängig vom Anwendungsfall (Flouris et al. 2018) eine nicht unerhebliche Auswirkung der PSA-Nutzung darstellen, zumal wir hier nur mit PSA assoziierte Energieumsatz-Effekte und nicht die ebenfalls erhöhten Wärmeisolationen und Wasserdampfwiderstände (Havenith & Fiala 2016; ISO 7243 2017) betrachteten.

Bei dieser Einschätzung ist aber der einfache Ansatz der hier verwendeten Metriken zu bedenken, die auf dem oft über-sensitiv auf Hitze reagierenden WBGT (Kampmann et al. 2012) basieren. Die Anwendung komplexer Modelle der thermophysiologischen Beanspruchung (Bröde et al. 2018a; Lundgren-Kownacki et al. 2017) oder auf gezielten Laborexperimenten (Foster et al. 2019) und Feldstudien (Lundgren et al. 2014) beruhende Modelle können zu anderen Bewertungen führen.

5. Schlussfolgerung

Die Re-Analyse des vorliegenden Datensatzes ermöglicht eine an der Relevanz ausgerichtete Überprüfung der im Normentwurf enthaltenen Bewertungskriterien, die idealerweise für alle vorgeschlagenen Verfahren vor ihrer Aufnahme in den Standard vorliegen sollte. Darüber hinaus liefert sie die quantitativen Informationen, die zur ebenfalls intendierten statistischen Fallzahlabschätzung benötigt werden.

Für den Normentwurf zur Ergonomie von PSA-Systemen erscheint es daher empfehlenswert, Beispiele wie das hier vorgestellte zur Veranschaulichung, aber auch zur Herleitung relevanter Benchmark-Kriterien zu integrieren.

6. Literatur

Bröde P, Fiala D (2017) Klimawandel und Ausführbarkeit körperlicher Arbeit im Freien – Bewertungsverfahren im Vergleich. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Ed) 63. Kongress der Gesell-

- schaft für Arbeitswissenschaft. FHNW Brugg-Windisch, Schweiz: GfA-Press, 1-6.
- Bröde P, Fiala D, Lemke B, Kjellstrom T (2018a) Estimated work ability in warm outdoor environments depends on the chosen heat stress assessment metric. *International Journal of Biometeorology* 62:331-345.
- Bröde P, Graveling R, Heus R (2018b) Evaluating the Ergonomics of PPE Systems – How Many Subjects are Needed? In: European Society of Protective Clothing (Ed) Abstracts of the 8th European Conference on Protective Clothing - Upcoming Generation. Porto, Portugal: CITEVE - Technological Centre for the Textile and Clothing Industry of Portugal, 80-82.
- Bröde P, Kuklane K, Havenith G (2010) Thermische Beanspruchung in Schutzkleidung. Ergebnisse eines europäischen Verbundprojekts. *Techn Überwachung* 51:14-18.
- BS 8469 (2007) Personal protective equipment for firefighters. Assessment of ergonomic performance and compatibility. Requirements and test methods. London: British Standards Institution.
- Cohen J (1992) A power primer. *Psychological Bulletin* 112:155-159.
- Dorman LE (2007) The effects of protective clothing and its properties on energy consumption during different activities. Loughborough, UK: Loughborough University, PhD Thesis.
- Dorman LE, Havenith G (2009) The effects of protective clothing on energy consumption during different activities. *European Journal of Applied Physiology* 105:463-470.
- Flouris AD, Dinas PC, Ioannou LG, Nybo L, Havenith G, Kenny GP et al. (2018) Workers' health and productivity under occupational heat strain: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet Planetary Health* 2:e521-e531.
- Foster J, Smallcombe J, Hodder S, Jay O, Flouris A, Havenith G (2019) A New Paradigm To Quantify The Reduction Of Physical Work Capacity In The Heat. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 51:15.
- Gao C, Kuklane K, Östergren P-O, Kjellstrom T (2018) Occupational heat stress assessment and protective strategies in the context of climate change. *International Journal of Biometeorology* 62:359-371.
- Havenith G, Fiala D (2016) Thermal Indices and Thermophysiological Modeling for Heat Stress. *Comprehensive Physiology* 6:255-302.
- Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J (2009) Progressive Statistics for Studies in Sports Medicine and Exercise Science. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 41:3-12.
- ISO 7243 (2017) Ergonomics of the thermal environment - Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Kampmann B, Bröde P, Fiala D (2012) Physiological responses to temperature and humidity compared to the assessment by UTCI, WBGT and PHS. *International Journal of Biometeorology* 56:505-513.
- Kjellstrom T, Gabrysch S, Lemke B, Dear K (2009) The 'Hothaps' programme for assessing climate change impacts on occupational health and productivity: an invitation to carry out field studies. *Glob. Health Action* 2.
- Littell RC, Milliken GA, Stroup WW, Wolfinger RD, Schabenberger O (2006) SAS® System for Mixed Models, Second Edition. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Lundgren-Kownacki K, Martínez N, Johansson B, Psikuta A, Annaheim S, Kuklane K (2017) Human responses in heat – comparison of the Predicted Heat Strain and the Fiala multi-node model for a case of intermittent work. *Journal of Thermal Biology* 70:45-52.
- Lundgren K, Kuklane K, Venugopal V (2014) Occupational heat stress and associated productivity loss estimation using the PHS model (ISO 7933): a case study from workplaces in Chennai, India. *Glob Health Action* 7:10.3402/gha.v3407.25283.
- Malchaire J (1979) The TLV work-rest regimens for occupational exposure to heat: a review of their development. *Annals of Occupational Hygiene* 22:55-62.
- Watts N, Amann M, Arnell N, Ayeb-Karlsson S, Belesova K, Boykoff M et al. (2019) The 2019 report of The Lancet Countdown on health and climate change: ensuring that the health of a child born today is not defined by a changing climate. *The Lancet* 394:1836-1878.

Danksagung: Ein ganz besonderer Dank gilt Frau Dr Lucy Dorman für die Erhebung der Daten im Rahmen ihres Dissertationsprojekts. Teile der Studie wurden von der Europäischen Union gefördert als Projekt THERMPROTECT ("Thermal properties of protective clothing and their use", G6RD-CT-2002-00846).



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch?

66. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

TU Berlin
Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme

HU Berlin
Professur Ingenieurpsychologie

16. – 18. März 2020, Berlin

GfA-Press

Bericht zum 66. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 16. – 18. März 2020

**TU Berlin, Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme
HU Berlin, Professur Ingenieurpsychologie**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2020
ISBN 978-3-936804-27-0

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

© 2020 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de