

Der Wirkungsgrad der Schweißverdunstung im feucht-heißen Klima – Ergebnisse einer indirekten Bestimmung mithilfe einer umfangreichen Datenbank

Bernhard KAMPMANN¹, Peter BRÖDE²

¹ *Bergische Universität Wuppertal, Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
Fachgebiet Arbeitswissenschaft*

Gaußstraße 20, D-42097 Wuppertal

² *Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund (IfADo)
Ardeystraße 67, D-44139 Dortmund*

Kurzfassung: Der als Verhältnis des verdunsteten (nicht-abgetropften) zum produzierten Schweiß zu berechnende, als Schwitzeffizienz bezeichnete Wirkungsgrad der Schweißverdunstung (η) ist zur Beurteilung von Hitzebeanspruchungen von Bedeutung und kann mit großem Aufwand unter Laborbedingungen explizit bestimmt oder mit Wärmebilanzrechnungen abgeschätzt werden. Dieser Beitrag stellt einen alternativen datengetriebenen Ansatz vor. Durch Anpassung generalisierter additiver Modelle an einen Datenbestand von insgesamt 223 dreistündigen Klimaexpositionen bei geringer Luftgeschwindigkeit (v_a ; 0,3 m/s) mit 14 jungen, mit Shorts bekleideten, akklimatisierten männlichen Probanden wurde η über den Erträglichkeitsbereich von Lufttemperatur (T_a ; 25–55 °C) und -feuchte (p_a ; 0,4–5 kPa) indirekt bestimmt. Für Lufttemperaturen oberhalb von 28 °C nahm η mit zunehmender Feuchte ab und sank bei großer Feuchte nahe 5 kPa auf unter 40%. Die Übereinstimmung dieser Befunde und auch weiterer Resultate für nicht-akklimatisierte Probanden und zur Wirkung erhöhter Luftgeschwindigkeit mit Beobachtungen aus aufwändigen experimentellen Verfahren bestätigt die Eignung unserer Methode zur Bestimmung von η in weiteren Studien, z.B. mit vollständig bekleideten Personen.

Schlüsselwörter: Hitze, Bewertungsmaßstab, Modell, Schwitzeffizienz

1. Einleitung

Bei einer Klimaexposition steigt die Schweißproduktion mit zunehmender Lufttemperatur und Luftfeuchte an. Bei hoher Klimabelastung im feucht-heißen Klimabereich wird mehr Schweiß produziert, als verdunsten kann: dann tropft ein Anteil des Schweißes ab und ist somit für die Verdunstungskühlung verloren. Der als Verhältnis des verdunsteten (nicht-abgetropften) zum produzierten Schweiß zu berechnende Wirkungsgrad der Schweißverdunstung (η), auch bezeichnet als Schwitzeffizienz, ist für Modellrechnungen der Thermoregulation zur Beurteilung der Hitzebeanspruchung (DIN EN ISO 7933 2004; Malchaire et al. 2001) von Bedeutung.

Man kann η explizit bestimmen, indem man - in einer Klimakammer - das Gewicht eines schwebend aufgehängten Probanden fortlaufend misst, dessen abtropfender Schweiß in einem Paraffinbad aufgefangen wird, wo er nicht mehr verdunsten kann. Durch Nachregeln der Lufttemperatur auf den Wert der sich einstellenden mittleren Hauttemperatur vermeidet man konvektive Wärmeverluste.

Die Zahl publizierter Beobachtungen ist aufgrund des Messaufwands jedoch gering. Die Studien wurden zudem zumeist mit ruhenden Probanden (Candas et al. 1979a, b, 1983), seltener unter Arbeitsbelastung (Alber-Wallerström & Holmér 1985; Lei et al. 2021) durchgeführt.

1.1 Motivation eines alternativen Ansatzes

Wenn man genügend Untersuchungen der Beanspruchung eines Probanden in weiten Bereichen des psychometrischen Diagramms (T_a , p_a) durchgeführt hat, kann man die gemessenen Beanspruchungsgrößen, z.B. Schweißrate (SR) oder mittlere Hauttemperatur (T_{sk}) durch empirische Ausgleichsfunktionen beschreiben. Es ist dann möglich, die oben beschriebenen aufwändigen Untersuchungen mithilfe der Ausgleichsfunktionen nachzuvollziehen, und so – entlang der Linien mit $T_a = T_{sk}$, längs derer keine konvektive Wärmeabgabe stattfindet – die Schweißproduktion zu bestimmen (Kampmann 2000).

Unter den Annahmen, dass zum einen im trockenen Klima noch kein Schweiß abtropft, und dass zum anderen auch bei stark belastendem Klima noch ein thermoregulatorisches Gleichgewicht erzielt wurde, muss man davon ausgehen, dass die Zunahme der Schweißproduktion längs einer Linie $T_a = T_{sk}$ durch das Abtropfen von Schweiß verursacht ist, da der gemessene Energieumsatz in einer gesamten Versuchsserie, in der nur T_a und p_a verändert werden, bei einer recht geringen Änderung der Rektaltemperatur kaum variiert (Q_{10} -Effekt, Kampmann & Bröde 2014).

Für eine der Versuchsserien ergab sich beispielsweise für die Linie $T_a = T_{sk}$ bei $p_a = 0$ kPa für die Schweißrate ein Wert von 410 g/h, was einer Verdunstungskühlung von 276 W entspricht und aus allen Werten des Sauerstoffverbrauchs in dieser Serie ein Bruttoenergieumsatz von (278 ± 13) W. Dies bestätigt die obige erste Annahme. Bei den Untersuchungen wurden Anstiege der Körpertemperatur von 0,1 °C pro Stunde gegen Ende der Expositionszeit von drei Stunden kaum überschritten, sodass auch von einem thermoregulatorischen Gleichgewicht auszugehen ist.

Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass man das Abtropfen von Schweiß für den weiten Klimabereich längs der gesamten $T_a = T_{sk}$ - Linie berechnen kann. Darüber hinaus kann man unter den gleichen Annahmen analoge Berechnungen auch für Linien $T_a - T_{sk} = \text{const.}$ anstellen, längs derer der konvektive Wärmetransport konstant ist. (Längs dieser Linien $T_a - T_{sk} = \text{const.}$ macht die Veränderung des Strahlungsanteils am Wärmetransport [der nicht in T_{sk} sondern in T_{sk}^4 linear ist] deutlich weniger als 5 % des Strahlungsanteils aus und kann vernachlässigt werden.)

In den Versuchen wurde die Feuchtigkeit der Haut von einem geschulten Mitarbeiter regelmäßig anhand der in Tab. 1 aufgeführten Stufen eingeschätzt.

Tabelle 1: Beschreibung des Zustandes der Haut:

Stufe	Beschreibung des Zustands der Haut
1	Fühlt sich trocken an, sieht matt aus
2	Fühlt sich feucht an, sieht nicht glänzend aus
3	Glänzend, noch keine deutlichen Schweißtropfen
4	Deutlich sichtbare Schweißtropfen
5	Herablaufende Schweißtropfen
6	Abtropfen von Schweiß

In Abb. 1 sind für einen Probanden die errechneten abtropfenden Schweißmengen im Bereich des psychrometrischen Diagramms zusammen mit den Einstufungen der Hautfeuchtigkeit für alle Messpunkte eingetragen, die die Auswertung stützen.

Man sieht, dass der höchste Befeuchtungsgrad oberhalb errechneter Abtropfraten von 50...100 g/h gehäuft auftritt, was den Ansatz stützt. Andererseits tropft bei sehr hoher Temperatur von $T_a = 55^\circ\text{C}$ scheinbar schon bei geringem Wasserdampfdruck Schweiß ab, so dass hierfür die genannten Annahmen nicht mehr zu gelten scheinen.

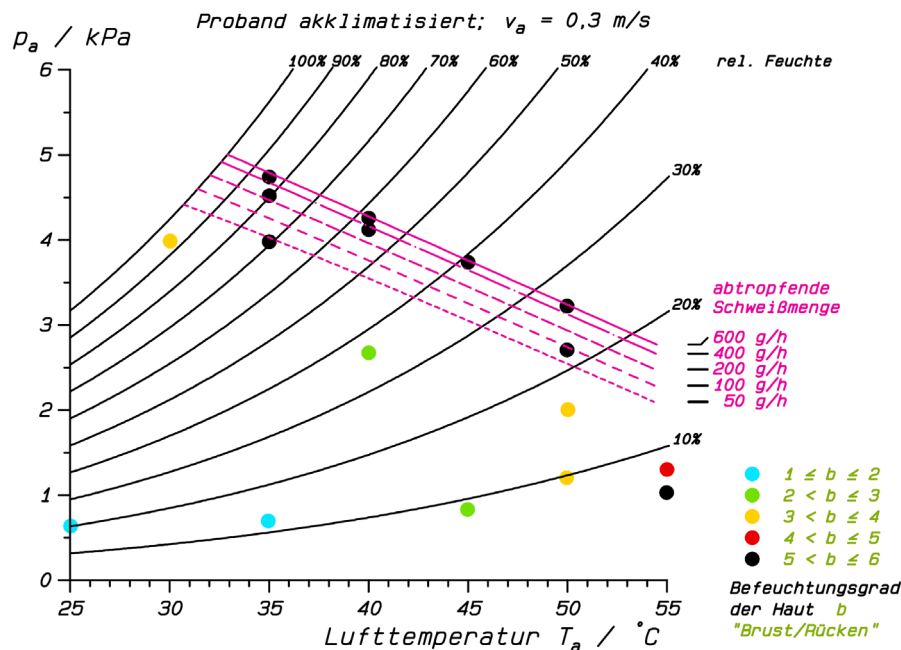


Abbildung 1: Linien gleicher Abtropfraten des Schweißes und Einstufung des Hautzustandes an allen Messpunkten eines Probanden. Der Mittelwert der Einstufungen von Brust und Rücken wurde für die Darstellung gewählt, weil Arme und Beine sich beim Gehen schneller bewegen als die Luftgeschwindigkeit und daher evtl. geringere Abtropfraten haben.

1.2 Fragestellung

Basierend auf dem zuvor skizzierten Ansatz (Kampmann 2000) führt dieser Beitrag eine alternative Methode zur indirekten Bestimmung der Schwitzeffizienz η in größeren Stichproben ein, die moderne Verfahren der Datenanalyse mit einer umfangreichen Datenbank physiologischer Hitzebeanspruchung verknüpft.

2. Methoden

Wir verwenden einen Datenbestand von insgesamt 223 dreistündigen Klimaexpositionen (Kampmann 2000; Kampmann & Bröde 2014, 2021) mit 14 jungen, mit Shorts bekleideten, akklimatisierten männlichen Probanden, die den Erträglichkeitsbereich von Lufttemperatur (T_a , 25–55 $^\circ\text{C}$) und -feuchte (Wasserdampfdruck p_a , 0,4–5 kPa) bei vorgegebener Arbeitsschwere (Gehen in der Ebene, 4 km/h) und Luftgeschwindigkeit (0,3 m/s) abdecken.

Abbildung 2 illustriert die zur Bestimmung von η erforderlichen Berechnungsschritte. Zunächst wurden die in der 3. Expositionsstunde registrierten Mittelwerte für mittlere Hauttemperaturen (T_{sk} , Abb. 2A) und Schweißraten (SR, Abb. 2B) im

psychrometrischen Diagramm durch Anpassung mehrdimensionaler Splines in Abhängigkeit von T_a und p_a mittels generalisierter additiver Modelle beschrieben (Wood 2017).

Aus den modellierten T_{sk} -Werten (Abb. 2A) wurden mit dem im R Paket *isoband* (Wilke & Pedersen 2021) implementierten ‚Marching Squares‘ Algorithmus die in Abb. 2C dargestellten Linien gleicher Differenzen von $(T_{sk}-T_a)$ errechnet, längs derer die konvektiven Wärmeverluste konstant sind.

Abb. 2D zeigt die sich längs dieser Linien aus Abb. 2B ergebende SR in Abhängigkeit vom Wasserdampfdruck. Wenn sich SR ausgehend von dem gestrichelt dargestellten, mit einem segmentierten linearen Regressionsmodell (Muggeo 2008) geschätzten verdunsteten Anteil erhöht, beschreibt diese Erhöhung die Rate des abgetropften Schweißes, welche η , berechnet als Verhältnis des verdunsteten zum produzierten Schweiß, vermindert.

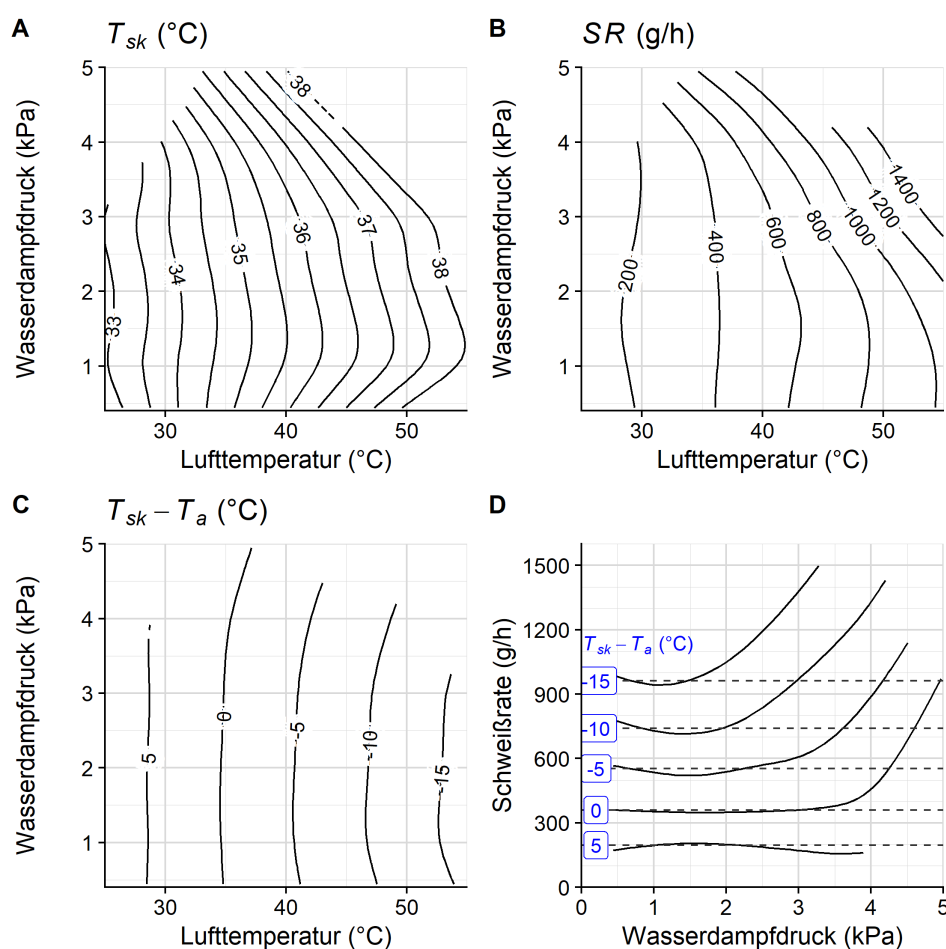


Abbildung 2: Äquivalenzlinien abhängig von Lufttemperatur und Wasserdampfdruck der (A) mittleren Hauttemperatur, (B) Schweißrate, (C) Differenz zwischen Haut- und Lufttemperatur berechnet aus A. (D) Schweißrate in Relation zum Wasserdampfdruck für unterschiedliche Differenzen von Haut- zu Lufttemperatur berechnet aus B und C mit durch gestrichelte Linien gekennzeichnetem verdunsteten Schweiß.

Die so für verschiedene, in 1 K Schritten von -15 bis +5 °C variierende, Temperaturgradienten ($T_{sk}-T_a$) errechnete Schwitzeffizienz η wurde schließlich im psychrometrischen Diagramm als Äquivalenzlinien in Relation zu T_a und p_a dargestellt.

3. Ergebnisse und Diskussion

Wie in Abbildung 3A für die Expositionen mit *akklimatisierten* Probanden bei geringer Luftgeschwindigkeit dargestellt, nahm für $T_a > 28^\circ\text{C}$ die Schwitzeffizienz η mit zunehmender Feuchte ab und sank für $T_a > 33^\circ\text{C}$ bei großer Feuchte nahe $p_a = 5\text{ kPa}$ auf unter 40%. Ähnlich niedrige Werte wurden auch für nicht-akklimatisierte Probanden in feucht-heißem Klima auf dem Fahrradergometer (Alber-Wallerström & Holmér 1985) berichtet.

Entsprechende Analysen von 134 Expositionen mit fünf akklimatisierten unbedeckten Probanden unter erhöhter Luftgeschwindigkeit (2 m/s) ergaben eine Verschiebung der Äquivalenzlinien nach rechts (Abb. 3B) mit ab $T_a > 32^\circ\text{C}$ reduzierter Schwitzeffizienz. Dies erklärt sich durch die bei erhöhter Luftgeschwindigkeit verbesserte Schweißverdunstung und stimmt mit früheren Resultaten unter Ruhebedingungen (Candas et al. 1979b) überein.

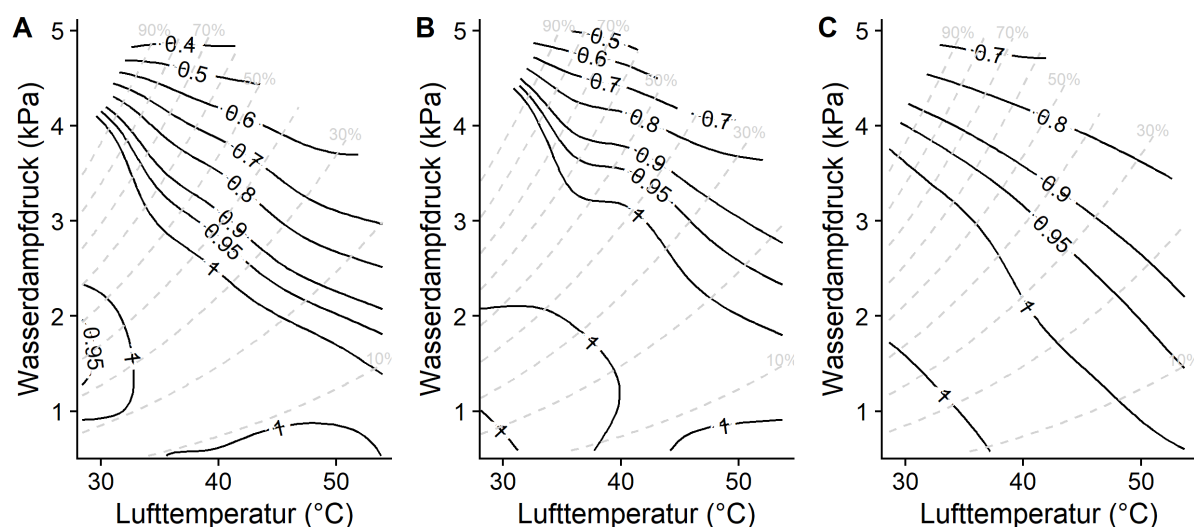


Abbildung 3: Äquivalenzlinien des als Verhältnis von verdunstetem zu produziertem Schweiß für unterschiedliche Differenzen der Haut- zur Lufttemperatur berechneten Wirkungsgrad der Schweißverdunstung (η) (A) für 223 Expositionen mit unbedeckten akklimatisierten Probanden bei geringer Luftgeschwindigkeit basierend auf den Werten aus Abb. 1 C&D. Zum Vergleich zeigen (B) die Ergebnisse für 134 Expositionen mit 5 unbedeckten akklimatisierten Probanden bei erhöhter Luftgeschwindigkeit von 2 m/s, und (C) für 166 Expositionen mit 9 unbedeckten nicht-akklimatisierten Probanden bei geringer Luftgeschwindigkeit wie in (A). Grau-gestrichelte Konturlinien kennzeichnen die relative Feuchte.

Abbildung 3C zeigt die Resultate aus 166 Expositionen mit neun unbedeckten *nicht-akklimatisierten* Probanden bei geringer Luftgeschwindigkeit (0,3 m/s), die im Vergleich zu den entsprechenden Versuchen mit akklimatisierten Probanden (Abb. 3A) unter feucht-heißen Bedingungen eine erhöhte Schwitzeffizienz aufwiesen. Dieses Ergebnis erklärt sich zum Teil aus der für nicht-akklimatisierte Personen niedrigeren Schweißrate, die zu weniger abtropfendem Schweiß führt. Ähnliche Resultate waren zuvor in Laborstudien sowohl für experimentell induzierte Akklimatisierung unter Ruhebedingungen (Candas et al. 1979b, 1983) als auch für jahreszeitlich bedingte natürliche Akklimatisation bei körperlicher Aktivität (Lei et al. 2021) berichtet worden.

4. Schlussfolgerung

Die Übereinstimmung unserer Befunde mit Beobachtungen aus den eingangs geschilderten aufwändigen experimentellen Verfahren zur Wirkung erhöhter Luftgeschwindigkeit oder für nicht-akklimatisierte im Vergleich zu akklimatisierten Probanden bestätigt grundsätzlich die Eignung der hier vorgestellten Methode zur Bestimmung der Schwitzeffizienz.

Weitere Untersuchungen und ggf. erforderliche Anpassungen der Methodik zur Bestimmung von η in weiteren Studien, z.B. mit vollständig bekleideten Personen (Kuwabara et al. 2021), sind geplant und mit der bestehenden Datenbank (Kampmann & Bröde 2021) auch umsetzbar.

5. Literatur

- Alber-Wallerström B, Holmér I (1985) Efficiency of sweat evaporation in unacclimatized man working in a hot humid environment. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 54:480-487.
- Candas V, Libert JP, Vogt JJ (1979a) Human skin wettedness and evaporative efficiency of sweating. *Journal of Applied Physiology* 46:522-528.
- Candas V, Libert JP, Vogt JJ (1979b) Influence of air velocity and heat acclimation on human skin wettedness and sweating efficiency. *Journal of Applied Physiology* 47:1194-1200.
- Candas V, Libert JP, Vogt JJ (1983) Sweating and sweat decline of resting men in hot humid environments. *Eur. J. Appl. Physiol* 50:223-234.
- DIN EN ISO 7933 (2004) Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der Wärmebelastung durch Berechnung der vorhergesagten Wärmebeanspruchung. Berlin: Beuth Verlag.
- Kampmann B (2000) Zur Physiologie der Arbeit in warmem Klima. Ergebnisse aus Laboruntersuchungen und aus Feldstudien im Steinkohlenbergbau. Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal, Habilitation Thesis. Abgerufen am 16. Dezember, 2021. <http://elpub.bib.uni-wuppertal.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-735/h140001.pdf>.
- Kampmann B, Bröde P (2014) Physiologische Kosten von Hitzebelastung – Abschätzung eines „effektiven Q10“-Effekts für Arbeit unter Klimabelastung. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Ed) 60. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. TU und Hochschule München: GfA-Press, 501-503.
- Kampmann B, Bröde P (2021) Reichen einstündige Messungen zur Beurteilung physiologischer Hitzebeanspruchung aus? In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Ed) 67. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft–Arbeit HUMAINE gestalten Ruhr-Universität Bochum: GfA-Press, Beitrag A.1.12:11-16.
- Kuwabara K, Hamada Y, Kubota H (2021) Analysis of sweating efficiency and its effects on the heat strain alleviation of clothed subjects. *Physiological Reports* 9:e14694.
- Lei T-H, Fujiwara M, Gerrett N, Amano T, Mündel T, Inoue Y, Okushima D, Nishiyasu T, Kondo N (2021) The effect of seasonal acclimatization on whole body heat loss response during exercise in a hot humid environment with different air velocity. *Journal of Applied Physiology* 131:520-531.
- Malchaire J, Piette A, Kampmann B, Mehnert P, Gebhardt H, Havenith G, den Hartog EA, Holmér I, Parsons K, Alfano G, Griefahn B (2001) Development and validation of the predicted heat strain model. *Ann Occup Hyg* 45:123-135.
- Muggeo VM (2008) segmented: an R Package to Fit Regression Models with Broken-Line Relationships. *R news* 8:20-25.
- Wilke CO, Pedersen TL (2021) isoband: Generate Isolines and Isobands from Regularly Spaced Elevation Grids. R package version 0.2.5. Accessed Dec 14, 2021. <https://CRAN.R-project.org/package=isoband>.
- Wood SN (2017) Generalized Additive Models: An Introduction with R. Boca Raton, Florida: Chapman & Hall/CRC.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Technologie und Bildung in hybriden Arbeitswelten

68. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und
Fabrikautomatisierung IFF, Magdeburg

02. – 04. März 2022

GfA-Press

Bericht zum 68. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 02. – 04. März 2022

**Otto-von Guericke-Universität Magdeburg;
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Sankt Augustin: GfA-Press, 2022
ISBN 978-3-936804-31-7

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

© 2022 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de