

Vergleich physiologischer mit biophysikalischen Prädiktoren zur Vorhersage der Schweißproduktion bei Arbeit in Hitze

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: Gehäuft auftretende Dehydratation infolge der mit dem Klimawandel zunehmenden Hitzebelastung am Arbeitsplatz erhöht das Risiko für Nierenerkrankungen. Hierdurch gewinnt die möglichst akkurate Vorhersage des Flüssigkeitsverlusts durch Schwitzen an Bedeutung. Der hier dargestellte Vergleich der durch unterschiedliche Modelle vorhergesagten Schweißrate mit den in 223 dreistündigen Hitzeexpositionen in der Klimakammer gemessenen Werten belegt, dass ein auf Wasserdampfdruck sowie Luft- und Hauttemperatur beruhender biophysikalischer Ansatz genauere Vorhersagen lieferte als ein Modell, das neben der Haut auch die nur aufwendig zu messende Rektaltemperatur als Marker der physiologischen Hitzebeanspruchung verwendet. Dies stellt nicht nur eine mögliche Erleichterung für die Durchführung einschlägiger Felduntersuchungen dar, sondern bietet auch Perspektiven für ein Monitoring des Flüssigkeitsverlusts durch eine entsprechende, z. B. in „smarte“ Bekleidung integrierte, Sensorik.

Schlüsselwörter: Klima, Hitze, Schwitzen, Model, Dehydratation, Nierenerkrankung

1. Einleitung

Der sich abzeichnende Klimawandel lässt einen Anstieg von Arbeit unter Hitzebelastungen, insbesondere bei Tätigkeiten im Freien, erwarten, die mit gesundheitlichen Gefährdungen einhergehen. So wird bereits heute für die besonders stark betroffenen Regionen in Äquatornähe eine Zunahme entsprechender Erkrankungen beobachtet, z. B. eine erhöhte Harnsteinbildung (Urolithiasis) durch häufiger auftretende Dehydratation infolge einer erhöhten Schweißproduktion bei Hitzebelastung, die nicht durch ausreichende Trinkmengen wieder ausgeglichen wird (Fisang et al. 2015; López & Hoppe 2010). Die Bildung von Harnsteinen in den sogenannten „stone belts“ wird weiter zunehmen und diese Gebiete werden sich ausweiten (Brikowski et al. 2008; Kaufman et al. 2022).

Um die notwendigen Trinkmengen während der Arbeit abschätzen zu können, gewinnen Modelle der Schweißproduktion unter Hitzebelastung an Bedeutung, wobei zur Vorhersage unterschiedliche Ansätze verwendet werden. Während traditionell die Schweißrate in Abhängigkeit der Zunahme von Kern- und Hauttemperatur, teilweise abhängig vom Überschreiten von Schwellenwerten, vorhergesagt wurde (Nadel et al.

1971; Nadel 1979), wurden zuletzt Ansätze mit biophysikalischen Prädiktoren favorisiert, welche die für eine ausgeglichene Wärmebilanz erforderlichen Wärmetransportvorgänge in Abhängigkeit von den Klima- und Arbeitsbedingungen abzubilden versuchen (Cheuvront et al. 2007; Gonzalez et al. 2009; Ravanelli et al. 2020; Shapiro et al. 1982).

Ziel dieses Beitrags ist der Vergleich dieser Modellansätze anhand von Schweißraten und entsprechenden Prädiktoren, die unter kontrollierten Bedingungen in Klimakammer-Experimenten erhoben wurden.

2. Methoden

Die Auswertungen basieren auf der bereits früher beschriebenen Datenbank mit Messwerten aus mehrstündigen Expositionen gegenüber Hitzebelastungen (Kampmann 2000; Kampmann & Bröde 2022a, b).

Wir haben für einen Vergleich unterschiedlicher Modelle zur Vorhersage der Schweißproduktion einen Datenbestand von insgesamt 223 dreistündigen Klimaexpositionen (Kampmann 2000) mit 14 jungen, mit Shorts bekleideten und akklimatisierten männlichen Probanden verwendet. Das Probanden-Kollektiv wies folgende Merkmale auf (Mittelwert \pm Standardabweichung): Alter 20.8 ± 1.1 Jahre, Körperhöhe 1.83 ± 0.04 m, Körpergewicht 71.3 ± 7.3 kg, Körperoberfläche 1.92 ± 0.10 m², und 48.5 ± 8.8 mL/min/kg maximale Sauerstoffaufnahme. Die Versuche erfolgten unter Klimabedingungen, die den Erträglichkeitsbereich von Lufttemperatur (T_a ; 25 – 55 °C) und -feuchte (p_a ; 0,4 – 5 kPa) bei vorgegebener Arbeitsschwere (Gehen in der Ebene, 4 km/h) und Luftgeschwindigkeit (0,3 m/s) abdeckten. Für die Auswertung wurden jeweils die Mittelwerte der dritten Expositionsstunde verwendet.

Zur Analyse wurden die Messwerte für die Schweißrate (SR) durch Anpassung mehrdimensionaler Splines mittels generalisierter additiver Modelle (Wood 2017) zum einen durch die physiologischen Reaktionen von Rektaltemperatur (T_{re}) und mittleren Hauttemperatur (T_{sk}), sowie zum Vergleich durch Differenzen von ($T_{sk}-T_a$) und die Luftfeuchte (Wasserdampfdruck p_a) beschrieben, welche die konvektive bzw. evaporative Wärmeabgabe in einem biophysikalischen Modellansatz bestimmen.

Die Güte der Vorhersagen wurde durch den erklärte Varianzanteil (R^2), den mittleren Vorhersagefehler (Bias) sowie den typischen Fehler (RMSE „root mean-squared error“) bewertet und mit denen des etablierten Shapiro-Modells verglichen, das die Schweißproduktion mit Hilfe der aus der Wärmebilanzgleichung abgeleiteten erforderlichen Schweißverdunstung (E_{req}) und der von den Bekleidungseigenschaften und den Umgebungsbedingungen abhängigen maximal möglichen Schweißverdunstung (E_{max}) berechnet (Shapiro et al. 1982; Cheuvront et al. 2007; Gonzalez et al. 2009).

3. Ergebnisse

Während Abbildung 1 die vorhergesagten Schweißraten (SR_{pred}) in Abhängigkeit von den physiologischen (T_{re} , T_{sk}) bzw. biophysikalischen Prädiktoren (p_a , $T_{sk}-T_a$) darstellt, vergleicht Abbildung 2 vorhergesagte und beobachtete Schweißraten (SR_{obs}) für beide Modelle, sowie zusätzlich für den Ansatz nach Shapiro et al. (1982).

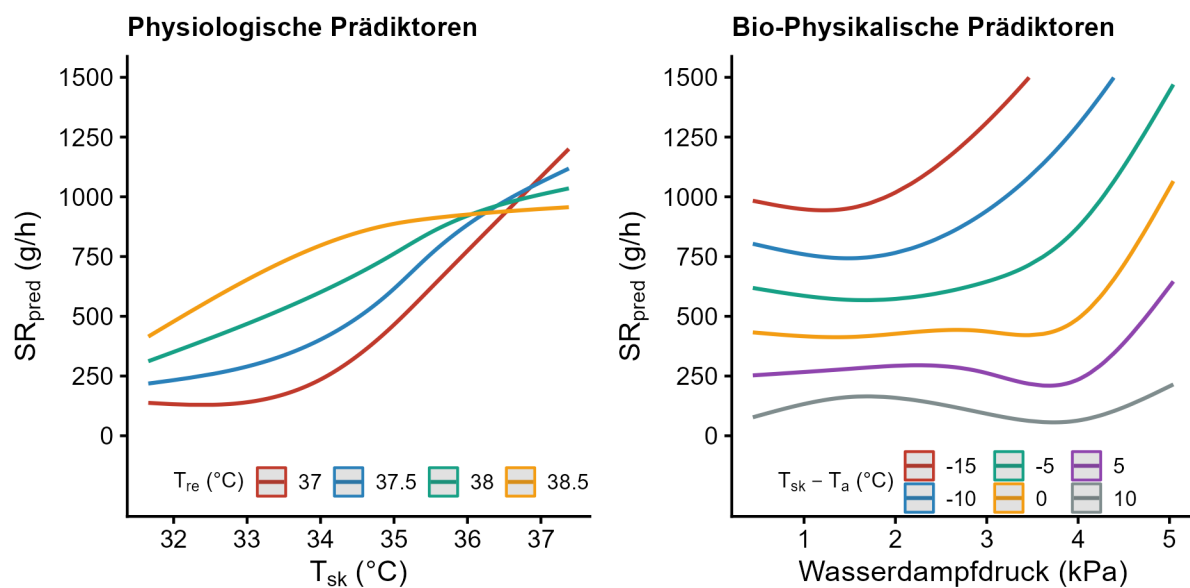


Abbildung 1: Vorhergesagte Schweißraten (SR_{pred}), links in Abhängigkeit von den physiologischen Prädiktoren Haut- (T_{sk}) und Rektaltemperatur (T_{re}) bzw. rechts abhängig von Wasserdampfdruck der Umgebung und dem Gradienten zwischen Haut- und Umgebungstemperatur ($T_{sk} - T_a$).

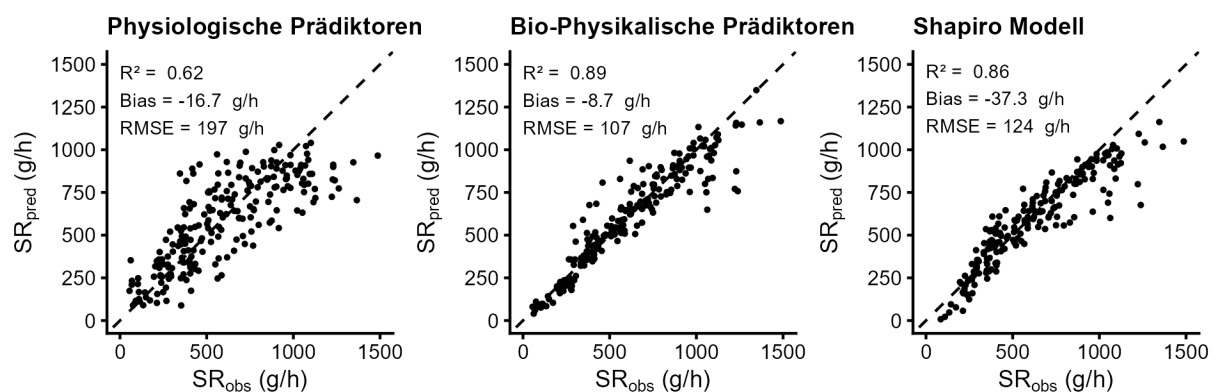


Abbildung 2: Streudiagramm der beobachteten Schweißraten (SR_{obs}) und der durch physiologische Prädiktoren (links), biophysikalische Prädiktoren (Mitte) und dem Shapiro-Modell (rechts) vorhergesagten Werte (SR_{pred}). Als Kennzahlen für die Anpassungsgüte der Modelle angegeben sind, die durch das Modell erklärte Varianz (R^2), der mittlere Vorhersagefehler (Bias) und der typische Fehler (RMSE, „root mean-squared error“).

Das Modell mit den physiologischen Prädiktoren T_{re} und T_{sk} zeigte eine mittlere Anpassungsgüte mit 62 % erklärter Varianz und einem typischen Vorhersagefehler (root-mean squared error RMSE) für die SR von RMSE=197 g/h, wobei sich aber nur, wie in Abbildung 1 dargestellt, bei nicht-erhöhter T_{re} (37 °C) für T_{sk} ein Schwellenwert von etwa 34 °C für das Einsetzen der Schweißproduktion ablesen ließ. In anderen Konfigurationen von T_{re} und T_{sk} zeigte sich eine mit zunehmender physiologischer Beanspruchung ansteigende SR.

Dagegen zeigte das Modell mit biophysikalischen Prädiktoren eine sehr gute Anpassung mit fast 90 % erklärter Varianz und einem deutlich verringerten Vorhersagefehler RMSE=107 g/h (Abbildung 2), welcher die in ähnlichen Studien verwendete Akzeptanzgrenze von 125 g/h einhielt (Cheuvront et al. 2007; Gonzalez et al.

2009). Dabei stieg SR mit abnehmendem Gradienten von Haut- zu Umgebungstemperatur ($T_{sk}-T_a$) sowie zunehmender Luftfeuchte an. Dieser Anstieg erhöhte sich bei hohem Wasserdampfdruck >4 kPa für niedrige Werte des Gradienten ($T_{sk}-T_a$), allerdings nicht für Bedingungen, in denen ein hoher Wert des Gradienten ($T_{sk}-T_a$) >10 °C eine hinreichende konvektive Wärmeabgabe gewährleistete (Abbildung 1).

4. Diskussion und Schlussfolgerung

Unsere Befunde decken sich mit neueren Erkenntnissen, nach denen die zur Aufrechterhaltung der Wärmebilanz erforderliche Schweißverdunstung (E_{req}) die Schweißproduktion unter Gleichgewichtsbedingungen, und damit die notwendige Flüssigkeitsaufnahme zur Vermeidung einer Dehydratation besser vorhersagt als Kern- und/oder Hauttemperaturen (Ravanelli et al. 2020). Die Überprüfung der vorliegenden Ergebnisse in weiteren Studien, z. B. unter Einwirkung erhöhter Luftgeschwindigkeit sowie für nicht-akklimatisierte oder bekleidete Probanden, auch mit höherer Arbeitsschwere, ist geplant und mit dem vorliegenden Datenbestand auch möglich.

Die Abschätzung von Schweißraten bei Arbeit unter Klimabelastung ohne die Verwendung (d.h. auch ohne die aufwendige Messung) der Rektaltemperatur stellt eine erhebliche Erleichterung für die Durchführung sowohl von Labor- als auch insbesondere von Felduntersuchungen dar. Dabei kann die schon heute in Prototypen realisierte Integration von Sensorik (Buller et al. 2018), z. B. zur Messung der Hautoberflächentemperatur, in die Bekleidung ('Smart Clothing') von Nutzen sein.

5. Literatur

- Brikowski TH, Lotan Y, Pearle MS (2008) Climate-related increase in the prevalence of urolithiasis in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105: 9841–9846.
- Buller MJ, Welles AP, Friedl KE (2018) Wearable physiological monitoring for human thermal-work strain optimization. *Journal of Applied Physiology* 124: 432–441.
- Cheuvront S, Montain S, Goodman D, Blanchard L, Sawka M (2007) Evaluation of the limits to accurate sweat loss prediction during prolonged exercise. *European Journal of Applied Physiology* 101: 215–224.
- Fisang C, Anding R, Müller SC, Latz S, Laube N (2015) Urolithiasis – interdisziplinäre Herausforderung in Diagnostik, Therapie und Metaphylaxe. *Dtsch Arztebl Int* 112: 83–91.
- Gonzalez RR, Cheuvront SN, Montain SJ, Goodman DA, Blanchard LA, Berglund LG, Sawka MN (2009) Expanded prediction equations of human sweat loss and water needs. *Journal of Applied Physiology* 107: 379–388.
- Kampmann B (2000) Zur Physiologie der Arbeit in warmem Klima. Ergebnisse aus Laboruntersuchungen und aus Feldstudien im Steinkohlenbergbau. Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal, Habilitation Thesis, Accessed 01/01/2023, <https://d-nb.info/973136863/34>.
- Kampmann B, Bröde P (2022a) Der Wirkungsgrad der Schweißverdunstung im feucht-heißen Klima – Ergebnisse einer indirekten Bestimmung mithilfe einer umfangreichen Datenbank. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Ed) 68. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft–Technologie und Bildung in hybriden Arbeitswelten. Magdeburg: GfA-Press, Beitrag A.6.2: 1–6.
- Kampmann B, Bröde P (2022b) Do one-hour exposures provide a valid assessment of physiological heat strain? *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 76: 105–117.
- Kaufman J, Vicedo-Cabrera AM, Tam V, Song L, Coffel E, Tasian G (2022) The impact of heat on kidney stone presentations in South Carolina under two climate change scenarios. *Scientific Reports* 12: 369.

- López M, Hoppe B (2010) History, epidemiology and regional diversities of urolithiasis. *Pediatric Nephrology* 25: 49–59.
- Nadel ER, Mitchell JW, Saltin B, Stolwijk JA (1971) Peripheral modifications to the central drive for sweating. *Journal of Applied Physiology* 31: 828–833.
- Nadel ER (1979) Control of sweating rate while exercising in the heat. *Medicine and Science in Sports* 11: 31–35.
- Ravanelli N, Imbeault P, Jay O (2020) Steady-state sweating during exercise is determined by the evaporative requirement for heat balance independently of absolute core and skin temperatures. *The Journal of Physiology* doi: 10.1113/jp279447.
- Shapiro Y, Pandolf K, Goldman R (1982) Predicting sweat loss response to exercise, environment and clothing. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 48: 83–96.
- Wood SN (2017) *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. Boca Raton, Florida: Chapman & Hall/CRC.



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