

Modellierung des thermischen Komforts bei der Fahrradhelm-Nutzung

Peter BRÖDE¹, COST TU1101 WG4²

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

² *HOPE–Helmet OPTimization in Europe (<http://www.bicycle-helmets.eu>),
COST Action TU1101 – Working Group 4 unter Mitarbeit von J.M. Aerts, H. Aljaste,
S. Annaheim, C.P. Bogerd, G. De Bruyne, D. Fiala, A.D. Flouris, S.S. Heidmets,
A. Hursa Šajatović, K. Kuklane, N. Martínez, T.S. Mayor, R.M. Rossi*

Kurzfassung: Simulationswerkzeuge zu lokalen Aspekten thermischen Unbehagens sind essentielle Komponenten virtueller Verfahren zur ergonomischen Beurteilung persönlicher Schutzausrüstungen. Wir stellen ein für Fahrradhelme entwickeltes Beurteilungsverfahren vor, das (i) die lokale Schweißrate (LSR) am Kopf in Abhängigkeit vom Klima, der Arbeitsschwere, der Bekleidung sowie der Expositionsdauer vorhersagt, (ii) den Verdunstungswiderstand (Ret) des Helms in Abhängigkeit von der relativen Luftgeschwindigkeit modelliert, und (iii) mit dem aus der LSR in Relation zu Ret berechneten Hautbenetzungsgrad als Kriterium das Komfortempfinden bewertet. Ungeachtet eines Bedarfs an weiteren Validierungsstudien zeigt das Verfahren Anwendungspotential auch bzgl. anderer Arten von Schutzausrüstung und -kleidung.

Schlüsselwörter: Thermischer Komfort, Persönliche Schutzausrüstung, Helm, Modell

1. Einleitung und Fragestellung

Der behinderte Wärme- und Feuchtetransport bei der Nutzung von Schutzkleidung führt zur Ansammlung von Schweiß und nachfolgend zu thermischem Unbehagen in der betroffenen Körperregion, zum Beispiel beim Tragen von Kopfbedeckungen (Bogerd et al. 2015). Entsprechende Simulationsverfahren gewinnen bei der ergonomischen Beurteilung persönlicher Schutzausrüstung an Bedeutung.

Da thermische Beeinträchtigungen durch Fahrradhelme zu einer geringeren Akzeptanz und Nutzerrate beitragen können (Bröde et al. 2013), verfolgte im Rahmen der EU COST Aktion TU1101 die Working Group 4 „Ergonomics of thermal effects“ das Ziel, die thermischen Helmeigenschaften durch einen integrierten Ansatz mit Probandenversuchen, mit biophysikalischen Messungen an Teilkörper-Dummies sowie mit Computer-Modellen zu optimieren (Annaheim et al. 2015).

Wir stellen hier ein Beurteilungsverfahren vor, das (i) die lokale Schweißrate (LSR) am Kopf in Abhängigkeit vom Klima, der Arbeitsschwere, der Bekleidung sowie der Expositionsdauer vorhersagt, (ii) die Abhängigkeit des Verdunstungswiderstands (Ret) des Helms von der relativen Luftgeschwindigkeit (v_a) modelliert, und (iii) mit dem aus der LSR in Relation zu Ret berechneten Hautbenetzungsgrad (w_{crit}) als Komfortkriterium das Komfortempfinden bewertet.

2. Modell-Komponenten und Bewertungsverfahren

2.1 Vorhersage der Schweißrate im Kopfbereich

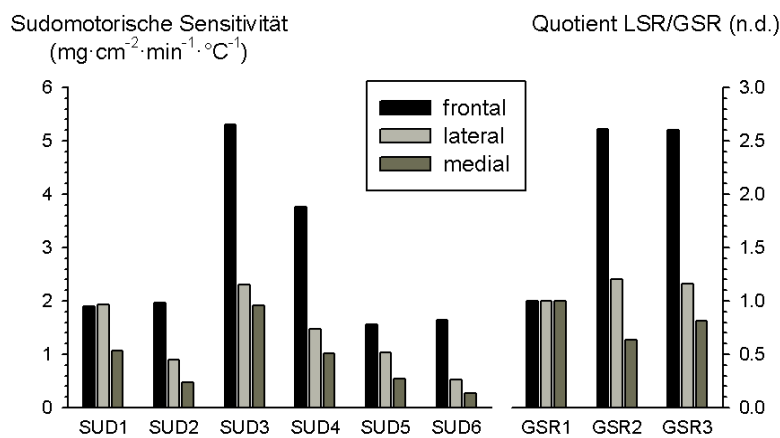


Abbildung 1: Modelle der lokalen Schweißrate (LSR) als sudomotorische Sensitivität (SUD) bzw. Quotient zur Gesamt-Schweißrate (GSR) für den frontalen, lateralen und medialen Kopfbereich.

Aus Literaturangaben (Bogerd et al. 2015) wurden sechs Modelle, die auf der sudomotorischen Sensitivität, d.h. der LSR-Änderung pro Grad Anstieg der Kerntemperatur, beruhen (Bröde & COST Action TU1101 WG4 2014), sowie drei weitere als Quotient der lokalen zur Gesamt-Schweißrate (LSR/GSR) identifiziert (Bröde et al. 2015). Abbildung 1 zeigt eine erhebliche Variabilität zwischen den Modellen, mit zumeist größerer Schwitzsensitivität im frontalen Kopfbereich (Stirn) verglichen mit lateralen und medialen Arealen.

Zum Vergleich mit Labordaten (De Bruyne et al. 2008) von Männern und Frauen, deren LSR wiederholt unter verschiedenen Arbeitsschweren auf dem Fahrrad-Ergometer gemessen worden war, wurden die lokalen Modelle mit unterschiedlich komplexen thermoregulatorischen Simulationsmodellen (ISO 7933 2004; Fiala et al. 2012; Fiala & Havenith 2015) verknüpft und für metabolische Effizienzwerte von 17-23% (Ettema & Loras 2009) lokale Schweißraten vorhergesagt. Eine Varianzkomponenten-Zerlegung des Prognosefehlers zeigte einen erheblichen Einfluss der lokalen Modelle auf den Vorhersagefehler, der in etwa gleich der kombinierten intra- und interindividuellen Fehlerkomponente war, während das Geschlecht und die Arbeitsschwere nur geringe Auswirkungen hatten (Abbildung 2).

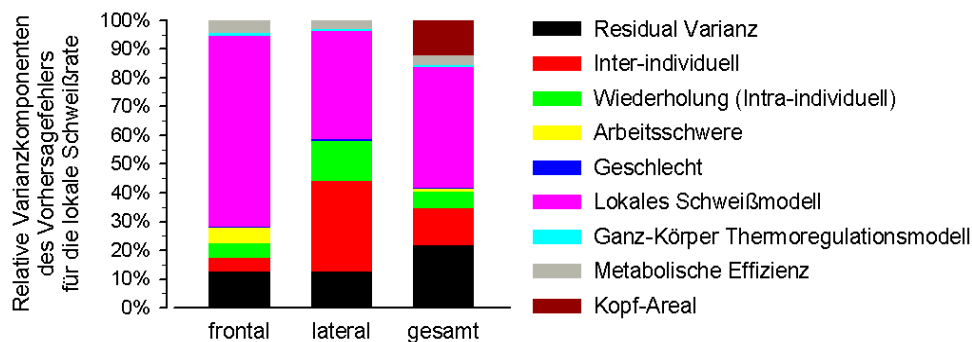


Abbildung 2: Prozentuale Darstellung der Varianzkomponenten-Zerlegung des Vorhersagefehlers für die lokale Schweißrate im frontalen und lateralen Kopfbereich.

2.2 Komfort-Grenzwert des Hautbenutzungsgrads - w_{crit}

Komfortgrenzen w_{crit} verschiedener Körperregionen (Fukazawa & Havenith 2009) korrelierten hoch ($R^2 > 0.8$) mit der lokalen Schwitzsensitivität (Abbildung 3). Als Grenze für den Kopf ergab sich $w_{crit} = 0.37$, ähnlich der für den ganzen Körper (0.36).

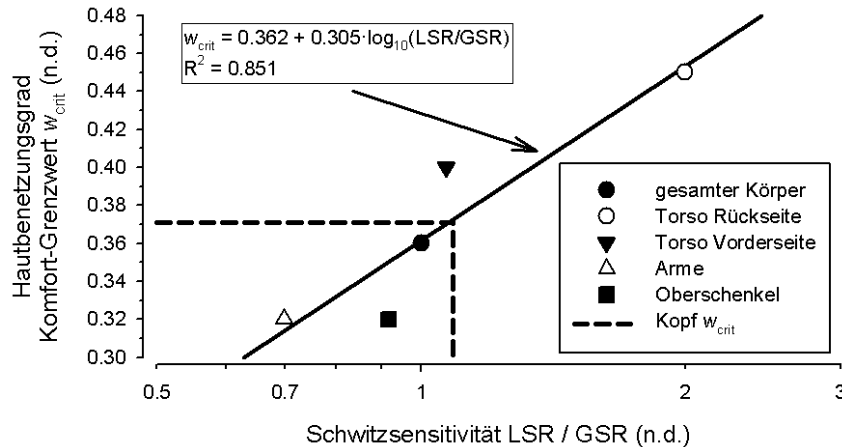


Abbildung 3: Regression publizierter (Fukazawa & Havenith 2009) Komfort-Grenzwerte für den Hautbenutzungsgrad verschiedener Körperareale in Relation zur Schwitzsensitivität (Smith & Havenith 2011) zur Ableitung eines w_{crit} für den Kopfbereich.

2.3 Abhängigkeit des Helm-Verdunstungswiderstands von der Luftgeschwindigkeit

Der Literatur entnommene R_{et} -Werte von Kopfbedeckungen unterschiedlicher Anwendungsbereiche (Sport, Industrie, Militär) waren mit zunehmender v_a erheblich reduziert, bei 6 m/s auf weniger als 15% des Wertes bei Windstille (4.6 vs. 39 m^2Pa/W). Die Abhängigkeit des Verdunstungswiderstands von v_a wurde durch eine log-log-lineare Regression gut beschrieben (Abbildung 4).

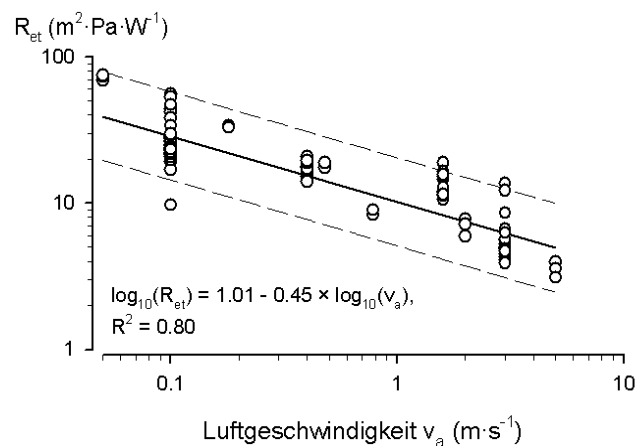


Abbildung 4: Regression mit punktwissem 95%-Konfidenzintervall des Verdunstungswiderstands (R_{et}) verschiedener Kopfbedeckungen in Relation zur Luftgeschwindigkeit.

2.4 Bewertung des lokalen thermischen Komforts

Im Zusammenspiel der o.g. Komponenten erfolgt die Bewertung des lokalen thermischen Komforts in den folgenden fünf Schritten:

1. Simulation der thermoregulatorischen Reaktionen (Kerntemperaturanstieg ΔT_{re} , Gesamt-Schweißrate GSR) in Abhängigkeit vom Klima, der Arbeitsschwere, der Bekleidung sowie der Expositionsdauer.
2. Vorhersage frontaler, lateraler und medialer LSR mittels SUD aus ΔT_{re} bzw. LSR/GSR aus GSR (Abbildung 1).
3. Berechnung der LSR am Kopf aus frontaler, lateraler und medialer LSR mit der Oberfläche entsprechender 1:2:4 -Gewichtung (Annaheim et al. 2015).
4. Berechnung des Hautbenetzungsgrads für den Kopfbereich in Abhängigkeit von LSR, Verdampfungswiderstand des Helms (Ret) sowie von Lufttemperatur, Luftfeuchte und Hauttemperatur (Parsons 2014).
5. Vergleich des Hautbenetzungsgrads zum Grenzwert (w_{crit}) in Relation zu Ret unter Berücksichtigung der Luftgeschwindigkeit (Abbildung 4).

3. Anwendung auf Pendler-Szenario

Die Simulation eines typischen Pendler-Szenarios mit 30 min Radfahren bei 20 °C Lufttemperatur mit einer Geschwindigkeit (= relative Luftgeschwindigkeit) von 6 m/s (de Geus et al. 2007) sowie für reduzierte Luftgeschwindigkeiten $v_a = 0.3$ bzw. 1.6 m/s erfolgte mit dem UTCI-Fiala Modell (Fiala et al. 2012). Während die größere konvektive Abkühlung bei höherer v_a zu einer reduzierten prognostizierten Gesamt-Schweißrate (GSR) führte (Abbildung 5), betrug der Kerntemperaturanstieg (ΔT_{re}) bei allen Bedingungen etwa 0.9 °C.

Dementsprechend unterschied sich der aus SUD errechnete Hautbenetzungsgrad kaum für die verschiedenen v_a (Abbildung 5, rechts), während das GSR Modell zwischen den Bedingungen differenzierte. Es ergab sich hier für das Pendler-Szenario ($v_a = 6$ m/s) ein Überschreiten der Komfortgrenze für Ret oberhalb von 12.5 m²Pa/W, was thermischen Komfort auch beim Tragen eines Helmes durch den bei Wind reduzierten Verdunstungswiderstand erwarten lässt.

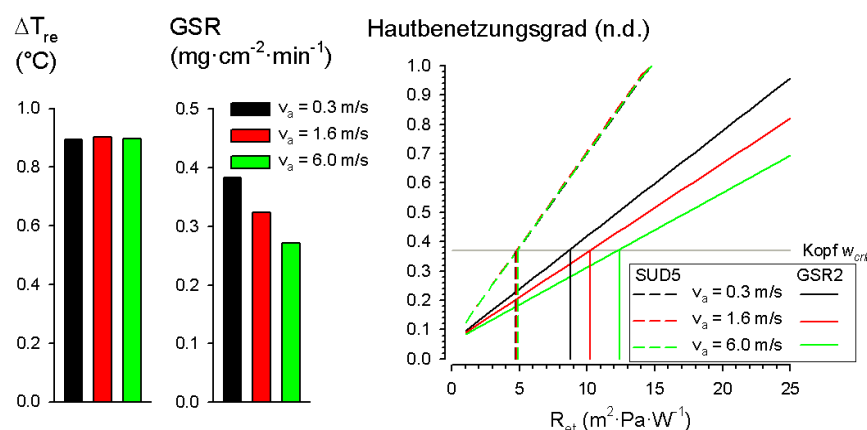


Abbildung 5: Mit dem UTCI-Fiala Modell simulierte Kerntemperaturanstiege (ΔT_{re} , links) und Ganzkörper-Schweißraten (GSR, mitte) für ein Rad-Pendler-Szenario mit unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten (v_a). Rechts der Hautbenetzungsgrad in Relation zum Verdunstungswiderstand (Ret) und der Komfort-Grenze w_{crit} für zwei Modelle der lokalen Schweißrate aus Abbildung 1 als Vertreter der sudomotorischen Sensitivität (SUD5, Taylor & Machado-Moreira 2013) bzw. des Quotienten zur Gesamt-Schweißrate (GSR2, Smith & Havenith 2011).

4. Diskussion und Ausblick

Die vorgestellte Verknüpfung lokaler Modelle der Schweißproduktion mit Modellen der Thermoregulation des gesamten Körpers in Verbindung mit dem Hautbenetzungsgrad als Komfortkriterium und der Modellierung der durch Wind bedingten Reduzierung des Verdunstungswiderstands bietet ein generisches Vorgehen zur Beurteilung thermischer Aspekte bei der Nutzung von Fahrradhelmen in Abhängigkeit von den Klimabedingungen, der Arbeitsschwere, der Bekleidung und der Expositionsdauer.

Die notwendigen Modell-Annahmen und die für den Kopfbereich nur in geringem Umfang vorhandenen Messdaten erfordern jedoch weitere Untersuchungen. Dabei ist das Augenmerk insbesondere auf eine Verbesserung der verwendeten lokalen Modelle, auf detaillierte Messungen der thermischen Eigenschaften von Helmen und ihrer Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit mit biophysikalischen Methoden sowie auf Probandenversuche zur Validierung der Zusammenhänge zwischen lokaler Hautfeuchte und thermischem Komfort zu richten.

Ungeachtet gewisser Einschränkungen und weiteren Forschungsbedarfs besitzt das hier vorgestellte Verfahren zur Beurteilung thermischer Aspekte im Rahmen der Produktergonomie das Potential zur Erweiterung auf andere Schutzausrüstungen, deren Standardisierung im Europäischen Rahmen diskutiert wird (European Commission 2012).

5. Literatur

- Annaheim S, Aerts JM, Bröde P, De Bruyne G, Flouris AD, Hursa Sajatovic A, Kuklane K, Martinez N, Sotto Mayor T, Bogerd CP (2015) Final report of Working Group 4: Ergonomics of thermal effects. Brussels, Belgium: COST Action TU1101 / HOPE, <http://publications.tno.nl/publication/34618505/rNiSjW> Accessed 2015-10-5.
- Bogerd CP, Aerts JM, Annaheim S, Bröde P, De Bruyne G, Flouris AD, Kuklane K, Sotto Mayor T, Rossi RM (2015) A review on ergonomics of headgear: Thermal effects. *International Journal of Industrial Ergonomics* 45: 1-12.
- Bröde P, Aerts JM, Annaheim S, De Bruyne G, Flouris AD, Kuklane K, Mayor TS, Otte D, Rossi RM, Bogerd CP (2013) Ergonomische Aspekte bei der Nutzung von Fahrradhelmen - eine Europäische Initiative. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg), Chancen durch Arbeits-, Produkt- und Systemgestaltung, 59. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Dortmund: GfA-Press, 685-688.
- Bröde P, COST Action TU1101 WG4 (2014) Vorhersagemodelle lokaler Schweißproduktion zur Bewertung des thermischen Komforts von Fahrradhelmen. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg), Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft, 60. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Dortmund: GfA-Press, 395-397.
- Bröde P, De Bruyne G, Aerts JM, Mayor TS, Fiala D (2015) Head sweat rate prediction for thermal comfort assessment of bicycle helmets. *Extreme Physiology & Medicine* 4(Suppl 1): A85.
- De Bruyne G, Aerts JM, Van der Perre G, Goffin J, Verpoest I, Berckmans D (2008) Spatial differences in sensible and latent heat losses under a bicycle helmet. *European Journal of Applied Physiology* 104(4): 719-726.
- de Geus B, De Smet S, Nijs J, Meeusen R (2007) Determining the intensity and energy expenditure during commuter cycling. *British Journal of Sports Medicine* 41(1): 8-12.
- Ettema G, Loras HW (2009) Efficiency in cycling: a review. *European Journal of Applied Physiology* 106(1): 1-14.
- European Commission (2012) Standardization mandate in the field of protective textiles and personal protective clothing and equipment. Brussels: European Commission, Directorate-General Enterprise and Industry, M/509 EN, ftp://ftp.cencenelec.eu/CENELEC/EuropeanMandates/M_509.pdf Accessed 2015-11-10.

- Fiala D, Havenith G (2015) Modelling Human Heat Transfer and Temperature Regulation. In: Gefan A, Epstein Y (Ed), *Mechanobiology and Mechanophysiology of Military-Related Injuries* Springer Berlin Heidelberg. 1-38.
- Fiala D, Havenith G, Bröde P, Kampmann B, Jendritzky G (2012) UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology* 56(3): 429-441.
- Fukazawa T, Havenith G (2009) Differences in comfort perception in relation to local and whole body skin wettedness. *European Journal of Applied Physiology* 106(1): 15-24.
- ISO 7933 (2004) *Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain*. Geneva: International Organisation for Standardisation.
- Parsons KC (2014) *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate and Cold Environments on Human Health, Comfort and Performance*. London: CRC Press.
- Smith CJ, Havenith G (2011) Body mapping of sweating patterns in male athletes in mild exercise-induced hyperthermia. *European Journal of Applied Physiology* 111(7): 1391-1404.
- Taylor NAS, Machado-Moreira CA (2013) Regional variations in transepidermal water loss, eccrine sweat gland density, sweat secretion rates and electrolyte composition in resting and exercising humans. *Extreme Physiology & Medicine* 2(1): 4.

Danksagung: Die Autoren bedanken sich bei allen Mitgliedern der COST Aktion TU1101 „Towards safer bicycling through optimization of bicycle helmets and usage“ für die exzellente Kooperation. Die Aktion wurde gefördert von COST. COST wird unterstützt durch das EU-Forschungsrahmenprogramm Horizont 2020.