

Individuelle Determinanten physiologischer Kosten der Wärmeregulation bei Hitzebelastung

Peter BRÖDE¹, Bernhard KAMPMANN²

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

² *Bergische Universität Wuppertal, Fachbereich D Sicherheitstechnik
Fachgebiet Arbeitswissenschaft
Gaußstraße 20, D-42097 Wuppertal*

Kurzfassung: Bei Hitzebelastung können der Anstieg der Körpertemperatur und die Mechanismen zu ihrer Regulierung – die vermehrte periphere Durchblutung sowie der Anstieg der Schweißproduktion – den Energieumsatz steigern. Zur Untersuchung des Einflusses individueller Merkmale auf diesen Effekt bestimmten wir Q10-Faktoren für die Auswirkung der Rektaltemperatur (T_{re}) auf die Sauerstoffaufnahme (VO_2) aus 36 Versuchsserien von 18 Probanden mit insgesamt 567 Klimaexpositionen mit linearen Regressionsmodellen. Im Mittel war $Q_{10}=2$, variierte jedoch zwischen 0,5 und 11, wobei Personen mit höherem VO_2 -Ausgangswert niedrigere Q_{10} -Werte aufwiesen. Signifikante positive partielle Rangkorrelationen zwischen Q_{10} und maximaler Sauerstoffaufnahme sowie negative Korrelationen zwischen VO_2 -Ausgangswerten und dem Oberflächen-Masse-Verhältnis deuten auf die Q_{10} -Varianz als Ausdruck individuell unterschiedlicher Kapazitäten in der Wärmeregulation, wobei bei gleicher Masse größere Personen von niedrigeren VO_2 -Ausgangswerten sowie leistungsfähigere Individuen von einer reaktiveren Regulation profitieren.

Schlüsselwörter: Hitzearbeit, Energieumsatz, Modell, Klima

1. Einleitung und Fragestellung

Bei erhöhter Temperatur laufen chemische Reaktionen schneller ab, sodass bei Hitzebelastung der Anstieg der Körpertemperatur und die Mechanismen zu ihrer Regulierung - die vermehrte periphere Durchblutung sowie der Anstieg der Schweißproduktion - den Energieumsatz und damit die Sauerstoffaufnahme (VO_2) steigern. Dieser Effekt wird z.B. im Zusammenhang mit der Beanspruchung von Feuerwehrleuten (Lindberg et al. 2013) oder mit der standardisierten Bewertung von Wärmebeanspruchungen (Havenith et al. 2002), wenn auch zumeist nur qualitativ, diskutiert. Für Arbeit auf dem Fahrrad-Ergometer wurde eine verminderte metabolische Effizienz bei erhöhter Körpertemperatur berichtet, die einem Anstieg des Energieumsatzes um 4% pro Grad Temperaturerhöhung entspricht (Daanen et al. 2006).

Diese Zunahme kann direkt durch den Anstieg des Energieverbrauchs mit der Körpertemperatur oder durch den Q_{10} -Faktor, d.h. als Verhältnis der VO_2 bei einer Temperaturerhöhung um 10 °C im Vergleich zu VO_2 bei 36,8 °C ($VO_2@36,8^{\circ}C$) als Referenz, beschrieben werden (Kampmann & Bröde 2014). Frühere Untersuchungen ergaben bei vorgegebener leichter bis mittelschwerer Körperarbeit einen typischen

Wert von $Q_{10}=2$, der nur unwesentlich von Windgeschwindigkeit, Bekleidungs-isolation und Akklimatisationszustand (Kampmann & Bröde 2016) abhing, jedoch eine erhebliche inter-individuelle Streuung mit Q_{10} -Werten zwischen 1 und 10 aufwies (Kampmann & Bröde 2014).

Die vorliegende Studie untersucht den Einfluss anthropometrischer Parameter (Körpergröße, -masse, -oberfläche) und der körperlichen Leistungsfähigkeit (maximale Sauerstoffaufnahme, VO_{2max}) auf diese Variabilität.

2. Material und Methoden

Zur Auswertung standen aus früheren Studien (Ilmarinen 1978, Kampmann 2000, Wenzel et al. 1989) 36 Versuchsserien von 18 jungen (18-24 Jahre) männlichen Probanden mit insgesamt 567 Klimakammer-Expositionen mit mehrstündiger Laufbandarbeit (Gehen in der Ebene mit 3,5-4 km/h) zur Verfügung. Die Lufttemperatur variierte von 15-55 °C, die Luftfeuchte von 0,3-5,5 kPa, die Luftgeschwindigkeit v_a von 0,3-2,0 m/s, die Bekleidungs-isolation von 0,1-1 clo, und die mittlere Strahlungstemperatur war gleich der Lufttemperatur. Innerhalb einer Versuchsserie variierten jedoch nur Lufttemperatur und -feuchte, alle anderen Parameter blieben unverändert. Die Mittelwerte der in der dritten Expositionsstunde registrierten Rektal-temperaturen (T_{re}) indizierten die Wärmebeanspruchung und VO_2 den Energieumsatz.

Der Einfluss von T_{re} auf VO_2 - bezogen auf eine Referenz-Körperkerntemperatur von 36,8 °C - wurde mittels Regressionsmodellen mit gemischt festen und zufälligen Effekten (Random Coefficient Models, RCM) zur Berücksichtigung der Korrelation abhängiger Beobachtungen für jede Serie nach Gleichung (1) untersucht (Littell et al. 1996).

$$VO_2 = VO_2@36,8^{\circ}C + \beta \cdot (T_{re} - 36,8) \quad (1)$$

In gleicher Weise wurde Q_{10} regressionsanalytisch aus T_{re} und VO_2 mit der logarithmierten Gleichung (2) ermittelt (Kampmann & Bröde 2014).

$$VO_2 = VO_2@36,8^{\circ}C \cdot Q_{10}^{(T_{re}-36,8)/10} \quad (2)$$

Tabelle 1 zeigt einen Überblick der individuellen Merkmale der 18 Probanden, deren Zusammenhang mit Q_{10} mittels Rangkorrelationen analysiert wurde.

Tabelle 1: Mittelwerte (AM) mit Standardabweichungen (SD) und Bereiche individueller Merkmale der 18 männlichen Probanden. (KOF: Körperoberfläche, VO_{2max} : maximale Sauerstoffaufnahme).

Variable	AM	SD	Minimum	Maximum
Alter (J)	20,86	1,26	19,00	24,00
Masse (kg)	70,76	6,86	62,90	85,00
Größe (cm)	182,78	4,72	172,00	188,00
KOF (m ²)	1,91	0,10	1,75	2,09
KOF/Masse (cm ² /kg)	271,57	13,82	245,88	294,12
Body Mass Index (kg/m ²)	21,19	1,95	18,18	24,84
VO_{2max} (L/min)	3,52	0,77	2,28	5,26
VO_{2max} (mL/min/kg)	49,62	9,20	31,70	67,91

3. Ergebnisse

Die VO₂-Werte zeigten eine erhebliche inter-individuelle Streuung und stiegen im überwiegenden Teil der einzelnen Serien mit Tre an, wobei im Mittel der Anstieg bei etwa 7% des VO₂-Referenzwerts bei Tre=36,8 °C (VO₂@36,8°C) lag (Abb. 1).

Entsprechend variierte Q10 zwischen 0,5 und 11,5, der Mittelwert betrug dabei 2,17 (95 % Konfidenz-Intervall: 1,69 – 2,80).

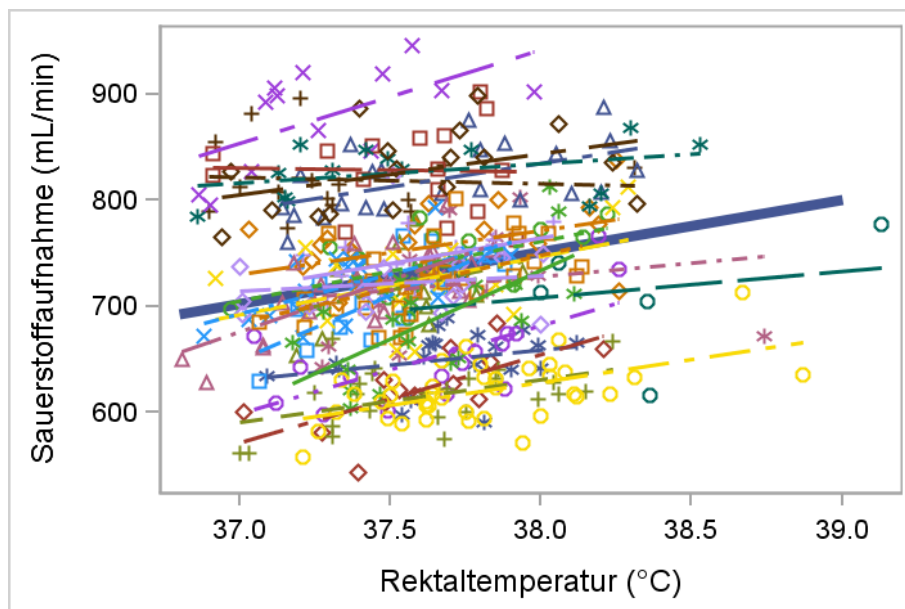


Abbildung 1: Rektaltemperaturen (Tre) und Sauerstoffaufnahme (VO₂) mit individuellen Regressionsgeraden aus 36 Serien mit 567 Einzelversuchen. Die hervorgehobene Linie zeigt die mittlere Gerade nach der Gleichung (1) mit den Parameterschätzern (Standardfehler) 693,2 (16.4) für VO₂@36,8°C bzw. 48,9 (6.0) für den Steigungsparameter β.

Tabelle 2: Rangkorrelationen und partielle Rangkorrelationen individueller Merkmale mit Q10 bzw, mit dem Referenzwert der Sauerstoffaufnahme bei 36,8 °C Rektaltemperatur (VO₂@36,8°C). (KOF: Körperoberfläche; VO₂max: maximale Sauerstoffaufnahme; *: P<0.05; **: P<0.01; ***: P<0.001).

Zielgröße	VO ₂ @36,8°C	Masse	Größe	KOF	KOF/ Masse	VO ₂ max (L/min)	VO ₂ max (mL/min/kg)
Rangkorrelationskoeffizienten							
Q10	-0,62***	-0,12	0,20	-0,03	0,27	0,09	0,16
	Partielle Rangkorrelationskoeffizienten (adjustiert nach VO ₂ @36,8°C und Masse)						
	--	--	0,03	0,09	0,19	0,43*	0,32
Rangkorrelationskoeffizienten							
VO ₂ @36,8°C	--	0,62***	-0,08	0,50**	-0,69***	0,44**	0,12
	Partielle Rangkorrelationskoeffizienten (adjustiert nach Masse)						
	--	--	-0,30	-0,21	-0,39*	0,18	0,08

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Rangkorrelationsanalysen. Q10 korrelierte invers mit dem VO₂-Referenzwert VO₂@36,8°C ($r=-0,62$, $P<0,0001$), der seinerseits mit der Masse anstieg ($r=0,62$, $P<0,0001$). Signifikante partielle, nach Masse und VO₂-Referenz adjustierte Korrelationen ergaben sich zwischen Q10 und VO₂max ($r=0,43$, $P=0,01$). Ebenso zeigte sich eine signifikante negative partielle Korrelation zwischen VO₂-Referenz und dem Oberflächen-Masse-Quotienten ($r=-0,39$, $P=0,02$).

4. Diskussion und Schlussfolgerung

Der mittlere Q10-Wert von etwa 2 sowie die erhebliche interindividuelle Streuung bestätigen frühere Befunde (Kampmann & Bröde 2014, 2016).

Der Anstieg der VO₂-Ausgangswerte (VO₂@36,8°C) mit der Körpermasse belegt den Gewichtseinfluss auf den Energieumsatz bei Laufbandarbeit und wurde beispielsweise bei Arbeit auf dem Fahrradergometer nicht beobachtet (Havenith 2001). Nach Adjustierung bzgl. dieser Einflüsse ergab sich eine positive Korrelation zwischen maximaler Sauerstoffaufnahme und Q10, die sich im Sinne einer größeren Sensitivität des Wärmeregulationssystems bei leistungsfähigeren Personen interpretieren lässt (The Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences 2003).

Die Q10-Varianz erscheint somit als Resultat unterschiedlicher Wärmeregulation, wobei bei gleicher Masse größere Personen von niedrigeren VO₂-Ausgangswerten sowie leistungsfähigere Individuen von einer reaktiveren Regulation profitieren.

Fortschrittliche Modelle der Thermoregulation (Werner & Buse 1988, Fiala et al. 2012) berücksichtigen Q10-Effekte, wobei die hier beschriebenen Befunde einen Beitrag zu ihrer Individualisierung (Xu et al. 2016) leisten können.

5. Literatur

- Daanen HA, van Es EM, de Graaf JL (2006) Heat strain and gross efficiency during endurance exercise after lower, upper, or whole body precooling in the heat. *International Journal of Sports Medicine* 27(5): 379-388.
- 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.
- Havenith G (2001) Human surface to mass ratio and body core temperature in exercise heat stress - a concept revisited. *Journal of Thermal Biology* 26 (4-5):387-393.
- Havenith G, Holmér I, Parsons K (2002) Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production. *Energy and Buildings* 34(6): 581-591.
- Ilmarinen R (1978) Einflüsse verschiedener Bekleidung auf einige physiologische Größen des Menschen bei Körperarbeit in unterschiedlich erhöhter Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit. Deutsche Sporthochschule Köln, PhD Thesis.
- Kampmann B (2000) Zur Physiologie der Arbeit in warmem Klima. Ergebnisse aus Laboruntersuchungen und aus Feldstudien im Steinkohlenbergbau. Bergische Universität Wuppertal, Habilitationsschrift.
- Kampmann B, Bröde P (2014) Physiologische Kosten von Hitzebelastung – Abschätzung eines „effektiven Q10“-Effekts für Arbeit unter Klimabelastung. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg), Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft, 60. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Dortmund: GfA-Press, 501-503.
- Kampmann B, Bröde, P (2016) Physiologische Kosten von Hitzebelastung: Zunahme des Energieumsatzes mit steigender Körpertemperatur. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg), Arbeit in komplexen Systemen - Digital, vernetzt, human?!. 62. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, Dortmund: GfA-Press, Beitrag B.2.3 (6 S.).

- Lindberg AS, Oksa J, Gavhed DCE, Malm C (2013) Field Tests for Evaluating the Aerobic Work Capacity of Firefighters. PLoS ONE 8(7): e68047.
- Littell RC, Milliken GA, Stroup WW, Wolfinger RD (1996) SAS® System for Mixed Models. Cary, NC: SAS® Institute Inc.
- The Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences (2003) Glossary of terms for thermal physiology. Journal of Thermal Biology 28(1): 75-106.
- Werner J, Buse M (1988) Temperature profiles with respect to inhomogeneity and geometry of the human body. Journal of Applied Physiology 65(3): 1110-1118.
- Wenzel HG, Mehnert C, Schwarzenau P (1989) Evaluation of tolerance limits for humans under heat stress and the problems involved. Scandinavian Journal of Work, Environment & Health (1):7-14
- Xu X, Rioux TP, MacLeod T, Patel T, Rome MN, Potter AW (2016) Measured body composition and geometrical data of four “virtual family” members for thermoregulatory modeling. International Journal of Biometeorology. doi:10.1007/s00484-016-1227-7



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Soziotechnische Gestaltung des digitalen Wandels – kreativ, innovativ, sinnhaft

63. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

FHNW Brugg-Windisch, Schweiz

15. – 17. Februar 2017

GfA Press

Bericht zum 63. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 15. – 17. Februar 2017

FHNW Brugg-Windisch, Schweiz

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Dortmund: GfA-Press, 2017

ISBN 978-3-936804-22-5

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.

USB-Print: Dr. Philipp Baumann, Olten

Screen design und Umsetzung

© 2017 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de