

# Physiologische Kosten von Hitzebelastung – Zunahme des Energieumsatzes mit steigender Körpertemperatur

Bernhard KAMPMANN<sup>1</sup>, Peter BRÖDE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Bergische Universität Wuppertal,  
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik; Fachgebiet Arbeitswissenschaft  
Gaußstraße 20, D-42097 Wuppertal*

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

**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 von Körperarbeit, Windgeschwindigkeit, Bekleidungsisolierung und Akklimatisationszustand auf diesen Effekt analysierten wir den Einfluss der Rektaltemperatur ( $T_{re}$ ) auf den Sauerstoffverbrauch ( $VO_2$ ) aus 41 Versuchsserien von 14 Probanden mit insgesamt 740 Klimaexpositionen mit linearen Regressionsmodellen. Es ergab sich ein signifikanter  $VO_2$ -Anstieg mit  $T_{re}$ , dessen absolute Höhe von den betrachteten Faktoren unbeeinflusst war. Die relativen Effektgrößen prozentuale  $VO_2$ -Änderung und  $Q_{10}$  waren im Sitzen gegenüber Laufbandarbeit signifikant erhöht, was bei gleichem absolutem Anstieg durch den im Sitzen niedrigeren Ausgangswert (Achsenabschnitt) bei  $T_{re}=36,8$  °C erklärbar ist. Eine Ausweitung der Datenbasis um mehr Versuche mit bekleideten Probanden erscheint wünschenswert.

**Schlüsselwörter:** Hitzearbeit, Energieumsatz, Modell

## 1. Einleitung

Bei erhöhter Temperatur laufen chemische Reaktionen schneller ab, so dass bei Hitzebelastung der Anstieg der Körpertemperatur und zusätzlich auch die Mechanismen zu ihrer Regulierung - die vermehrte periphere Durchblutung sowie der Anstieg der Schweißproduktion - den Energieumsatz 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 den zerebralen Stoffwechsel wird eine Verminderung von 7% pro Grad Temperaturabsenkung berichtet (Luscombe & Andrzejowski 2006), beim Radfahren eine verminderte metabolische Effizienz bei erhöhter Körpertemperatur, 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 sogenannten  $Q_{10}$ -Faktor, d.h. das Verhältnis der Energieumsätze bei einer Temperaturerhöhung um 10 °C (The Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences 2003) beschrieben werden. Frühere Auswertungen vorhandener Daten aus

Laboruntersuchungen belegten einen entsprechenden Zusammenhang zwischen Rektaltemperatur ( $T_{re}$ ) und Sauerstoffverbrauch ( $VO_2$ ) für akklimatisierte, weitgehend unbedeckte Probanden, die leichte bis mittelschwere Arbeit bei geringer Luftgeschwindigkeit ( $v_a=0,3$  m/s) leisteten (Kampmann & Bröde 2014).

Die hier vorgestellte Untersuchung des Einflusses von Körperarbeit, Windgeschwindigkeit, Bekleidungsisolations und Akklimatisationszustand auf diesen Effekt basiert auf einer umfangreichen Datenbank von Klimaexpositionen, wobei die Bedingungen in den Klimakammern jeweils konstant eingehalten wurden.

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Datenbasis

Insgesamt wurden 41 Versuchsserien von 14 männlichen Probanden (Alter  $20,5 \pm 1,4$  Jahre, Körperhöhe  $184 \pm 3$  cm, Körpergewicht  $70,6 \pm 6,3$  kg, max. Sauerstoffaufnahme pro kg Körpergewicht  $46,4 \pm 7,5$  ml/min/kg, Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung) mit insgesamt 740 Klimaexpositionen ausgewertet. Die Lufttemperatur variierte von 15-55 °C, die Luftfeuchte von 0,3-5,7 kPa, und die mittlere Strahlungstemperatur war gleich der Lufttemperatur. Tabelle 1 beschreibt die Variationen in den Versuchsbedingungen, die neben der bereits beschriebenen Referenzbedingung (Ref) (Kampmann & Bröde 2014) auch Versuche mit nicht-akklimatisierten Probanden (N-Akk), im Sitzen (Sit), mit erhöhter Luftgeschwindigkeit (Wind) und Arbeitsschwere (Work) sowie mit Arbeitskleidung (Clo), auch unter erhöhter Arbeitsschwere (CloWork), umfassten.

Die Mittelwerte der in der dritten Expositionsstunde registrierten Rektaltemperaturen ( $T_{re}$ ) indizierten die Wärmebeanspruchung, der gemessene Sauerstoffverbrauch ( $VO_2$ ) den Energieumsatz. Detaillierte Beschreibungen des Versuchsablaufs finden sich in früheren Arbeiten (Ilmarinen 1978; Kampmann 2000).

**Tabelle 1:** Versuchsbedingungen mit Verteilung der 41 Serien (#S) mit 740 Einzelversuchen (#V).

Bedingung		#S	#V
<b>Ref</b>	unbedeckt ( $I_{cl}=0,1$ clo), akklimatisiert, Gehen 4 km/h in der Ebene, Luftgeschwindigkeit $v_a=0.3$ m/s	13	236
<b>N-Akk</b>	nicht-akklimatisiert, sonst wie 'Ref'	3	76
<b>Wind</b>	erhöhte Luftgeschwindigkeit ( $v_a=1,0$ bzw. $2,0$ m/s), sonst wie 'Ref'	6	108
<b>Clo</b>	mit Arbeitskleidung ( $I_{cl}=0,7$ bzw. $1,0$ clo), sonst wie 'Ref'	5	64
<b>Work</b>	erhöhte Arbeitsschwere (Laufbandneigung $2-4^\circ$ ), sonst wie 'Ref'	8	140
<b>CloWork</b>	mit Arbeitskleidung und erhöhter Arbeitsschwere, sonst wie 'Ref'	3	42
<b>Sit</b>	sitzend, sonst wie 'Ref'	3	74

### 2.2 Datenanalyse und Statistik

Für jede der 41 Serien wurde der Einfluss von  $T_{re}$  auf  $VO_2$  mit linearer Regression modelliert, wobei  $T_{re}$  so skaliert wurde, dass der Achsenabschnitt den Sauerstoffverbrauch bei  $36,8$  °C Rektaltemperatur ( $VO_2@T_{re}=36,8^\circ C$ ) beschreibt.

Aus diesem Wert und der Steigung wurde auch die prozentuale Änderung als Quotient Steigung/Achsenabschnitt\*100 berechnet.

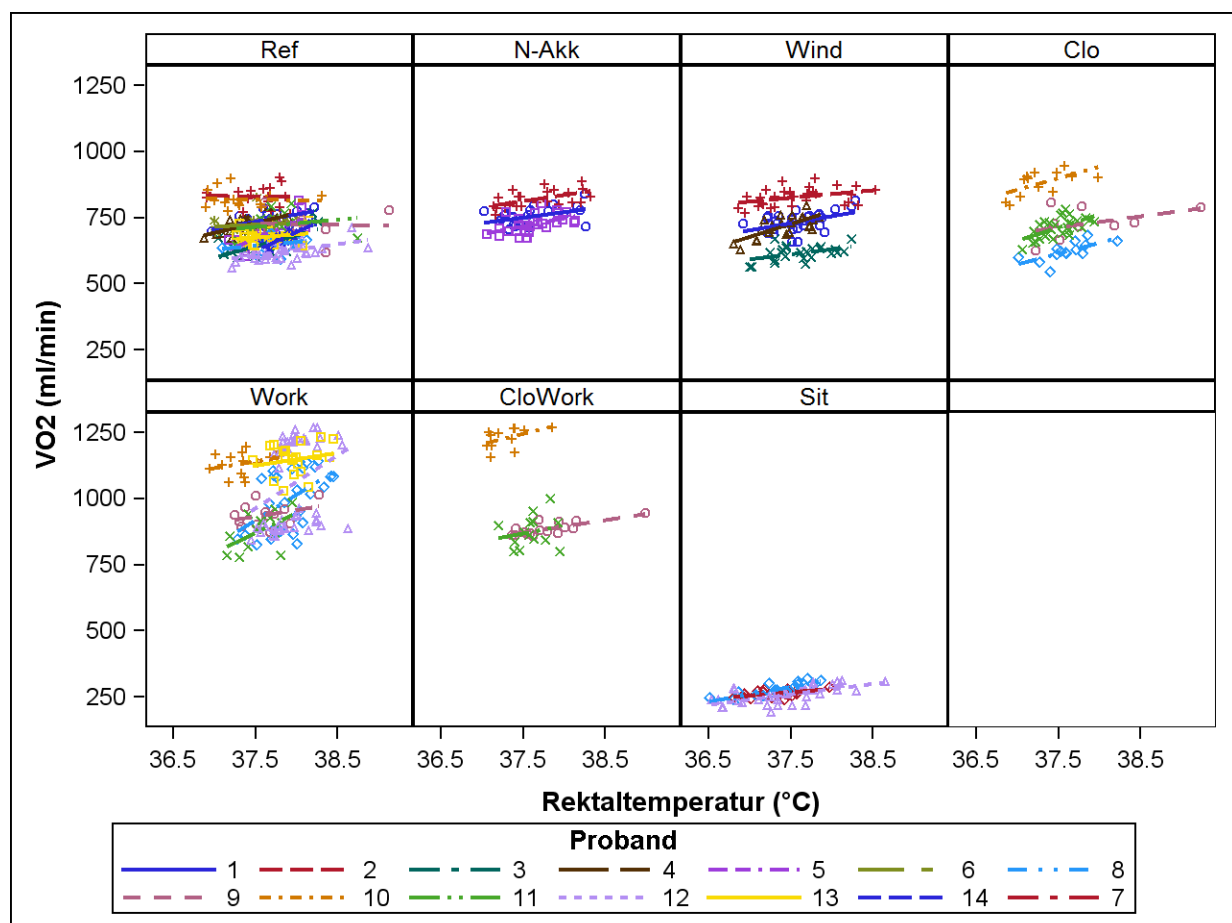
Der Definition von Q10-Faktoren folgend (Chaui-Berlinck et al. 2002) wurden diese aus der logarithmierten Gleichung 1 ebenfalls mittels linearer Regression errechnet, wobei auch hier  $T_{re,ref}$  auf 36,8 °C gesetzt war.

$$VO_2 = VO_{2,ref} \cdot Q_{10}^{(T_{re} - T_{re,ref})/10} \quad (1)$$

Der Einfluss der Versuchsbedingungen (Tab. 1) auf die ermittelten Parameter wurde durch 1-faktorielle ANOVA für Messwiederholungen auf Signifikanz geprüft. Mittelwerte (AM) und Standardfehler (SE), bzw. 95%-Konfidenzintervalle (95%-CI) für Q10, wurden mit linearen gemischten Modellen berechnet. In Post-hoc-Analysen wurden die p-Werte für die Vergleiche zur Referenzbedingung (Ref) nach Dunnett-Hsu für multiples Testen adjustiert (Littell et al. 1996).

### 3. Ergebnisse

Für den in Abbildung 1 dargestellten Zusammenhang von  $VO_2$  und  $T_{re}$  ergab sich eine erhebliche inter-individuelle Variation bzgl. Niveau und Steigung der Regressionsgeraden.



**Abbildung 1:** Sauerstoffverbrauch ( $VO_2$ ) in Abhängigkeit von der Rektaltemperatur aus 740 Einzelversuchen mit 14 Probanden unter verschiedenen Bedingungen (Tab. 1) mit individuellen Regressionsgeraden.

**Tabelle 2:** Mittelwerte (AM), Standardfehler (SE) und 95%-Konfidenzintervalle (95%-CI) der mit linearen Regressionen mit Regressor Rektaltemperatur ( $T_{re}$ ) errechneten Parameter Achsenabschnitt ( $VO_2@T_{re}=36,8^{\circ}C$ ) und Steigung ( $VO_2$ -Anstieg) sowie von prozentualer  $VO_2$ -Änderung (Steigung/Achsenabschnitt in %) und  $Q_{10}$ , ermittelt für die einzelnen Serien unter verschiedenen Bedingungen. Ebenfalls angegeben sind die Resultate der Signifikanztests für die unterschiedlichen Bedingungen durch 1-faktorielle ANOVA mit Messwiederholung sowie der Post-hoc Vergleiche zur Referenzbedingung.

Bedingung	$VO_2@T_{re}=36,8^{\circ}C^d$ (ml/min)		$VO_2$ Anstieg <sup>a</sup> (ml/min/ $^{\circ}C$ )		Prozentuale $VO_2$ -Änderung <sup>b</sup> (%)		$Q_{10}^c$ (nd)
	AM	SE	AM	SE	AM	SE	AM (95%-CI)
Ref	670,4	± 29,6	44,8	± 10,7	7,3	± 2,0	1,9 (1,3-2,6)
N-Akk	702,0	± 54,9 <sup>ns</sup>	43,5	± 20,5 <sup>ns</sup>	5,3	± 3,4 <sup>ns</sup>	1,7 (0,9-3,1) <sup>ns</sup>
Wind	680,1	± 43,7 <sup>ns</sup>	48,9	± 16,1 <sup>ns</sup>	7,1	± 2,8 <sup>ns</sup>	2,0 (1,2-3,2) <sup>ns</sup>
Clo	678,8	± 45,0 <sup>ns</sup>	87,1	± 16,7 <sup>ns</sup>	13,8	± 2,9 <sup>ns</sup>	3,5 (2,1-5,7) <sup>+</sup>
Work	951,3	± 37,7 <sup>***</sup>	80,5	± 13,8 <sup>ns</sup>	9,9	± 2,5 <sup>ns</sup>	2,4 (1,5-3,6) <sup>ns</sup>
CloWork	925,8	± 54,0 <sup>**</sup>	74,1	± 20,2 <sup>ns</sup>	9,4	± 3,4 <sup>ns</sup>	2,3 (1,3-4,1) <sup>ns</sup>
Sit	266,9	± 55,2 <sup>***</sup>	47,3	± 20,6 <sup>ns</sup>	18,9	± 3,5 <sup>*</sup>	5,3 (2,9-9,7) <sup>*</sup>

1-faktorielle ANOVA Signifikanztests: <sup>a</sup>: $p>0,1$ , <sup>b</sup>: $p<0,1$ , <sup>c</sup>: $p<0,05$ , <sup>d</sup>: $p<0,01$   
p-Werte adjustiert für multiplen Post-hoc Vergleich zu Ref: <sup>ns</sup>: $p>0,1$ , <sup>+</sup>: $p<0,1$ , <sup>\*</sup>: $p<0,05$ , <sup>\*\*</sup>: $p<0,01$ , <sup>\*\*\*</sup>: $p<0,001$

Erwartungsgemäß war der Achsenabschnitt ( $VO_2@T_{re}=36,8^{\circ}C$ ) bestimmt durch die Arbeitsschwere. Die Post-hoc Vergleiche belegten einen erhöhten Sauerstoffverbrauch bei größerer Arbeitsschwere bzw. ein vermindertes  $VO_2$  im Sitzen, während Akklimatisationsgrad, Luftgeschwindigkeit und Bekleidung bei gleicher Arbeitsschwere keinen signifikanten Effekt zeigten (Tabelle 2).

Bei Betrachtung des absoluten  $VO_2$ -Anstiegs über der Körpertemperatur zeigten sich keine signifikanten Abweichungen zur Referenz-Bedingung. Jedoch ergab sich bei der prozentualen  $VO_2$ -Änderung im Sitzen mit 19% ein im Vergleich zur Referenz (7%) signifikant erhöhter relativer Anstieg des Sauerstoffverbrauchs (Tabelle 2).

Die  $Q_{10}$ -Resultate glichen denen der prozentualen  $VO_2$ -Änderung. Für die als Referenz gewählte Bedingung ergab sich ein Wert von  $Q_{10}=1,87$  (95 % Konfidenz-Intervall: 1,33–2,63). Von diesem  $Q_{10}$ -Wert wichen im Rahmen der ein-faktoriellen ANOVA (adjustiert für multiples Testen) nur die Serien mit dem niedrigsten Energieumsatz (Sitzen) signifikant (auf 5%-Niveau) ab (Tabelle 2).

Akklimatisation, erhöhte Arbeitsschwere, Windgeschwindigkeit und Bekleidung zeigten keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die absolute oder relative mit der Rektaltemperatur assoziierte  $VO_2$ -Änderung.

#### 4. Diskussion

Der für  $T_{re}$  ermittelte  $Q_{10}$ -Faktor von etwa 2 bestätigt den Wert, der in einigen Modellen der Thermoregulation angenommen wird (Fiala et al. 2012; Werner & Buse 1988), wobei eine recht hohe interindividuelle Streuung der Ergebnisse vorliegt.

Die gleichzeitig registrierten prozentualen Änderungen des Sauerstoffverbrauchs in Abhängigkeit der Rektaltemperatur korrespondieren gut mit den berichteten Werten für den zerebralen Metabolismus (Luscombe & Andrzejowski 2006) bzw. der metabolischen Effizienz beim Radfahren (Daanen et al. 2006).

Obwohl der Steigungsparameter für bekleidete und/oder schwere Arbeit leistende Probanden gegenüber der Referenzbedingung deutlich erhöht war und sich fast verdoppelte, erreichte der Effekt keine statistische Signifikanz (Tabelle 2). Hier wäre eine Vergrößerung der Datenbasis um weitere Versuche mit bekleideten Probanden wünschenswert.

Dies gilt auch bzgl. sitzender Tätigkeit, für die sich trotz nur dreier Serien ein signifikant erhöhter relativer VO<sub>2</sub>-Anstieg bzw. Q<sub>10</sub>-Effekt im Vergleich zur Referenzbedingung ergab, der aber, bei gleichem absoluten Anstieg, durch den niedrigeren VO<sub>2</sub>-Ausgangswert bei  $T_{re}=36,8$  °C erklärbar ist.

## 5. Schlussfolgerung und Ausblick

Der Anstieg des Energieumsatzes mit steigender Körpertemperatur wird von fortgeschrittenen Modellen der Thermoregulation berücksichtigt – zum Ausmaß des Anstieges werden hier experimentelle Ergebnisse vorgelegt.

Bei Untersuchungen des Energieumsatzes, bei denen die Körpertemperatur nicht konstant gehalten werden kann, kann ein Teil der Zunahme des Energieumsatzes durch die Veränderung der Körpertemperatur erklärt werden, z.B. bei der Bestimmung des mechanischen Wirkungsgrades beim Radfahren (Daanen et al. 2006) oder bei der Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Schutzkleidung auf den Energieumsatz (Dorman & Havenith 2009).

## 6. Literatur

- Chaui-Berlinck JG, Monteiro LHA, Navas CA, Bicudo JEPW (2002) Temperature effects on energy metabolism: a dynamic system analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 269(1486): 15-19.
- 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.
- Dorman LE, Havenith G (2009) The effects of protective clothing on energy consumption during different activities. *European Journal of Applied Physiology* 105(3): 463–470.
- 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, 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 Q<sub>10</sub>“-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.

- 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.
- Luscombe M, Andrzejowski JC (2006) Clinical applications of induced hypothermia. Continuing Education in Anaesthesia, Critical Care & Pain 6(1): 23-27.
- 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.