

## Genauigkeit der Schätzung des Energieumsatzes aus der Herzschlagfrequenz bei Hitzebelastung – ein Beitrag zur Revision von ISO 8996

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

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

<sup>2</sup> *Bergische Universität Wuppertal, Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik  
Fachgebiet Arbeitswissenschaft  
Gaußstraße 20, D-42097 Wuppertal*

**Kurzfassung:** Die Genauigkeitsangaben in der internationalen Norm ISO 8996 zur Schätzung des Energieumsatzes aus der Herzschlagfrequenz ( $M_{HF}$ ) wurden im Vergleich zu Messungen über die Sauerstoffaufnahme ( $M_{VO_2}$ ) aus 373 Klimakammer-Experimenten geprüft. Während die  $M_{VO_2}$ -Messungen die in ISO 8996 genannte Genauigkeit von 5% bestätigten, ergab sich eine deutliche Überschätzung vom  $M_{VO_2}$  durch  $M_{HF}$  mit Fehler-schwankungen von bis zu 80%. Diese war maßgeblich dem nicht berücksichtigten Anstieg der Kerntemperatur zuzuschreiben, der über den Q<sub>10</sub>-Effekt den Energieumsatz und als „thermische Pulse“ die Herzschlagfrequenz beeinflusst. Diese Einflüsse sollten daher bei der anstehenden Überarbeitung der Norm Beachtung finden.

**Schlüsselwörter:** Klima, Arbeitsschwere, Normung, Modell, Q<sub>10</sub>-Effekt

### 1. Einleitung und Fragestellung

Der Energieumsatz bei Muskelarbeit ( $M$ ) ist vermittelt über die resultierende metabolische Wärmeproduktion eine wesentliche Eingangsgröße in der Bewertung von Hitzebelastungen und wird im Labor aus der Messung der Sauerstoffaufnahme ( $VO_2$ ) ermittelt. Die Messung erfolgt international genormt nach ISO 8996 (2004) mit einer angegebenen Genauigkeit von etwa 5 %, ausgedrückt als Variationskoeffizient, d.h. als prozentuales Verhältnis von Standardabweichung zu Mittelwert.

Ein für die anstehende Revision von ISO 8996 zur Anwendung in arbeitswissenschaftlichen Studien und zur Gefährdungsanalyse kürzlich vorgestelltes Verfahren (Malchaire et al. 2017) schätzt  $M$  aus der Herzschlagfrequenz ( $HF$ ) und leitet für leichte bis mittelschwere Arbeit (200 – 300 W) aus Simulationsrechnungen eine Genauigkeit von 10 – 15 % ab.

Frühere Untersuchungen belegen den Einfluss der Körpertemperatur sowohl auf die Herzschlagfrequenz durch die sogenannten „thermischen Pulse“ (Kampmann 2000; Kampmann et al. 2001) als auch auf den Energieumsatz über den Q<sub>10</sub>-Effekt (Bröde & Kampmann 2017; Kampmann & Bröde 2014; 2016).

Vor diesem Hintergrund überprüft dieser Beitrag die Genauigkeitsangaben für die Schätzung des Energieumsatzes aus der Herzschlagfrequenz durch den Vergleich der Schätzwerte zu  $VO_2$ -basierten Messungen von  $M$  unter Laborbedingungen.

## 2. Methoden

Zur Bearbeitung der Fragestellung stand eine umfangreiche Datenbank aus früheren Klimakammer-Untersuchungen zur physiologischen Beanspruchung durch Hitzebelastungen zur Verfügung (Forsthoff et al. 2001; Ilmarinen 1978; Kampmann 2000; Kampmann & Bröde 2014; 2016; Wenzel et al. 1989).

### 2.1 Daten

Wir verwendeten Daten aus 11 Versuchsserien von 6 jungen männlichen Probanden, deren Merkmale Tabelle 1 auflistet. Sie absolvierten in Arbeitskleidung mit einer thermische Isolation  $I_{cl} = 0.7$  clo insgesamt 373 Klimakammer-Expositionen bei mehrstündiger Laufbandarbeit mit 3 km/h (W1) und 4 km/h (W2) Gehen in der Ebene bzw. 4 km/h bei 2.5° Neigung (W3).

Die Versuche erfolgten unter Hitzebedingungen. Dabei variierten über alle Serien die Lufttemperatur zwischen 15 – 55 °C, die Luftfeuchte von 0.4 – 1.8 kPa, die Luftgeschwindigkeit von 0.5 – 2.0 m/s, und die mittlere Strahlungstemperatur lag zwischen 0 und 128.5 K oberhalb der Lufttemperatur.

**Tabelle 1:** Merkmalsverteilung für die sechs männlichen Probanden mit Mittelwert (AM), Standardabweichung (SD), Minimum (Min) und Maximum (Max).

Merkmal	AM	SD	Min	Max
Alter (J)	20.8	0.9	19.6	21.8
Körperhöhe (cm)	183.0	4.3	177.0	186.0
Körpermasse (kg)	72.1	8.4	62.9	85.0
Körperoberfläche (m <sup>2</sup> )	1.9	0.1	1.8	2.1
max. Sauerstoffaufnahme - $VO_{2,max}$ (L/min)	4.0	0.8	3.1	5.3

### 2.2 Auswertung und statistische Analyse

Aus den Mittelwerten der in der dritten Expositionsstunde registrierten  $HF$  wurde  $M$  als  $M_{HF}$  nach folgender Gleichung 1 geschätzt (Malchaire et al. 2017).

$$M_{HF} = M_0 + (M_{max} - M_0) \times (HF - HF_0) / (HF_{max} - HF_0) \quad (1)$$

Dabei kennzeichnen  $M_0$  und  $HF_0$  sowie  $M_{max}$  und  $HF_{max}$  die Ruhe- bzw. Maximalwerte von Energieumsatz und Herzschlagfrequenz.

Zum Vergleich wurde der auf  $VO_2$ -Messungen basierende Energieumsatz  $M_{VO_2}$  nach ISO 8996 (2004) berechnet.

Der Einfluss der Arbeitsschwere (W1, W2, W3) sowie des Anstiegs der Rektaltemperatur ( $\Delta T_{re}$ ) als zusätzliche Kovariable auf  $M_{VO_2}$  und den Vorhersagefehler  $M_{err} = M_{HF} - M_{VO_2}$  wurde durch (Ko-)Varianzanalysen untersucht, deren Berechnung unter Berücksichtigung der korrelierten wiederholten Messungen als lineare Modelle mit gemischten festen und zufälligen Effekten erfolgte (Littell et al. 2006).

### 3. Ergebnisse

Der auf der Sauerstoffaufnahme basierende Energieumsatz  $M_{VO_2}$  betrug im Mittel 210 W (W1), 260 W (W2) und 327 W (W3) (Tabelle 2).

Die Variationskoeffizienten (VK) lagen zwischen 4 % und 11 %. Da letztere auch die inter-individuelle Varianz beinhalten, wurden mit Varianzanalysen die für die Messgenauigkeit relevanten intra-individuellen VK bestimmt, die von 4 % bis 7 % reichten.

$M_{VO_2}$  wurde durch  $M_{HF}$  deutlich überschätzt mit einem über alle Arbeitsbedingungen gemittelten Fehler  $M_{err}$  von  $154 \pm 82$  W und Fehlerschwankungen von 80 % (W1), 70 % (W2) und 29 % (W3) (Tabelle 2). Die sich andeutende Tendenz eines mit zunehmender Arbeitsschwere, insbesondere bei W3, abnehmenden Fehlers erwies sich in einer Varianzanalyse als statistisch nicht signifikant ( $p=.24$ ).

**Tabelle 2:** Anzahl der Serien ( $n_{Ser}$ ) und Klimakammer-Expositionen ( $n_{Exp}$ ) nach Schwere der Arbeit mit Mittelwert (AM), Standardabweichung (SD) und Variationskoeffizient (VK) für  $M_{VO_2}$ , sowie für den Vorhersagefehler ( $M_{err} = M_{HF} - M_{VO_2}$ ) zusätzlich mit Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (rmse) und relativer Fehlerschwankung (rmse/ $M_{VO_2}$ ) in Prozent.

Arbeit	$n_{Ser}$	$n_{Exp}$	$M_{VO_2}$ (W)			$M_{err}$ (W)			
			AM	SD	VK	AM	SD	rmse (W)	rmse/ $M_{VO_2}$
W1	3	48	210	20	9%	160	49	167	80 %
W2	6	298	260	28	11%	159	86	180	70 %
W3	2	27	327	14	4%	85	43	95	29 %

Weitergehende Kovarianz- und Regressionsanalysen ergaben, dass der Vorhersagefehler  $M_{err}$  mit dem vom Schätzverfahren nicht berücksichtigten Kerntemperaturanstieg ( $\Delta T_{re}$ ), der unabhängig von der Arbeitsschwere im Mittel etwa 1 °C betrug, signifikant positiv korrelierte, wobei der Fehler insbesondere für  $\Delta T_{re} > 0.4$  °C deutlich zunahm (Abbildung 1).

Aus dem Konfidenzintervall in Abbildung 1 ist abzulesen, dass sich nach Adjustierung des Kerntemperatureinflusses der Achsenabschnitt (bei  $\Delta T_{re} = 0$ ) des Vorhersagefehlers statistisch nicht signifikant von Null unterschied.

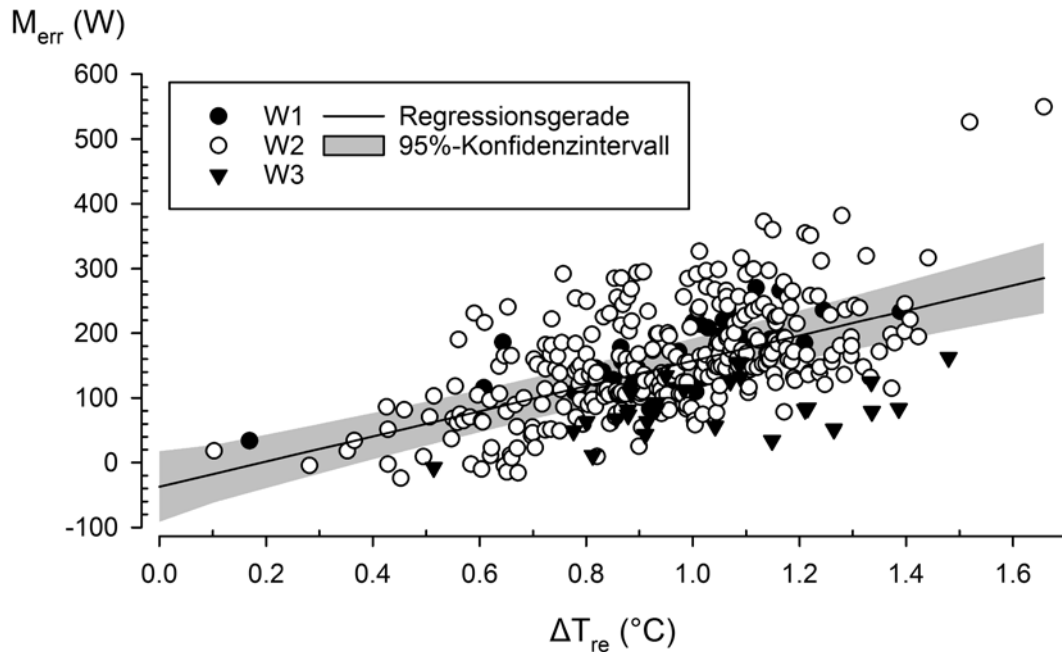
Das Schätzverfahren zeigte zudem erhebliche Fehler in der Abschätzung des bei maximaler Sauerstoffaufnahme ( $VO_{2,max}$ ) auftretenden Energieumsatzes als Maß für die maximale Leistungsfähigkeit ( $M_{max}$ ), insbesondere eine deutliche Unterschätzung von  $M_{max}$  für  $VO_{2,max}$  oberhalb von 3.5 L/min. Auch diese Abweichungen korrelierten signifikant ( $r = .48$ ,  $p < .001$ ) mit dem Vorhersagefehler  $M_{err}$ .

### 4. Diskussion

Die deutlichen Überschätzung des gemessenen  $M_{VO_2}$  durch den vorgeschlagenen Schätzalgorithmus zu  $M_{HF}$  in unserer Stichprobe ist auf die Nichtberücksichtigung der thermischen Komponente, d.h. des Einflusses von  $\Delta T_{re}$  auf den Energieumsatz, über den Q<sub>10</sub>-Effekt (Bröde & Kampmann 2017; Kampmann & Bröde 2014; 2016), und auf

die Herzschlagfrequenz über die „thermischen Pulse“ (Kampmann 2000; Kampmann et al. 2001) zurückzuführen.

Dieser Einfluss wird in ISO 8996 (2004) zwar erwähnt, bei der Ermittlung der Genauigkeitsangaben aber ignoriert. Dies resultiert in deutlich zu optimistischen Fehlerangaben von 10-15% (Malchaire et al. 2017) im Vergleich zu den hier gezeigten Abweichungen von bis zu 80%.



**Abbildung 1:** Vorhersagefehler für den Energieumsatz ( $M_{err} = M_{HF} - M_{VO_2}$ ) aus 373 Messungen mit drei Arbeitsschweren (W1, W2, W3) in Abhängigkeit vom Anstieg der Rektaltemperatur ( $\Delta T_{re}$ ) mit Regressionsgerade und Konfidenzintervall.

## 5. Schlussfolgerung

Unsere Ergebnisse bestätigen die in ISO 8996 (2004) genannte Genauigkeit von 5 % für  $M_{VO_2}$ , stellen aber die Genauigkeitsangaben des vorgeschlagenen Schätzalgorithmus zu  $M_{HF}$  (Malchaire et al. 2017) zumindest für die hier untersuchte Stichprobe junger männlicher Erwachsener infrage. Eine Überprüfung dieser Befunde auch für Frauen sowie andere Altersgruppen ist daher wünschenswert.

Ansätze zur Verbesserung in der Anwendung, speziell unter Hitzebelastung, liegen, außer in einer verbesserten Schätzung der maximalen Leistungsfähigkeit  $M_{max}$ , in der Berücksichtigung des thermischen Einflusses, z.B. durch ein Monitoring des Körpertemperaturanstiegs oder durch ein spezielles Messprotokoll, welches durch eine mindestens 5-minütige Ruhephase im Anschluss an die zu untersuchende Belastung eine Abschätzung der „thermischen Pulse“ als Differenz zum Ausgangswert erlaubt (Kampmann 2000). Es sind auch weitere Varianten dieses Ansatzes denkbar (Kampmann et al. 2001; Dubé et al. 2016).

Zusätzliche Aspekte zur Revision der Norm ISO 8996 finden sich in einem weiteren Beitrag zu diesem Kongressband (Kampmann 2018).

## 6. Literatur

- Bröde P, Kampmann B (2017) Individuelle Determinanten physiologischer Kosten der Wärmeregulation bei Hitzebelastung. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Ed) 63. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Dortmund: GfA-Press, 1-6.
- Dubé PA, Imbeau D, Dubeau D, Lebel L, Kolas A (2016) Removing the thermal component from heart rate provides an accurate estimation in forest work. *Applied Ergonomics* 54:148-157.
- Forsthoef A, Mehnert P, Neffgen H (2001) Comparison of laboratory studies with predictions of the required sweat rate index (ISO 7933) for climates with moderate to high thermal radiation. *Applied Ergonomics* 32:299-303.
- Ilmarinen R (1978) Einflüsse verschiedener Bekleidung auf einige physiologische Größen des Menschen bei Körperarbeit in unterschiedlich erhöhter Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit. Köln: Deutsche Sporthochschule Köln, Dissertation.
- ISO 8996 (2004) Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate. Geneva: International Organisation for Standardisation.
- Kampmann B (2000) Zur Physiologie der Arbeit in warmem Klima. Ergebnisse aus Laboruntersuchungen und aus Feldstudien im Steinkohlenbergbau. Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal, Habilitationsschrift.
- Kampmann B (2018) Zur indirekten Bestimmung des Energieumsatzes aus der Sauerstoffaufnahme – ein Beitrag zur Revision von ISO 8996. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Ed) 64. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Dortmund: GfA-Press, 1-4.
- 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. Dortmund: GfA-Press, 501-503.
- Kampmann B, Bröde P (2016) Physiologische Kosten von Hitzebelastung – Zunahme des Energieumsatzes mit steigender Körpertemperatur. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Ed) 62. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Dortmund: GfA-Press, 1-6.
- Kampmann B, Kalkowsky B, Piekarski C (2001) Estimation of metabolic rate from cardiac frequency for field studies: correcting for “thermal pulses”. *Journal of Thermal Biology* 26:437-440.
- Littell RC, Milliken GA, Stroup WW et al. (2006) SAS® System for Mixed Models, Second Edition. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Malchaire J, d'Ambrosio Alfano FR, Palella BI (2017) Evaluation of the metabolic rate based on the recording of the heart rate. *Industrial Health* 55:219-232.
- 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*:7-14.



Gesellschaft für  
Arbeitswissenschaft e.V.

**ARBEIT(s).WISSEN.SCHAF(F)T**  
Grundlage für Management & Kompetenzentwicklung

64. Kongress der  
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

FOM Hochschule für  
Oekonomie & Management gGmbH

21. – 23. Februar 2018

---

**GfA Press**

---

**Bericht zum 64. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 21. – 23. Februar 2018**

**FOM Hochschule für Oekonomie & Management**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Dortmund: GfA-Press, 2018

ISBN 978-3-936804-24-9

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.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

**USB-Print:**

Prof. Dr. Thomas Heupel, FOM Prorektor Forschung, [thomas.heupel@fom.de](mailto:thomas.heupel@fom.de)

**Screen design und Umsetzung**

© 2018 fröse multimedia, Frank Fröse

[office@internetkundenservice.de](mailto:office@internetkundenservice.de) · [www.internetkundenservice.de](http://www.internetkundenservice.de)