

# Persönliche PDF-Datei für

Mit den besten Grüßen vom Georg Thieme Verlag

[www.thieme.de](http://www.thieme.de)



Dieser elektronische Sonderdruck ist nur für die Nutzung zu nicht-kommerziellen, persönlichen Zwecken bestimmt (z. B. im Rahmen des fachlichen Austauschs mit einzelnen Kollegen und zur Verwendung auf der privaten Homepage des Autors). Diese PDF-Datei ist nicht für die Einstellung in Repositorien vorgesehen, dies gilt auch für soziale und wissenschaftliche Netzwerke und Plattformen.

**Verlag und Copyright:**

. Thieme. All rights reserved.  
Georg Thieme Verlag KG, Rüdigerstraße 14,  
70469 Stuttgart, Germany  
ISSN

Nachdruck nur  
mit Genehmigung  
des Verlags



**Thieme**

# Zur Bedeutung der relativen Körperoberfläche und der Körperzusammensetzung für die Wärmebilanz des Menschen

## The Relevance of Relative Body Surface and Body Composition for the Heat Balance of Humans

### Autoren

Elmar Schlich<sup>1</sup>, Michaela Schlich<sup>2</sup>

### Institute

- <sup>1</sup> Justus-Liebig-Universität Gießen, FB 09
- <sup>2</sup> Universität Koblenz-Landau Fachbereich 03, Mathematik/Naturwissenschaften, Institut für Sportwissenschaft, FG Ernährungs- und Verbraucherbildung

### Schlüsselwörter

Wärmebilanz, Körperoberfläche, Untergewicht, Adipositas, Heat Performance Indicator

### Keywords

heat balance, body surface, underweight, obesity, heat performance indicator

Online-Publikation 16.9.2021

### Bibliografie

Aktuel Ernährungsmed 2021; 46: 380–390

DOI 10.1055/a-1502-6133

ISSN 0341-0501

© 2021. Thieme. All rights reserved.

Georg Thieme Verlag KG, Rüdigerstraße 14,  
70469 Stuttgart, Germany

### Korrespondenzadresse

Prof. Dr.-Ing. Elmar Schlich, FB 09, Justus-Liebig-Universität  
Gießen, Stephanstraße 24, 35390 Gießen, Deutschland  
elmar.schlich@ernaehrung.uni-giessen.de

### ZUSAMMENFASSUNG

**Einleitung** Menschen geben stetig Wärme an die Umgebung ab. Die relative Körperoberfläche korreliert positiv, der isolierende Anteil an Körperfett negativ mit der Wärmebilanz.

**Stand des Wissens** Die relative Körperoberfläche kann mithilfe von Körpermasse, Körpergröße oder BMI hinreichend gut berechnet werden. Unterschiedliche Formeln für Frauen und Männer liefern bessere Ergebnisse. Der Anteil an Körperfett ist per Bioelektrischer Impedanzanalyse gut zu erfassen.

**Aufgabenstellung und Methoden** Wie ändert sich die relative Körperoberfläche bei Zu- oder Abnahme, wie unterscheiden sich Männer und Frauen und kann die Wärmebilanz

mit einer Kenngröße klassifiziert werden? Dazu werden Probanden/innen vermessen und rechnerisch analysiert. Zudem werden Männer und Frauen mit demselben BMI rechnerisch miteinander verglichen. Abschließend wird geprüft, ob sich der Quotient aus relativer Körperoberfläche und Anteil an Körperfett zur Klassifizierung eignet.

**Ergebnisse** Untergewichtige Menschen weisen eine größere relative Körperoberfläche bei geringerem Anteil an Körperfett auf. Sie geben daher mehr Wärme an die Umgebung ab als adipöse mit geringerer relativer Körperoberfläche bei gleichzeitig größerem Anteil an Körperfett. Bei Gewichtszunahme nimmt die relative Körperoberfläche signifikant ab, bei Abnahme umgekehrt. Bei identischem BMI haben Frauen eine signifikant größere Körperoberfläche als Männer. Der Heat Performance Indicator als Quotient aus Oberfläche und Anteil an Körperfett kann Individuen zuverlässig thermodynamisch klassifizieren.

**Diskussion** Die relative Körperoberfläche als innovativer Parameter scheint zusammen mit dem Anteil an Körperfett dazu geeignet, Individuen hinsichtlich ihrer Wärmebilanz besser zu beurteilen. Dabei zeigen sich selbstverstärkende Effekte, bei Adipositas durch geringere Oberfläche bei gleichzeitig mehr Fett, bei Untergewicht durch größere Oberfläche bei gleichzeitig weniger Fett. Weitere Forschungsarbeiten zur ernährungsmedizinischen Absicherung sind jedoch erforderlich.

### ABSTRACT

**Introduction** Humans steadily transfer heat to the surroundings. The relative body surface correlates positive, the fat proportion negative to the heat balance.

**State of knowledge** Formulae using body mass, body height or BMI allow to estimate the relative body surface quite well. Different formulae for male and female subjects get better results. The bioelectrical impedance analysis is well established to measure the fat proportion.

**Objectives and methods** How does the relative body surface change with gaining or losing weight? Do male and female subjects differ? Is it possible to classify the individual heat balance by means of a characteristic value? Male and female subjects are measured and calculatively analyzed. Finally, the quotient of relative body surface to body fat proportion is tested for heat transfer classification.

**Results** Underweight subjects transfer more heat to the surroundings because of their larger relative body surface and lower fat proportion. Obese subjects transfer less heat to the surroundings because of their lower relative body surface and higher fat proportion. With gaining weight the relative body surface significantly decreases, with losing weight reversely. Female subjects with same BMI show larger relative body surface compared to male subjects. The Heat Performance Indicator as quotient of relative body

surface to fat proportion is able to classify the thermodynamics of individuals.

**Discussion** The relative body surface as innovative parameter in combination with the fat proportion looks appropriate to better evaluate the heat balance of subjects. At the same time, self-strengthening effects show up, in case of obesity due to lower relative surface and more fat, in case of underweight vice versa. However, further research and clinical field tests performed by nutritional medicine are necessary.

## Einleitung

Menschen gehören zur Klasse der homiothermen<sup>1</sup> Lebewesen, bei denen die Aufrechterhaltung einer mittleren Körpertemperatur im Kern – hier ca. 36,6 °C – in engen Grenzen lebenswichtig ist. Die Körpertemperatur wird durch den Metabolismus aufrechterhalten, der chemisch gebundene Energie aus Lebensmitteln oder körpereigenen Energiedepots – Glykogen, Körperfett, freie Fettsäuren – umwandelt und dabei immer auch thermische Energie freisetzt. Energie besteht nach thermodynamischer Definition aus einem arbeitsfähigen Anteil (d.i. die Exergie) und einem nicht arbeitsfähigen Anteil (d.i. die Anergie). Bei jeder Energieumwandlung wie z.B. von chemisch gebundener Energie in mechanische Arbeit nimmt die Exergie ab und die Anergie zu, während die Summe aus Exergie und Anergie konstant bleibt (1. Hauptsatz der Thermodynamik) ([1] 39ff.). Eine „verlustlose“ Energieumwandlung ist nicht möglich, da die Entropie bei jedem Umwandlungsschritt zunimmt (2. Hauptsatz der Thermodynamik) ([1] 89ff.). Insofern ist die Produktion thermischer Energie zwar nicht das primäre Ziel von Muskelarbeit, sondern eine thermodynamisch notwendige Folge des Metabolismus lebender Organismen auf Basis exothermer chemischer Reaktionen ([2] 83). Das Verhältnis von Muskelarbeit (=Exergie) zur Wärmeproduktion (=Anergie) – d.i. der muskuläre Wirkungsgrad – erreicht lediglich Werte zwischen 20 und 30 %, sodass 70–80 % des physiologischen Energieumsatzes auf Zellebene als Wärme frei wird [3].

Dieser Zusammenhang sei am Beispiel des Herzmuskelns eines Menschen erläutert, wobei sich die Nutzleistung einer Pumpe thermodynamisch aus dem Produkt von Volumenstrom und Druckdifferenz ergibt (►Tab. 1).

Die modellhafte Berechnung unter vereinfachend als stationär angenommenen Verhältnissen zeigt deutlich, dass der überwiegende Teil – hier 75 % – des Umsatzes chemisch gebundener Energie im Myokard auf die Wärmeproduktion entfällt, während nur 25 % als mechanische Energie nutzbar werden. Dabei ist von zentraler Bedeutung, dass die Bildung thermischer Energie im Körperinneren abläuft und damit von der Körpermasse  $m$  – genauer: von der Muskelmasse – abhängt.

►Tab. 1 Modellhafte Berechnung der integralen Nutz- und Wärmeleistung am Beispiel des Herzmuskelns, unter der vereinfachenden Annahme stationärer Verhältnisse hinsichtlich Volumenstrom und Druckdifferenz.

Nr.	Größe	Wert
1a	Volumenstrom	6 l/min
1b	Volumenstrom in SI-Einheit ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	0,0001 $\text{m}^3/\text{s}$
2a	Druckdifferenz (Blutdruck 120/70)	50 mmHg
2b	Druckdifferenz in SI-Einheit (1 Pascal = 1 N/ $\text{m}^2$ )	6665 Pa
3	Nutzleistung (=Produkt der Zeilen 1b und 2b)	0,6665 Nm/s = 0,6665 W
4	physiologische Leistung bei einem mittleren Muskelwirkungsgrad von 25 % [3]	2,6665 W
5	Wärmeleistung (Zeile 4 minus Zeile 3)	2 W
6	physiologischer Energieumsatz pro Tag	230,7 kJ/d (= 55 kcal/d)
7	Wärmeerzeugung pro Tag	172,8 kJ/d (= 41,3 kcal/d)

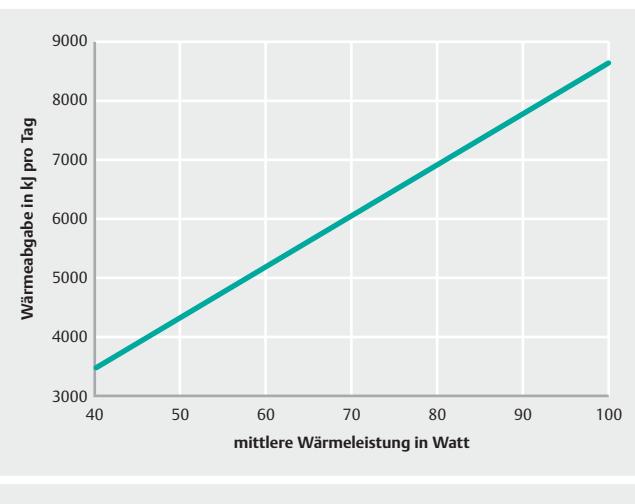
Aus thermodynamischer Sicht stellt die Wärmeabgabe an die Umgebung einen dominierenden Faktor in der Energiebilanz des Menschen dar. So würde z.B. eine durchaus typische mittlere Wärmeleistung eines Erwachsenen von 80 W rechnerisch einer Wärmeabgabe an die Umgebung von 6912 kJ/d (1650 kcal/d) entsprechen<sup>2</sup>. Diese stetige Abgabe von Wärme entspricht in der Größenordnung dem Grundumsatz, wobei dieser nach gängigen Näherungsformeln zwar von den Parametern Körpermasse, Größe, Lebensalter und Geschlecht, nicht aber von der Körperzusammensetzung abhängt. ►Abb. 1 zeigt den linearen Zusammenhang zwischen der mittleren Wärmeleistung und der täglichen Wärmeabgabe eines Menschen.

Bei Umgebungstemperaturen unterhalb der Körpertemperatur, wie sie in unseren Breiten die Regel sind, gibt der menschliche Körper laufend Wärme an die Umgebung ab. Bei höheren Umgebungstemperaturen kommt die Energieabgabe über die Transpiration auf die Haut hinzu.

Die genannten Effekte unterscheiden sich jedoch individuell in Abhängigkeit von der Körperzusammensetzung. So korre-

<sup>1</sup> Homiotherm: Gleichwarm (aus dem Griechischen).

<sup>2</sup> Berechnung:  $80 \text{ W} \times 3600 \text{ s/h} \times 24 \text{ h/d} = 6912000 \text{ Ws/d} = 6912000 \text{ J/d} = 6912 \text{ kJ/d}$ .



► Abb. 1 Nomogramm zur Ermittlung der Wärmeabgabe (kJ/d) aus der mittleren Wärmeleistung (W).

liert aktuellen Studien zufolge Adipositas mit innerer Überwärmung wegen des isolierenden subkutanen Fets. Messungen des von der Haut ausgehenden Wärmestroms zeigen eine negative Korrelation zwischen BMI und Hauttemperatur, verursacht durch subkutanes Fett [4, 5]. Eine andere Studie findet hingegen bei einer 1-stündigen Fahrradergometrie in feucht-heißer Umgebung keine signifikanten Unterschiede in Sauerstoffaufnahme, Hauttemperatur und Schweißproduktion zwischen 10 adipösen und 10 normalgewichtigen Frauen [6]. Die Vermutung, bei Adipositas trage die vermehrte Durchblutung der Oberhaut wesentlich zur Thermoregulation bei, kann laut Messungen der Hauttemperatur und Wärmeabgabe nicht bestätigt werden. Die Autoren gehen insofern davon aus, dass der Zusammenhang zwischen Adipositas und Thermoregulation bisher wenig verstanden sei [4].

Beide Formen der Energieabgabe – Wärme und Verdampfungsenthalpie<sup>3</sup> der Transpiration – sind aus thermodynamischer Sicht proportional zur Oberfläche des Energie abgebenden Körpers, aber umgekehrt proportional zur Schichtdicke des isolierenden subkutanen Fets. Dabei soll im vorliegenden Zusammenhang von der thermischen Energie der Ausscheidungen und der Atemluft abgesehen werden.

Interessant für die Energiebilanz des Menschen ist nun das Verhältnis von Wärmeabgabe an die Umgebung zur Erzeugung der thermischen Energie im Körperinneren. Vereinfacht ausgedrückt gilt:

- Wenn ein Individuum mehr Wärme an die Umgebung abgibt als der chemisch gebundenen Energie der aufgenommenen Lebensmittel entspricht, dann ist die Energiebilanz negativ. Körpereigene Energiedepots werden zum Ausgleich der Bilanz abgebaut: die Körpermasse<sup>4</sup> nimmt ab.

<sup>3</sup> Die Verdampfungsenthalpie (kJ) ist eine energetische Größe und stellt die Summe aus thermischer Energie und Volumenänderungsarbeit beim Phasenübergang flüssig/gasförmig dar.

<sup>4</sup> Körpermasse m (kg) – umgangssprachlich, aber physikalisch nicht korrekt auch Körpergewicht genannt.

- Wenn ein Individuum weniger Wärme an die Umgebung abgibt als der chemisch gebundenen Energie der aufgenommenen Lebensmittel entspricht, dann ist die Energiebilanz positiv. Körpereigene Energiedepots werden zum Ausgleich der Bilanz aufgebaut: die Körpermasse nimmt zu.

## Stand des Wissens

### Die relative Körperoberfläche als Parameter der Wärmebilanz

Aus der Thermodynamik ist sehr gut bekannt, dass (Heiz-)Körper mit großer relativer Oberfläche konvektiv mehr Wärme an die Umgebung abgeben als solche mit kleiner relativer Oberfläche. Denn die Wärmeabgabe an die Umgebung ist immer proportional zur Oberfläche des Wärme abgebenden Körpers ([1] 573). Dieser Sachverhalt zeigt sich naturgesetzlich auch in der Physiologie der Säugetiere, speziell im Vergleich von Tieren mit kleiner relativer Oberfläche – Beispiel: Robbe – und solchen mit großer relativer Oberfläche – Beispiel: Spitzmaus [7]. In diesen physikalisch einfachen und mathematisch gut zugänglichen Zusammenhang gehört auch der Begriff der Thermoregulation [8]. Dabei ist unter der relativen Körperoberfläche  $a$  das Verhältnis der absoluten Körperoberfläche  $A$  zur Körpermasse  $m$  eines Individuums zu verstehen (Gl. 1).

$$a = A/m \text{ (Gl. 1)}$$

Die relative Körperoberfläche  $a$  kann also berechnet werden, wenn die absolute Körperoberfläche  $A$  bekannt ist und diese durch die Körpermasse  $m$  dividiert wird. Zur Abschätzung der absoluten Körperoberfläche  $A$  existieren zahlreiche unterschiedlich empirisch belegte Formeln. Eine erste, aber immer noch häufig benutzte Näherungsformel (d.i. die Dubois-Formel) geht auf Messungen an nur 9 Testpersonen zurück und bestimmt die Oberfläche anhand der Körpermasse in kg und der Körpergröße in cm, ohne dabei zwischen Männern und Frauen zu unterscheiden [9].

Eine aktuelle Studie validiert vergleichend verschiedene Näherungsformeln anhand eigener 3D-Bodyscans an 93 Probanden [10]. Parameter der Näherungsformeln sind dabei in der Regel die Körpermasse  $m$  (kg), die Körpergröße  $H$  (m) oder der Body-Mass-Index  $BMI$  ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ). Nur drei Publikationen geben für männliche und weibliche Subjekte unterschiedliche Berechnungsformeln an, obwohl sich die Körperformen von Männern und Frauen signifikant unterscheiden [11–13]. Im Ergebnis zeigt sich, dass geschlechtsspezifische Berechnungsformeln für Frauen und Männer zu einer besseren Genauigkeit bei der Bestimmung der absoluten Körperoberfläche führen [10]. Solche Formeln nutzt die medizinische Forschung und Praxis, wenn es z.B. um die Medikation von pathogenen Hautveränderungen, Chemotherapie oder die epidemiologische Einordnung von Probanden geht, wobei die seinerzeit von den Autoren entwickelten Gleichungen gelegentlich wie folgt zitiert werden: „Body surface area was calculated with Schlich's equation“ [14].

Eine weitere aktuelle Studie vergleicht anhand anthropometrischer Messungen an 51 Gießereiarbeitern („metal casting workers“) 10 Näherungsformeln zur Berechnung der Körperoberfläche untereinander, darunter auch die hier entwickelte Formel. Im Ergebnis stellen die Autoren fest, dass die geteste-

► Tab. 2 Alter und anthropometrische Daten – Mittelwerte, Spannbreite und Standardabweichung (SD) – von Probandinnen (n = 132) und Probanden (n = 49) (Datenbasis aus [12]).

	Frauen	Männer
mittleres Alter (min–max) in Jahren	36,75 (20–84) SD = 14,3	39,5 (21–68) SD = 13,5
mittlere Körpermasse $m$ (min–max) in kg	65,26 (44,9–116,0) SD = 11,11	81,9 (61–111) SD = 11,8
mittlere Körpergröße $H$ (min–max) in m	1,67 (1,52–1,88) SD = 0,07	1,81 (1,67–1,96) SD = 0,07
mittlerer $BMI$ (min–max) in $\text{kg}/\text{m}^2$	23,55 (16,98–38,31) SD = 4,03	25,01 (19,12–33,46) SD = 3,12
mittlere relative Körperoberfläche $a$ in $\text{cm}^2/\text{kg}$	259,1; SD = 22,1	239,6; SD = 17,9
kleinste relative Körperoberfläche in $\text{cm}^2/\text{kg}$	197,0 <sup>a</sup>	198,5 <sup>c</sup>
größte relative Körperoberfläche in $\text{cm}^2/\text{kg}$	305,7 <sup>b</sup>	280,9 <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Probandin mit  $m = 116,0 \text{ kg}$  und  $H = 1,740 \text{ m}$  ( $BMI = 38,31 \text{ kg}/\text{m}^2$ )  
<sup>b</sup> Probandin mit  $m = 44,9 \text{ kg}$  und  $H = 1,626 \text{ m}$  ( $BMI = 16,98 \text{ kg}/\text{m}^2$ )  
<sup>c</sup> Proband mit  $m = 100,6 \text{ kg}$  und  $H = 1,734 \text{ m}$  ( $BMI = 33,46 \text{ kg}/\text{m}^2$ )  
<sup>d</sup> Proband mit  $m = 68,3 \text{ kg}$  und  $H = 1,890 \text{ m}$  ( $BMI = 19,12 \text{ kg}/\text{m}^2$ )

ten Näherungsformeln eine sehr gute Übereinstimmung untereinander aufweisen, mit Korrelationskoeffizienten im Bereich von 0,982–0,994. Gleichzeitig weist diese Studie – wenig überraschend – nach, dass der herkömmliche  $BMI$  für das untersuchte Panel mit 0,685 nur eine sehr unzureichende Korrelation zur tatsächlichen Körperoberfläche aufweist [15].

Im Unterschied zu allen bekannten Näherungsformeln bestimmen die durch die Autoren entwickelten Gleichungen die relative Körperoberfläche auf Basis von 3D-Bodyscans an weiblichen (n = 132) und männlichen (n = 49) Probanden (Schlich-Formel, s. Gl. 2 und 3). Dabei bildet die Summe der Bildpunkte (Pixel) eines absolvierten 3D-Bodyscans einen individuellen Avatar, dessen Oberfläche und Volumen berechnet wird. Die nichtlineare Regressionsanalyse der so erhaltenen Daten in Abhängigkeit vom Body-Mass-Index ( $BMI$ ) – getrennt für Frauen und Männer – zeigt eine eindeutige Korrelation  $a = f(BMI)$  und ergibt folgende Näherungsgleichungen für die relative Körperoberfläche  $a$  in der Einheit  $\text{m}^2/\text{kg}$ :

für Frauen (n = 132):  $a = 0,1411 \times BMI^{-0,54} R^2 = 0,947$  (Gl. 2)

für Männer (n = 49):  $a = 0,175 \times BMI^{-0,62} R^2 = 0,917$  (Gl. 3)

Die ermittelten Bestimmtheitsmaße<sup>5</sup>  $R^2$  zeigen sehr deutlich die hohe Qualität der vorliegenden nichtlinearen Näherungsgleichungen [12].

Die Multiplikation mit dem Faktor 10 000<sup>6</sup> führt schließlich zur gesuchten relativen Körperoberfläche  $a$  in der Einheit  $\text{cm}^2/\text{kg}$ , dies zur besseren Veranschaulichung der Größenverhältnisse. Dann lauten die Gleichungen wie folgt:

für Frauen:  $a = 1411 \times BMI^{-0,54}$  in  $\text{cm}^2/\text{kg}$  (Gl. 4) und

für Männer:  $a = 1750 \times BMI^{-0,62}$  in  $\text{cm}^2/\text{kg}$  (Gl. 5).

Gemäß der vorliegenden Gleichungen hängt die relative Körperoberfläche nichtlinear und degressiv vom  $BMI$  ab: Je größer der  $BMI$ , umso kleiner ist die relative Körperoberfläche. Daraus folgt, dass mit zunehmendem  $BMI$  auch die Wärmeab-

gabe an die Umgebung abnehmen dürfte, ein Aspekt, auf den noch einzugehen sein wird.

► Tab. 2 zeigt die Mittelwerte, die Spannbreite (min–max) und die jeweilige Standardabweichung (SD) der seinerzeit empirisch per 3D-Bodyscan gewonnenen Daten von 132 Probandinnen und 49 Probanden.

Die in ► Tab. 2 dargelegten Ergebnisse der anthropometrischen Vermessungen mittels 3D-Bodyscan weisen zusätzlich darauf hin, dass die relative Körperoberfläche von Männern bei identischen anthropometrischen Daten grundsätzlich kleiner als die von Frauen sein dürfte. Dieser Sachverhalt dürfte auf den weiblichen Körperbau zurückzuführen sein und unterstreicht zudem die von mehreren Publikationen vertretene Auffassung, bei Männern und Frauen unterschiedliche Näherungsformeln für die relative Körperoberfläche herzuleiten und zu nutzen [11–13].

## Der Anteil an Körperfett als Parameter der Wärmebilanz

Neben der relativen Oberfläche spielt auch der Wärmedurchgangskoeffizient  $U$ , der beim Säugetier generell von subkutanem Fett und Fellschicht abhängt, eine maßgebliche Rolle beim Wärmeübergang. Beim Menschen wird der Wärmeübergang von der Schichtdicke des subkutanen Fettgewebes und der Kleidung beeinflusst. Grundsätzlich gilt: Je mehr subkutanes Fett als isolierende Schicht vorhanden ist, umso geringer ist die konvektive Wärmeabgabe an die Umgebung. Insofern stellt der Anteil an Körperfett  $x_F$  eines Individuums neben der relativen Oberfläche die zweite wichtige Einflussgröße auf die menschliche Wärmebilanz dar. Diese Größe kann hinreichend genau mittels Bioelektrischer Impedanzanalyse (BIA) individuell bestimmt werden [16].

Dabei liefert die BIA bei der individuellen Analyse der Körperfzusammensetzung eines Menschen als Primärdaten die fettfreie Masse (Fat-Free Mass, FFM), den Wasseranteil (Total Body Water, TBW) und die Körperzellmasse (Body Cell Mass, BCM) als Körperfkompartimente. Mithilfe einer Regressionsanalyse kann daraus die FFM eines Menschen ermittelt und die Fettmasse

<sup>5</sup> Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  ist eine gängige statistische Kenngröße zur Beurteilung der Anpassung von Messwerten an eine Näherungsformel und kann Werte zwischen 0 (kein Zusammenhang) und 1 (perfekter Zusammenhang) annehmen.

<sup>6</sup> Umrechnung:  $1 \text{ m}^2 = 10 000 \text{ cm}^2$

durch Subtraktion der FFM von der Körpermasse hinreichend zuverlässig berechnet werden [17]. Medizinische BIA-Geräte verschiedener Anbieter arbeiten standardmäßig mit Hand- und Fußelektroden und erzeugen dabei Daten ausreichender Genauigkeit.

Der Anteil an Körperfett ist altersabhängig und liegt bei Männern etwa im Bereich zwischen 8 und 45%, bei Frauen etwas höher im Bereich von ca. 14–50%, je nach Ernährungsstatus. Der Anteil an Körperfett kann im Extremfall mit Werten von 5–10% aber auch sehr niedrig sein, wie dies z. B. im professionellen Leistungssport bei Bodybuildern oder bei pathologischen Ernährungsstörungen mit extrem niedriger Körpermasse zu beobachten ist. Der Anteil an Körperfett normalgewichtiger Individuen dürfte für Männer zwischen 15 und 23% und für Frauen zwischen 18 und 26% angenommen werden ([18] 39, 19).

Physiologisch bedeutet dies, dass sich bei zunehmender Fettmasse eines Menschen auch die Schichtdicke des subkutanen Fettgewebes vergrößert. Da diese Schicht wärmeisolierend wirkt, ist der Anteil an Körperfett eines Individuums aus thermodynamischer Sicht umgekehrt proportional zur Abgabe von Wärmeenergie an die Umgebung.

Ernährungsmedizinische Standardwerke und Ausführungen zum Energiehaushalt des Menschen vernachlässigen jedoch in der Regel den Einfluss der individuellen Körperform, der Körperoberfläche und der Körperkompartimente auf die Energiebilanz und Wärmeabgabe eines Menschen ([2] 77). Dies gilt auch für ernährungswissenschaftliche Grundlagenwerke, die sich im Zusammenhang mit dem Thema „Nahrungsenergie“ auch mit der menschlichen Energiebilanz befassen. Körperform, Oberfläche und Körperkompartimente eines Individuums sowie deren Einfluss auf die Energiebilanz und Wärmeabgabe an die Umgebung werden dort nicht erwähnt ([18] 132ff.).

Auch das jüngste Positionspapier der Arbeitsgruppe Sporternährung der Deutschen Gesellschaft für Ernährung (DGE) zum Thema „Energiebedarf im Sport“ befasst sich nicht mit den hier genannten thermodynamischen Einflussgrößen Körperform und relative Oberfläche auf die Wärmeabgabe an die Umgebung. Die Körperzusammensetzung von Sportlern wird lediglich mit Blick auf die fettfreie Masse, nicht aber mit Blick auf das subkutane Fettgewebe und dessen mehr oder weniger wärmeisolierende Wirkung angesprochen [20].

## Aufgabenstellung und Arbeitshypothesen

Aus dem dargelegten Stand des Wissens ergeben sich aus thermodynamischer Sicht die beiden wesentlichen Einflussgrößen auf die Wärmeabgabe an die Umgebung bei sonst gleichen Umgebungsbedingungen:

- die relative Körperoberfläche  $a$  mit positiver, also verstärkender Korrelation und
- der Anteil an Körperfett  $x_F$  mit negativer, also vermindernder Korrelation.

Infofern besteht die hier bearbeitete Aufgabenstellung darin, folgenden Fragen nachzugehen:

1. Wie verändert sich die relative Körperoberfläche  $a$  eines Individuums, dessen Körpermasse  $m$  ab- oder zunimmt? Welche Bedeutung hat dies für die individuelle Energiebilanz?
2. Wie unterscheiden sich männliche und weibliche Individuen mit demselben BMI hinsichtlich der relativen Körperoberfläche  $a$ ? Welche Bedeutung hat dies für deren Energiebilanz?
3. Gibt es eine einfache Kenngröße zur thermodynamischen Klassifizierung von Individuen auf Basis von relativer Oberfläche und Anteil an Körperfett hinsichtlich der individuellen Wärmeabgabe an die Umgebung? Wie könnte ein Vorschlag dazu formuliert sein?

## Arbeitshypothesen

Aus der Thermodynamik ergeben sich für die individuelle Wärmebilanz eines Menschen die nachfolgenden Hypothesen:

1. Untergewichtige Individuen haben eine signifikant größere relative Körperoberfläche  $a$  und gleichzeitig einen geringeren Anteil an Körperfett  $x_F$ . Sie geben daher unter hinsichtlich Kleidung und Umgebungstemperatur standardisierten Bedingungen konvektiv mehr Wärme an die Umgebung ab als normalgewichtige Individuen.
2. Adipöse Individuen haben eine signifikant kleinere relative Körperoberfläche  $a$  und gleichzeitig einen größeren Anteil an Körperfett  $x_F$ . Sie geben daher unter hinsichtlich Kleidung und Umgebungstemperatur standardisierten Bedingungen konvektiv weniger Wärme an die Umgebung ab als normalgewichtige Individuen.
3. Frauen haben bei identischem BMI eine signifikant größere relative Körperoberfläche als Männer, dies aufgrund der weiblichen Anatomie. Infofern ist die Nutzung unterschiedlicher Näherungsformeln für die Körperoberfläche sinnvoll.
4. Eine Kenngröße, die den proportionalen Einfluss der relativen Körperoberfläche  $a$  und den invers proportionalen Einfluss des Anteils an Körperfett  $x_F$  berücksichtigt, ist dazu geeignet, auf einfache Weise eine Klassifizierung von Individuen hinsichtlich deren Thermodynamik vornehmen zu können.

## Methoden

An männlichen und weiblichen Individuen werden mit Hilfe einer BIA-Ganzkörper-Analysewaage mit Hand- und Fußelektroden vom Typ Omron BF 511 folgende Daten erhoben: Körpermasse  $m$  in kg und Anteil an Körperfett  $x_F$  in %.

Hinzu kommt die Messung der Körpergröße  $H$  in m mittels eines mobilen Stadiometers vom Typ seca 213, die Feststellung des Alters in Jahren und des Geschlechts (m/w/d). Auf dieser Basis kann mit Hilfe der oben angegebenen Gl. 4 und 5 die relative Körperoberfläche  $a$  in  $\text{cm}^2/\text{kg}$  berechnet werden.

Zudem wird im Rahmen einer rechnerischen Simulation der Frage nachgegangen, wie sich eine Änderung des BMI in Folge von Zu- oder Abnahme bei einem einzelnen Individuum auf die relative Körperoberfläche auswirken würde. Dabei soll eine gewisse Spannbreite von typischen Einzelfällen abgedeckt werden.

Die rechnerische Simulation wird auch dazu benutzt, Unterschiede in der relativen Körperoberfläche zwischen Männern

► Tab. 3 Anthropometrische Daten von Frauen (n=32) und Männern (n=48).

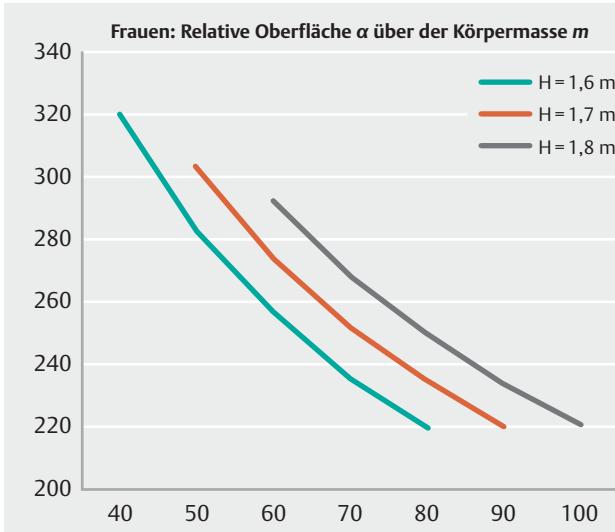
	Frauen	Männer
mittleres Alter in Jahren	26,3 (SD = 6,39)	26,4 (SD = 7,6)
mittlere Körpermasse $m$ in kg	62,2 (SD = 9,50)	80,0 (SD = 8,5)
mittlere Körpergröße $H$ in m	1,7 (SD = 0,05)	1,8 (SD = 0,1)
größte relative Körperoberfläche $a$ in $\text{cm}^2/\text{kg}$	300 <sup>a</sup>	273 <sup>c</sup>
kleinste relative Körperoberfläche ( $\text{cm}^2/\text{kg}$ )	223 <sup>b</sup>	214 <sup>d</sup>
mittlere relative Körperoberfläche ( $\text{cm}^2/\text{kg}$ )	268 (SD = 21)	241 (SD = 23)
mittlerer Anteil an Körperfett $x_F$ in %	29,0 (SD = 7,5)	23,9 (SD = 11,0)

<sup>a</sup> Probandin mit  $m = 50,3 \text{ kg}$  und  $H = 1,69 \text{ m}$  ( $BMI = 17,6 \text{ kg/m}^2$ )

<sup>b</sup> Probandin mit  $m = 82 \text{ kg}$  und  $H = 1,64 \text{ m}$  ( $BMI = 30,5 \text{ kg/m}^2$ )

<sup>c</sup> Proband mit  $m = 66,9 \text{ kg}$  und  $H = 1,83 \text{ m}$  ( $BMI = 21,1 \text{ kg/m}^2$ )

<sup>d</sup> Proband mit  $m = 87,8 \text{ kg}$  und  $H = 1,72 \text{ m}$  ( $BMI = 29,7 \text{ kg/m}^2$ )



► Abb. 2 Relative Körperoberfläche  $a$  in  $\text{cm}^2/\text{kg}$  bei rechnerischer Variation der Körpermasse  $m$  in kg für drei fiktive Probandinnen mit den Körpergrößen  $H = 1,6 \text{ m}$ ,  $H = 1,7 \text{ m}$  und  $H = 1,8 \text{ m}$ .

und Frauen mit identischem  $BMI$  nachzuweisen. Auch hier ist eine gewisse Spannbreite von typischen Einzelfällen abzudecken.

Als einfache Kenngröße zur thermodynamischen Klassifizierung wird das Verhältnis von relativer Körperoberfläche  $a$  (positiv mit der Wärmeabgabe korreliert) und Anteil an Körperfett  $x_F$  (negativ korreliert) gebildet und gemäß Gl. 6 als „Heat Performance Indicator“ definiert:

$$\text{Heat Performance Indicator (HPI): } \text{HPI} = a/x_F \text{ (Gl. 6)}$$

Anhand der empirischen Daten aus den bisher durchgeführten Messreihen und der Definition von Modellindividuen kann mittels Gl. 6 geprüft werden, ob sich auf diese Weise geeignete thermodynamische Klassifizierungen zur Einteilung von Individuen finden lassen würden. Dabei geht es speziell um Individuen wie z. B. Leistungssportler/innen mit geringem Fett- und hohem Muskelanteil, die mithilfe des herkömmlichen  $BMI$  zwar als

übergewichtig klassifiziert werden, obwohl sie nicht adipös sind.

## Ergebnisse

### Relative Körperoberfläche von Frauen und Männern als Funktion der Körpermasse

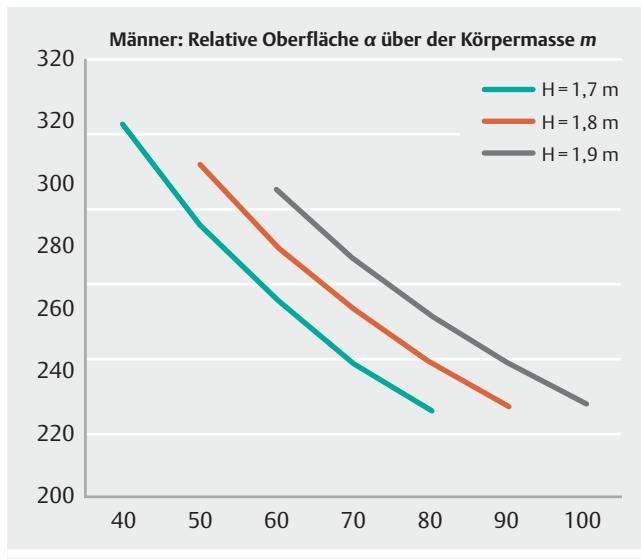
Im Rahmen einer Versuchsreihe an der Universität Koblenz-Landau, Campus Koblenz, Institut für Sportwissenschaft sind anthropometrische Daten an erwachsenen Frauen (n=32) und Männern (n=48) erhoben worden. Zunächst zeigt ► Tab. 3 eine Übersicht zu den Messungen und den darauf beruhenden Ergebnissen der Berechnungen mit Gl. 4 und 5.

Der Vergleich mit den Daten aus eigenen früheren Messungen zeigt vergleichbare Größenordnungen und Streuungen für die relative Körperoberfläche an männlichen und weiblichen Probanden (► Tab. 2).

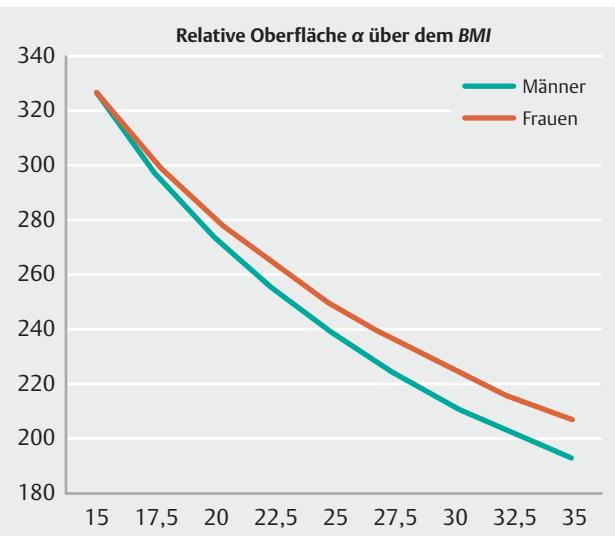
Nachfolgend wird der Frage nachgegangen, wie sich die relative Körperoberfläche eines Individuums bei rechnerischer Variation der Körpermasse und ansonsten identischen anthropometrischen Daten verändert. Die Ergebnisse für drei weibliche Individuen mit den Körpergrößen 1,60 m, 1,70 m und 1,80 m zeigt ► Abb. 2:

Die Ergebnisse zeigen, dass die relative Körperoberfläche jeder Frau signifikant abnimmt, wenn sie an Körpermasse zunimmt. So sinkt die relative Körperoberfläche für eine Frau mit  $H = 1,60 \text{ m}$  von 320 auf  $220 \text{ cm}^2/\text{kg}$ , wenn die Körpermasse von 40 auf 80 kg steigt. Die Veränderungen für die Körpergrößen 1,70 und 1,80 m sind ähnlich deutlich und in ► Tab. 4 angegeben.

Die Abnahme der relativen Körperoberfläche bei zunehmender Körpermasse beträgt ca. 25–30% bezogen auf die Ausgangswerte bei niedriger Körpermasse einer Frau. Umgekehrt zeigt sich, dass die relative Körperoberfläche bei abnehmender Körpermasse um ca. 30–45% zunimmt bezogen auf die Ausgangswerte bei hoher Körpermasse einer Frau. Der Unterschied in den hier angegebenen Prozentwerten für die Zu- und Abnahme beruht darauf, dass im Fall der Zunahme die Ausgangswerte bei niedriger Körpermasse und im Fall der Abnahme die Aus-



► Abb. 3 Relative Körperoberfläche  $\alpha$  in  $\text{cm}^2/\text{kg}$  bei rechnerischer Variation der Körpermasse  $m$  in kg für drei fiktive Probanden mit den Körpergrößen  $H = 1,70\text{ m}$ ,  $H = 1,80\text{ m}$  und  $H = 1,90\text{ m}$ .



► Abb. 4 Relative Körperoberfläche  $\alpha$  in  $\text{cm}^2/\text{kg}$  von Männern und Frauen bei rechnerischer Variation des  $BMI$  in  $\text{m}^2/\text{kg}$ .

► Tab. 4 Veränderung der relativen Körperoberfläche bei sich ändernder Körpermasse von Frauen.

Körpergröße	Körpermasse	relative Körperoberfläche
1,60 m	40 kg	320 $\text{cm}^2/\text{kg}$
	80 kg	220 $\text{cm}^2/\text{kg}$
1,70 m	50 kg	303 $\text{cm}^2/\text{kg}$
	90 kg	220 $\text{cm}^2/\text{kg}$
1,80 m	60 kg	292 $\text{cm}^2/\text{kg}$
	100 kg	221 $\text{cm}^2/\text{kg}$

► Tab. 5 Veränderung der relativen Körperoberfläche bei sich ändernder Körpermasse von Männern.

Körpergröße	Körpermasse	relative Körperoberfläche
1,70 m	50 kg	299 $\text{cm}^2/\text{kg}$
	90 kg	208 $\text{cm}^2/\text{kg}$
1,80 m	60 kg	286 $\text{cm}^2/\text{kg}$
	100 kg	209 $\text{cm}^2/\text{kg}$
1,90 m	70 kg	278 $\text{cm}^2/\text{kg}$
	110 kg	210 $\text{cm}^2/\text{kg}$

gangswerte bei hoher Körpermasse als Basis der Prozentberechnung benutzt werden.

Die Berechnungsergebnisse für Männer der Körpergrößen 1,70 m, 1,80 m und 1,90 m unter Variation der jeweiligen Körpermasse zeigt ► Abb. 3.

Die Ergebnisse an Männern zeigen im Prinzip dasselbe Bild wie an Frauen: Die relative Körperoberfläche nimmt signifikant ab, wenn ein Mann an Körpermasse zunimmt. So sinkt die relative Körperoberfläche für einen Mann mit  $H = 1,70\text{ m}$  von 299 auf 208  $\text{cm}^2/\text{kg}$ , wenn die Körpermasse von 50 auf 90 kg steigt. Die Veränderungen für die Körpergrößen 1,80 und 1,90 m sind ähnlich deutlich und in ► Tab. 5 angegeben.

Die Abnahme der relativen Körperoberfläche bei zunehmender Körpermasse beträgt ebenfalls ca. 25–30 % bezogen auf die Ausgangswerte bei niedriger Körpermasse eines Mannes. Umgekehrt zeigt sich, dass die relative Körperoberfläche bei abnehmender Körpermasse um ca. 30–45 % zunimmt bezogen auf die Ausgangswerte bei hoher Körpermasse eines Mannes. Der Unterschied in den hier angegebenen Prozentwerten für die Zu- und Abnahme beruht auch hier darauf, dass im Fall der Zunahme die Ausgangswerte bei niedriger Körpermasse und im Fall der Abnahme die Ausgangswerte bei hoher Körpermasse als Basis der Prozentberechnung benutzt werden.

### Vergleich zwischen männlichen und weiblichen Erwachsenen

Den Vergleich zwischen Männern und Frauen bei identischem  $BMI$  zeigt ► Abb. 4.

Daraus geht hervor, dass die relative Körperoberfläche von Männern grundsätzlich geringer ist als die von Frauen, wobei die Differenz bei sehr niedrigem  $BMI$  gegen Null geht. Mit zunehmendem  $BMI$  nimmt die Differenz der relativen Körperoberfläche zwischen Männern und Frauen deutlich zu und erreicht bei sehr hohem  $BMI$  Werte von mehr als 10 %.

### Heat Performance Indicator

Abschließend zeigt ► Tab. 6 quantitativ die Ergebnisse der Berechnung des hier vorgeschlagenen Heat Performance Indicators ( $HPI$ ):

► Tab. 6 Heat Performance Indicator (HPI) – größter, kleinster und mittlerer Wert – von Frauen (n = 32) und Männern (n = 48).

	Frauen	Männer
größter gefundener HPI	17,0 <sup>a</sup>	32,2 <sup>c</sup>
kleinster gefundener HPI	4,4 <sup>b</sup>	6,6 <sup>d</sup>
mittlerer HPI	10,0 (SD = 3,3)	14,7 (SD = 5,4)

<sup>a</sup> Probandin mit  $m = 58,0 \text{ kg}$ ,  $H = 1,75 \text{ m}$ ,  $x_F = 17\%$  ( $BMI = 18,9 \text{ kg/m}^2$ )  
<sup>b</sup> Probandin mit  $m = 85,0 \text{ kg}$ ,  $H = 1,63 \text{ m}$ ,  $x_F = 49\%$  ( $BMI = 32,0 \text{ kg/m}^2$ )  
<sup>c</sup> Proband mit  $m = 66,9 \text{ kg}$ ,  $H = 1,83 \text{ m}$ ,  $x_F = 8,5\%$  ( $BMI = 20,0 \text{ kg/m}^2$ )  
<sup>d</sup> Proband mit  $m = 85,0 \text{ kg}$ ,  $H = 1,80 \text{ m}$ ,  $x_F = 35\%$  ( $BMI = 26,2 \text{ kg/m}^2$ )

Die große Spannbreite und die resultierende Standardabweichung deuten darauf hin, dass die hier gezeigte **quantitative** Ergebnisdarstellung bei der geringen Zahl an Probanden nicht weiterführt. Vielmehr kann der *HPI* eine **qualitative** Beurteilung der Wärmebilanz eines Individuums darstellen. Denn eine **geringe** relative Körperoberfläche in Verbindung mit **hohem** Anteil an Körperfett führt aufgrund der Definition dieser Kenngröße rechnerisch zu **geringen** *HPI*-Werten. Diese Parameterkombination trifft auf adipöse Menschen zu, die deshalb – aus thermodynamischer Sicht – grundsätzlich eine **niedrige** Wärmeabgabe (Heat Performance) an die Umgebung aufweisen.

In der Umkehrung führt eine **große** relative Körperoberfläche in Verbindung mit **niedrigem** Anteil an Körperfett rechnerisch zu **großen** *HPI*-Werten. Diese Parameterkombination trifft auf untergewichtige Menschen zu, die deshalb – aus thermodynamischer Sicht – grundsätzlich eine **hohe** Wärmeabgabe (Heat Performance) an die Umgebung aufweisen.

Die beiden genannten Fallgruppen beziehen sich auf Individuen, die auch mithilfe des herkömmlichen *BMI* als überge-

wichtig oder untergewichtig klassifizierbar sind. Besonderes Augenmerk gilt daher im Folgenden Individuen, die nicht in diese Fallgruppen passen. Dazu zählen zum einen die Parameterkombination von geringer relativer Körperoberfläche mit geringem Anteil an Körperfett und zum anderen die Parameterkombination von großer relativer Körperoberfläche mit hohem Anteil an Körperfett. ► Tab. 7 stellt nachfolgend rechnerische Ergebnisse von individuellen Subjekten vor, die einen hohen *BMI* aufweisen.

Die Ergebnisse aus ► Tab. 7 zeigen deutlich, dass der *BMI* fälschlicherweise immer dann auf Adipositas deutet, wenn es sich um Individuen mit niedrigem Fett- und hohem Muskelanteil handelt. Der Heat Performance Indicator (*HPI*) gibt jedoch in beiden Fällen richtig wieder, dass diese Individuen nicht adipös sind, sondern aufgrund des niedrigen Anteils an Körperfett eine hohe Wärmeabgabe an die Umgebung aufweisen.

Den rechnerischen Vergleich von Menschen mit mittleren *BMI*-Werten (sog. Normalgewicht) zeigt ► Tab. 8. Hier wird der *HPI* von Menschen mit mittlerem und niedrigem Anteil an Körperfett, aber identischem *BMI* gebildet und gegenübergestellt.

Im Ergebnis zeigt sich, dass der *HPI* im Bereich von „Normalgewicht“ die tatsächliche Thermodynamik eines Individuums besser abbilden kann als der *BMI*. Individuen mit niedrigem Anteil an Körperfett geben aufgrund dessen im Berechnungsmodell erheblich mehr Wärme an die Umgebung ab, sodass der *HPI* deutlich größere Werte zeigt.

## Diskussion

Die erste vorgestellte Arbeitshypothese, nach der untergewichtige Menschen unter standardisierten Bedingungen konvektiv mehr Wärme an die Umgebung abgeben als normalgewichtige Individuen, kann mit den vorliegenden Messungen und rechnerischen Simulationen bestätigt werden. Die höhere Wärme-

► Tab. 7 Heat Performance Indicator (HPI) für hohe *BMI*-Werte – Adipositas vs. Leistungssport.

Parameterkombination	$x_F$ (%)	BMI $\text{kg/m}^2$	$a$ $\text{cm}^2/\text{kg}$	HPI	Bewertung
männlich: $m = 120 \text{ kg}$ , $H = 1,90 \text{ m}$	32%	33,2	199	6,22	niedriger <i>HPI</i> : Adipositas
	12%			16,6	großer <i>HPI</i> : Leistungssport
weiblich: $m = 100 \text{ kg}$ , $H = 1,80 \text{ m}$	35%	30,9	234	6,7	niedriger <i>HPI</i> : Adipositas
	15%			15,6	großer <i>HPI</i> : Leistungssport

► Tab. 8 Heat Performance Indicator (HPI) für normale *BMI*-Werte – Normalgewicht vs. Leistungssport

Parameterkombination	$x_F$ (%)	BMI $\text{kg/m}^2$	$a$ $\text{cm}^2/\text{kg}$	HPI	Bewertung
männlich: $m = 72 \text{ kg}$ , $H = 1,80 \text{ m}$	22%	22,22	256	11,64	Normalgewicht
	12%			21,33	Leistungssport
weiblich: $m = 60 \text{ kg}$ , $H = 1,70 \text{ m}$	25%	20,76	274	10,96	Normalgewicht
	15%			18,27	Leistungssport

► Tab. 9 Vorschlag zur thermodynamischen Klassifizierung mittels Heat Performance Indicator (HPI).

Bezeichnung	Ultra-Low-Performer	Low-Performer	Ideal-Performer	High-Performer	Ultra-High-Performer
HPI-Werte	<6	6–9,9	10–14,9	15–19,9	>20

abgabe ist die Folge von signifikant größerer relativer Körperoberfläche bei gleichzeitig niedrigerem Anteil an wärmeisolierendem subkutanem Fett.

In der Umkehrung gilt gemäß der zweiten Arbeitshypothese, dass gemäß *BMI* übergewichtige Menschen eine signifikant kleinere relative Körperoberfläche aufweisen. Allerdings sind hier zwei Gruppen zu unterscheiden: Menschen mit viel und solche mit wenig Körperfett. Die erste Gruppe – großer *BMI* und viel Körperfett (= adipös) – gibt signifikant weniger Wärme an die Umgebung ab als normalgewichtige Menschen. Die gemessenen Daten und die rechnerischen Simulationen weisen nach, dass Individuen mit großem *BMI* und wenig Körperfett mittels *BMI* zwar als übergewichtig klassifiziert werden, aber nicht adipös sind. Vielmehr weisen sie eine deutlich höhere Wärmeabgabe an die Umgebung auf. Bemerkenswert scheint zudem, dass die traditionelle Berechnung des Grundumsatzes hier nicht zwischen viel und wenig Körperfett unterscheidet, weil in die gängigen Berechnungsformeln lediglich die Parameter Alter, Geschlecht, Körpermasse und Körpergröße einbezogen sind.

Die dritte Arbeitshypothese, wonach Frauen grundsätzlich eine größere relative Körperoberfläche als Männer desselben *BMI* aufweisen, ist durch die empirischen Daten der seinerzeit vorgenommenen 3D-Bodyscans belegt. Die rechnerische Simulation zeigt eine mit dem *BMI* zunehmende Differenz zwischen Männern und Frauen. Daraus folgt, dass Frauen unter sonst gleichen Bedingungen mehr Wärme an die Umgebung abgeben als Männer. Gleichzeitig weisen Frauen aber einen höheren Anteil an Körperfett als Männer auf, sodass der thermodynamische Effekt der größeren relativen Oberfläche durch mehr wärmeisolierendes subkutanes Fett kompensiert werden kann. Möglicherweise wäre hier auch eine thermodynamische Begründung für den grundsätzlich größeren Anteil an Körperfett weiblicher Individuen zu finden. Zusätzlich sei darauf hingewiesen, dass stark untergewichtige Frauen (*BMI*<17) eine extrem große relative Körperoberfläche mit Werten von mehr als 300 cm<sup>2</sup>/kg bei gleichzeitig sehr wenig subkutanem Fettgewebe aufweisen. Deshalb ist die Wärmeabgabe an die Umgebung sehr hoch. Letztlich resultiert daraus ein sich selbstverstärkender Effekt einer ggf. vorhandenen Anorexie, da die Energiebilanz deutlich negativ ist. Dies gilt im Prinzip auch für untergewichtige Männer, da sich die relativen Körperoberflächen von Männern und Frauen bei niedrigem *BMI* praktisch nicht mehr unterscheiden (► Abb. 4).

Die vierte dargelegte Arbeitshypothese, wonach ein Heat Performance Indicator (HPI) als Verhältnis der relativen Körperoberfläche  $\alpha$  in cm<sup>2</sup>/kg zum Anteil an Körperfett  $x_F$  in % eine thermodynamische Klassifizierung von Individuen erlaube, kann für Individuen mit großem *BMI* definitiv bestätigt werden. Menschen mit niedrigem und mit großem Anteil an Körperfett,

aber identischem *BMI* können deutlich voneinander abgegrenzt werden (► Tab. 7). So sind Leistungssportler mit hohem Muskel- und wenig Anteil an Körperfett thermodynamisch zutreffend durch einen großen HPI gekennzeichnet, weil sie viel Wärme an die Umgebung abgeben, dies aufgrund der Kombination von großer relativer Oberfläche mit wenig subkutanem Fett.

Auch bei normalgewichtigen Individuen zeigt der HPI deutliche Unterschiede, abhängig vom gemessenen Anteil an Körperfett. Menschen mit wenig subkutanem Fett und daher mehr Muskeln weisen erheblich größere HPI-Werte auf als Menschen mit mehr Anteil an Körperfett. Dies kann der traditionelle *BMI* nicht abbilden (► Tab. 8).

Grundsätzlich zeigt sich, dass die hier vorgestellte Überlegung, große relative Körperoberfläche und geringer Anteil an Körperfett führen zu hoher Wärmeabgabe, während kleine relative Oberfläche mit großem Anteil an Körperfett zu niedriger Wärmeabgabe an die Umgebung, zielführendes Potenzial bei der thermodynamischen Klassifizierung von Individuen aufweist. Insofern scheint die hier vorgenommene probeweise Definition eines Heat Performance Indicator (HPI) als Verhältnis der beiden Einflussgrößen gemäß Gl. 6 durchaus vielversprechend, zumal die Grundlagen dafür – die Körpermasse  $m$  (kg), die Körpergröße  $H$  (m) und der Anteil an Körperfett  $x_F$  (%) – messtechnisch in der ernährungsmedizinischen Praxis leicht zugänglich sind. Über den *BMI* kann für Männer und Frauen zunächst die relative Körperoberfläche  $\alpha$  in cm<sup>2</sup>/kg gemäß Gl. 4 und 5 berechnet werden. Anschließend entsteht per Division durch den Anteil an Körperfett in % der Heat Performance Indicator (HPI).

Abschließend seien hier erste Überlegungen zur Klassifizierung von Menschen hinsichtlich ihrer Wärmeabgabe an die Umgebung unter Verwendung des HPI dargelegt. Unter dem Vorbehalt der bis dato eher geringen Zahl von Probandinnen und Probanden und der noch nicht erfolgten breiteren klinischen Erprobung stellt die nachfolgende ► Tab. 9 lediglich eine Diskussionsgrundlage für weitere Forschungsarbeiten dar.

Zur Verdeutlichung dieses Vorschlags zur Klassifizierung sollen in ► Tab. 10 drei Probandinnen derselben Körpergröße und derselben Körpermasse, aber unterschiedlicher Anteil an Körperfett miteinander verglichen werden.

Die Berechnung des HPI von Probandinnen, die sich lediglich durch ihren Anteil an Körperfett unterscheiden, zeigt, dass Probandin A – geringer Fett- und im Umkehrschluss hoher Muskelanteil – als High-Performer klassifiziert wird, da sie viel Wärme in die Umgebung abgibt. Probandin C – hoher Fett- und geringer Muskelanteil – fällt mit HPI=7,4 in die Klasse der Low-Performer, mit vergleichsweise wenig Wärmeabgabe in die Umgebung. Probandin B liegt als Ideal-Performer hinsichtlich ihres HPI-Werts im Mittelfeld.

► Tab. 10 Theoretischer Vergleich dreier Probandinnen mittels HPI-Klassifizierung.

Probandin	Größe, Körpermasse, BMI	Anteil an Körperfett	HPI: Klassifizierung
A	$H = 1,70\text{ m}$ $m = 75\text{ kg}$ $BMI = 25,96\text{ kg/m}^2$	13%	18,7: High-Performer
B		23%	10,6: Ideal-Performer
C		33%	7,4: Low-Performer

Abschließend sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die hier vorgenommene Definition des Heat Performance Indicator (HPI) und die darauf aufbauende Klassifizierung gemäß ► Tab. 9 als Vorschlag zu verstehen ist, der im Rahmen der Diskussion der bis dato vorliegenden Ergebnisse entstanden ist. Die eher geringe Zahl von Probanden/innen und die fehlende klinische Erprobung in der ernährungsmedizinischen Praxis stellen eine Limitierung der getroffenen Aussagen dar und sollen zu weiteren Forschungsarbeiten interessanter Arbeitsgruppen anregen. Zudem müsste auch die zusätzliche Abgabe thermischer Energie an die Umgebung bei der Verrichtung mechanischer Arbeit in umfangreichen Versuchsreihen ermittelt werden, wobei Körpermasse, Größe, Lebensalter und Geschlecht sowie Körperzusammensetzung der Probanden als Parameter zu berücksichtigen wären.

## Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit thermodynamischen Einflussgrößen auf die Wärmebilanz des Menschen als homoiothermes Lebewesen. Danach korreliert die relative Körperoberfläche als Verhältnis von Oberfläche zur Körpermasse positiv und der Anteil an Körperfett wegen der isolierenden subkutanen Fetschicht negativ mit der Abgabe von Wärme an die Umgebung. Mithilfe von gut etablierten Näherungsformeln für Männer und Frauen kann die relative Körperoberfläche individuell berechnet werden. Der Anteil an Körperfett ist durch die Bioelektrische Impedanzanalyse messtechnisch gut erfassbar.

Im Ergebnis zeigt sich, dass die relative Körperoberfläche mit zunehmendem BMI abnimmt und umgekehrt. Zudem weisen Frauen bei identischem BMI grundsätzlich eine signifikant größere relative Körperoberfläche als Männer auf, verbunden mit einem größeren Anteil an Körperfett.

Thermodynamisch bedeutet dies im Grundsatz, dass adipöse Menschen konvektiv weniger Wärme an die Umgebung abgeben, dies wegen ihrer geringeren relativen Körperoberfläche in Verbindung mit dem größeren Anteil an Körperfett. Damit wird die Energiebilanz negativ, sodass die Adipositas weiter steigen kann. Untergewichtige Menschen hingegen geben konvektiv mehr Wärme an die Umgebung ab, dies wegen ihrer größeren relativen Körperoberfläche in Verbindung mit weniger subkutanem Fett. Damit wird deren Energiebilanz negativ.

Die genannten Effekte verstärken sich zudem bei normaler Energiezufuhr durch Lebensmittel selbst.

Der in vorliegendem Zusammenhang hier erstmals definierte „Heat Performance Indicator“ als Quotient aus relativer Körperoberfläche in  $\text{cm}^2/\text{kg}$  und Anteil an Körperfett in % kann die Wärmebilanz eines Menschen thermodynamisch gut klassifizieren. Allerdings stellen die eher geringe Zahl an Probanden und die noch fehlende ernährungsmedizinische Erprobung limitierende Faktoren der getroffenen Aussagen dar, sodass weitere Forschungsarbeiten zur Absicherung erforderlich sind.

## Interessenkonflikt

Die Autorinnen/Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

## Literatur

- [1] Baehr HD, Kabelac S. Thermodynamik. Grundlagen und technische Anwendungen. 16. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2016. doi:10.1007/978-3-662-49568-1
- [2] Kreymann KG. Energiehaushalt. In: Biesalski HK, Pirlich M, Bischoff SC et al., Hrsg. Ernährungsmedizin. 5. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2017
- [3] Kraft T, Brenner B. Muskulatur. In: Pape HC, Kurtz A, Silbernagl S, Hrsg. Physiologie. 9. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2019: 158
- [4] Chudecka M, Lubkowska A, Kempinska-Podhorodecka A. Body surface temperature distribution in relation to body composition in obese women. J Therm Biol 2014; 43: 1–6. doi:10.1016/j.jtherbio.2014.03.001
- [5] Savastano DM, Gorbach AM, Eden HS et al. Adiposity and human regional body temperature. Am J Clin Nutr 2009; 90: 1124–1131. doi:10.3945/ajcn.2009.27567
- [6] Adams JD, Ganio MS, Burchfield JM et al. Effects of obesity on body temperature in otherwise-healthy females when controlling hydration and heat production during exercise in the heat. Eur J Appl Physiol 2015; 1: 167–176. doi:10.1007/s00421-014-3002-y
- [7] Marshall PT, Hughes GM. Die Physiologie der Säugetiere und anderer Wirbeltiere. Basel: Springer; 1973: 29ff. doi:10.1007/978-3-0348-5963-9
- [8] Schlichting HJ, Rodewald B. Von großen und kleinen Tieren. Praxis der Naturwissenschaften – Physik 1988; 5/2: 37
- [9] DuBois D, DuBois EF. A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. Arch Intern Med 1916; 17: 863–871
- [10] Looney DP, Sanford DP, Li P et al. Formulae for calculating body surface area in modern U.S. Army Soldiers. J Ther Bio 2020; 92. doi:10.1016/j.jtherbio.2020.102650
- [11] Kuehnappel A, Ahnert P, Loeffler M et al. Body surface assessment with 3D laser-based anthropometry: reliability, validation, and improvement of empirical surface formulae. Eur J Appl Physiol 2017; 117: 371–380. doi:10.1007/s00421-016-3525-5
- [12] Schlich E, Schumm M, Schlich M. 3D-Body-Scan als anthropometrisches Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Körperoberfläche. ErnährungsUmschau 2010; 57: 178–183
- [13] Tikuisis P, Meunier P, Jubenville CE. Human body surface area: measurement and prediction using three dimensional body scans. Eur J Appl Physiol 2001; 85: 264–271

- [14] Neri L, Gurevich K, Zarya Y et al. Practice Patterns and Outcomes of Online Hemodiafiltration: A Real-World Evidence Study in a Russian Dialysis Network. *Blood Purif* 2020; doi:10.1159/000510551
- [15] Sharma M, Suri NM, Kant S. Comparative Analysis of Different Body Surface Area Estimates among Group of Metal Casting Workers. *Int Res J App Sci (IRJASET)* 2020; 10. doi:10.22214/ijraset.2020.31951
- [16] Reljic D, Herrmann HJ, Neurath MF et al. Bioelektrische Impedanzanalyse (BIA) – Grundlagen und Anwendung. *ErnährungsUmschau* 2019; 66: M474–M485. doi:10.4455/eu.2019.039
- [17] Kyle U, Bosaeus I, de Lorenzo AD et al. Bioelectrical impedance analysis. Part I: review of principles and methods. *Clin Nutr* 2004; 23: 1226–1243. doi:10.1016/j.clnu.2004.06.004
- [18] Elmadfa I, Leitzmann C. Ernährung des Menschen. 6. Aufl., 8036 utb; 2019
- [19] Gallagher D, Heymsfield StB, Heo M et al. Healthy percentage body fat ranges: an approach for developing guidelines based on body mass index. *Am J Clin Nutr* 2000; 72: 694–701. doi:10.1093/ajcn/72.3.694
- [20] Braun H, Carlson A, Großhauser M et al. Energiebedarf im Sport. Position der Arbeitsgruppe Sporternährung der Deutschen Gesellschaft für Ernährung e. V. (DGE). *ErnährungsUmschau* 2019; 66: 146–153. doi:10.4455/eu.2019.040

