

Die Körperoberfläche des Menschen dominiert den Wärmeaustausch mit der Umgebung. Der *BMI* als anthropometrisches Maß bezieht aber nicht die wahre Körperoberfläche, sondern nur eine Annäherung – die Körperhöhe zum Quadrat – in die Berechnung ein. Anhand von 3D-Body-Scans von 188 Testpersonen werden die wahre Körperoberfläche und die daraus resultierenden anthropometrische Maße *a* und *AMI* berechnet und mit dem *BMI* von Personen unterschiedlicher Statur verglichen.

3D-Body-Scan als anthropometrisches Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Körperoberfläche



Prof. Dr.-Ing.
Elmar Schlich¹
E-Mail: elmar.schlich
@uni-giessen.de

¹Justus Liebig Universität
Gießen
Fachbereich Agrarwissen-
schaften, Ökotropologie
und Umweltmanagement
Stephanstr. 24, 35390 Gießen

²Universität Koblenz-Landau
Ernährungs- und Verbrau-
cherbildung
Institut für Management,
Universitätsstr. 1,
56070 Koblenz

Interessenkonflikt

Die Autoren erklären, dass kein Interessenkonflikt im Sinne der Richtlinien des International Committee of Medical Journal Editors besteht.

Die Energiebilanz des Menschen wird von zahlreichen Parametern bestimmt. Einer dieser Parameter ist die Körperoberfläche, über die der Mensch Wärme an die Umgebung abgibt. Die Energiezufuhr hängt unter der Voraussetzung normaler Umgebungstemperaturen nur von Umfang und Art der täglichen Lebensmittelaufnahme ab¹. Folgerichtig beziehen sich Diätvorschläge, die zum Zweck der Zu- oder Abnahme der Körpermasse angeraten werden, auf quantitative und qualitative Aspekte der Lebensmittelaufnahme.

Zahlreiche Parameter, die Einfluss auf den Stoff- und Energieumsatz des Menschen ausüben, sind ernährungswissenschaftlich umfangreich untersucht. Dazu gehören insbesondere die Körpermasse und -zusammensetzung, die über die Messung von Fettmasse, Muskelmasse, Skelettmasse und Restmasse anhand verschiedener Methoden bestimmt werden können (stellvertretend für die zahlreiche Literatur hierzu siehe [1, 2]).

¹Erst bei Umgebungstemperaturen, die höher als die Körpertemperatur sind, stimmt diese Aussage nicht mehr uneingeschränkt.

²Berechnung gemäß Leistung = Energie/Zeit: $P = E/t = 10 \text{ MJ}/24 \text{ h}/3600 \text{ s} = 115,7 \text{ W}$.

Bedeutung der Körperoberfläche für die Energiebilanz und deren Messung

Die Körperoberfläche des Menschen hat für die Energieabgabe an die Umgebung erhebliche Bedeutung. Dies wird im nachfolgenden Beispiel dargelegt: Eine über den Tag verteilte Energiezufuhr durch Lebensmittel von z. B. $E = 10 \text{ MJ}$ entspricht rechnerisch einer mittleren Leistung von $P = 115,7 \text{ W}^2$. Für den Fall einer ausgeglichenen Energiebilanz muss diese Leistung auch wieder in die Umgebung abgegeben werden. Schätzungen gehen davon aus, dass die Wärmeabgabe über die Körperoberfläche an die Umgebung als Teil des Energieumsatzes bis zu 60–70 % der oben angegebenen mittleren Leistung beträgt [3]. Dies würde einer mittleren Wärmeleistung von ca. 70–80 W entsprechen, die permanent an die Umgebung abgegeben wird. Gemäß Gleichung 1 ist die Körperoberfläche A neben dem Wärmeübergangskoeffizienten α und der treibenden Temperaturdifferenz ΔT ein die Wärmeleistung bestimmender Faktor [4].

$$dQ/dt = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \quad (\text{Gl. 1}).$$

Wenn nun Probanden hinsichtlich ihrer Wärmeabgabe an die Umgebung mit-

Weitere Autoren:

M. Sc. Melitta Schumm¹

Dr. Michaela Schlich²

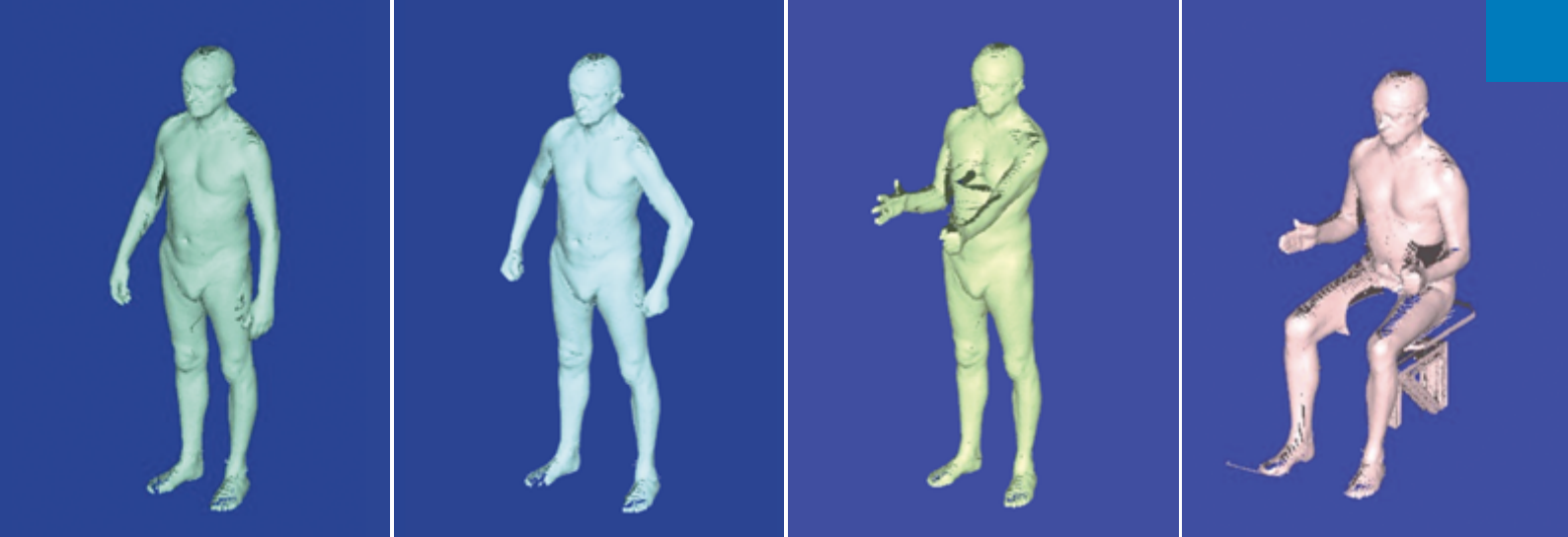


Abb. 1: Die vier Testpositionen für einen vollständigen 3D-Body-Scan
Die Testpersonen, deren Avatar hier gezeigt wird, sind mit der Publikation der Bilder einverstanden.

einander verglichen werden sollen, zeigt sich der Einfluss der Körperoberfläche auf die Wärmeabgabe, sofern unter Laborbedingungen sowohl der Wärmeübergangskoeffizient, der u. a. von Bekleidung und Luftbewegung abhängt, als auch die Umgebungstemperatur konstant gehalten werden.

Die messtechnisch exakte Bestimmung der Körperoberfläche würde es gestatten, den Anteil der Wärmeabgabe eines Menschen am Energieumsatz zu quantifizieren und daraus Schlussfolgerungen im Verhältnis zur Wärme erzeugenden Muskelmasse zu ziehen. Zur systematischen Einordnung der erhaltenen Daten können die Messwerte der Körperoberfläche zudem auf die Körpermasse m bezogen werden. Die so erhaltene Kenngröße ist die spezifische Körperoberfläche a , mit deren Hilfe Probanden unterschiedlicher Statur miteinander verglichen werden. Dabei soll die Hypothese geprüft werden, ob Menschen mit schlanker Statur eine größere spezifische Körperoberfläche aufweisen und sich somit signifikant von Menschen mit gedrungener Statur unterscheiden.

Bisher sind Messtechniken zur Bestimmung des Körpervolumens bekannt wie etwa die Hydrodensitometrie (HD) [5, 6] sowie die Air Displacement Plethysmography (ADP) [7, 8]. Beide Verfahren gestatten jedoch nicht die Messung oder Berechnung der Körperoberfläche. So ist die Bestimmung der Körperoberfläche bisher auf Schätzgleichungen wie die Näherungsformel nach Dubois angewiesen [9, 10]. Auch die Compliance

Größe	Bedeutung	Einheit
A	Körperoberfläche	m^2
a	Spezifische Körperoberfläche	m^2/kg
ADP	Air Displacement Plethysmographie	–
AMI	Area Mass Index	kg/m^2
BMI	Body Mass Index	kg/m^2
d	Differential	–
dQ/dt	Differential der Wärme nach der Zeit, Wärmeleistung	W, kW
E	Energie	J, kJ, MJ
H	Körperhöhe	m
HD	Hydrodensitometrie	–
m	Körpermasse	kg
n	Nummer der Testperson	–
P	Leistung, Energiestrom	W, kW
Q	Wärme	J, kJ
R^2	Bestimmtheitsmaß	–
T	Temperatur	K, °C
t	Zeit	s
α	Wärmeübergangskoeffizient	$W/m^2/K$
ΔT	Temperaturdifferenz	K

³Nach DIN werden Größen *kursiv* und Einheiten *nicht kursiv* geschrieben. Daher steht „m“ für die Körpermasse in kg, während „m“ die Einheit Meter bedeutet.

Liste der verwendeten Größen, Einheiten und Abkürzungen*

für die genannten Messtechniken lässt zu wünschen übrig. Ein Verfahren zur Messung der Körperoberfläche am Menschen sollte berührungsfrei, schnell und reproduzierbar arbeiten.

³Hohensteiner Institute, Schloss Hohenstein, D-74357 Bönningheim. URL: www.hohenstein.de/
⁴Human Solutions GmbH, Europaallee 10, D-67657 Kaiserslautern. URL: www.human-solutions.com/

D-Body-Scan als anthropometrische Methode

Die Messung der wahren Körperoberfläche eines Menschen beruht in der vorliegenden Untersuchung auf dem sogenannten 3D-Body-Scan [11]. Dies ist ein mobiles Messsystem, das die Hohensteiner Institute³ und die Firma Human Solutions GmbH⁴ nutzen, um Abmessungen der Bevöl-

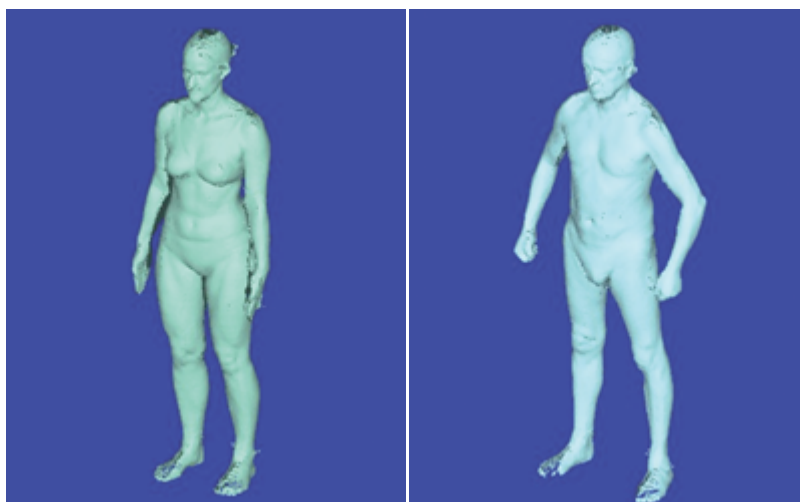
kerung für die Bekleidungsbranche zu erheben.

3D-Body-Scan stellt ein schnelles, berührungsfreies System dar, das den Körper mit roten Laserstrahlen niedriger Energie abtastet. Das System besteht aus vier Säulen, die in den Ecken eines Quadrats mit der Testperson im Zentrum angeordnet sind. Jede der Säulen ist mit Laser und Kameras auf einem vertikal beweglichen Schlitten ausgestattet. Das optische System muss senkrecht und horizontal kalibriert werden, damit die Laserstrahlen eine präzise optische Ebene bilden. Die Kalibrierung gelingt mit Hilfe von Testkörpern (Dummies) bekannter Abmessungen.

Zu Beginn einer Messung befinden sich die vier Schlitten an der Spitze der Säulen. Die Testpersonen, die mit nicht reflektierender Unterwäsche und Badekappen ausgestattet sind, befinden sich exakt in der Mitte auf entsprechenden Markierungen. Die Schlitten fahren gleichzeitig parallel nach unten und wieder nach oben, unter Aussendung roter Laserstrahlen bei kontinuierlicher Aufzeichnung durch die Kameras. Ein solcher Scan dauert 12 Sekunden. Vier verschiedene Positionen werden analysiert (◆ Abbildung 1):

- Pos. 1: entspannt stehend, mit geöffneten Händen
- Pos. 2: gespannt stehend, mit geschlossenen Fäusten
- Pos. 3: stehend, linker Arm horizontal ausgestreckt, rechter Ellbogen gebeugt
- Pos. 4: sitzend, mit beiden Ellbogen gebeugt

Dies garantiert eine vollständige Erfassung des menschlichen Körpers. Insgesamt dauert die Vermessung der vier Positionen maximal 2 Minuten. Als Ergebnis des 3D-Body-Scans entsteht im Rechner für jede Testperson ein Avatar als dreidimensionale Punktwolke. Jeder Avatar kann rechnerisch als Polygon dargestellt und analysiert werden, so dass alle Abmessungen und die wahre Oberfläche A der Testperson vorliegen. ◆ Abbildung 2 zeigt typische Avatare als



Weibliche Testperson in Position 1
($m = 58 \text{ kg}$, $H = 1,70 \text{ m}$; $BMI = 20,07$)

Männliche Testperson in Position 2
($m = 74 \text{ kg}$, $H = 1,82 \text{ m}$; $BMI = 22,34$)

Abb. 2: Weiblicher und männlicher Avatar als Ergebnis eines 3D-Body-Scans*

*Die Testpersonen, deren Avatar hier gezeigt wird, sind mit der Publikation der Bilder einverstanden.

Beispiel. Anonymisierte Datensätze enthalten für jede Testperson eine laufende Nummer, Geschlecht, Alter, ethnische Herkunft, Körperhöhe H , Körpermasse m und die tatsächliche Körperoberfläche A . Daraus entstehen abschließend anthropometrische Kennwerte. Dies sind zunächst der traditionelle BMI nach QUETELET [12] sowie die spezifische Oberfläche a gemäß Gleichung 4:

$$BMI = m/H^2 \text{ und } a = A/m \quad (\text{Gl. 4}).$$

Dabei fällt auf, dass die spezifische Oberfläche a hinsichtlich der Einheiten nichts anderes als den Kehrwert des BMI darstellt. Physiologisch wäre das nur zutreffend, wenn das Quadrat der Körperhöhe H als Nenner im BMI in der Tat ein Maß für die Körperoberfläche A wäre. Zur weiteren Untersuchung der Frage, ob bzw. in welchem Maß dies zutrifft, werden zusätzlich auch die Kehrwerte der spezifischen Körperoberfläche a gebildet und im Folgenden als Area Mass Index (AMI) bezeichnet (siehe Gleichung 5).

$$AMI = a^{-1} = m/A \quad (\text{Gl. 5}).$$

Der Area Mass Index AMI ergibt sich also aus dem Verhältnis der Körpermasse zur wahren Körperoberfläche des Menschen und unterscheidet sich somit definitorisch vom BMI .

Zur Analyse der erhaltenen Ergebnisse werden die spezifische Körperoberfläche und der Area Mass Index getrennt nach weiblichen und männlichen Erwachsenen über dem BMI aufgetragen. Der letzte Schritt interpoliert die gemessenen Daten unter Ableitung von Regressionsgleichungen mit den zugehörigen Bestimmtheitsmaßen.

Ergebnisse und Diskussion

Insgesamt liegen Datensätze von 188 Testpersonen vor. Sieben Datensätze beziehen sich auf Kinder, 132 Datensätze auf weibliche Testpersonen im Alter von 20 bis 84 Jahren sowie 49 Datensätze auf männliche Testpersonen im Alter von 21 bis 68 Jahren.

Ergebnisse bei weiblichen Testpersonen

Die sich aus den Datensätzen der weiblichen Testpersonen ergebenden AMI -Werte gemäß Gl. 5 sind über den zugehörigen BMI -Werten in ◆ Abbildung 3 als Koordinaten aufgetragen. Zur Verdeutlichung der Unterschiede zwischen AMI und BMI zeigt die Abbildung auch eine gestrichelte Linie für den theoretischen Fall $AMI = BMI$. Die lineare Regressionsanalyse der Koordinaten ergibt folgende Be-

Glossar:

- Avatar = 3-D-Bild als virtuelle Person
- Polygon = Vieleck

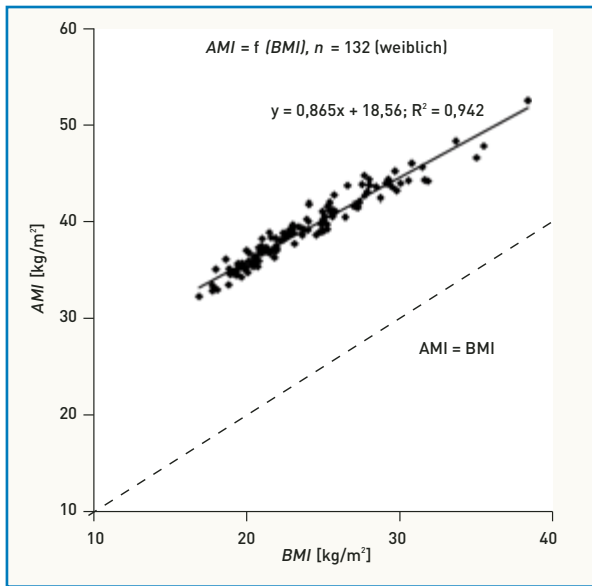


Abb. 3: Area Mass Index AMI als Funktion des BMI , $n = 132$ (weiblich)

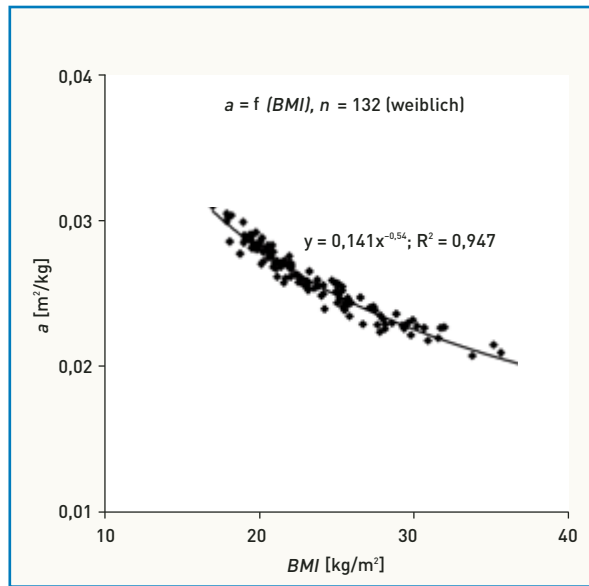


Abb. 4: Spezifische Körperoberfläche a als Funktion des BMI , $n = 132$ (weiblich)

ziehung für die gesuchte Funktion $AMI = f(BMI)$:

$$AMI = 0,865 \cdot BMI + 18,56 \text{ mit } R^2 = 0,942$$

(Gl. 6).

◆ Abbildung 4 zeigt die Koordinaten der spezifischen Körperoberfläche über den zugehörigen BMI -Werten. Wie erwartet, ergibt sich hier ein hyperbolischer Verlauf dieser Koordinaten, der durch folgende nichtlineare Regression beschrieben werden kann:

$$a = 0,141 \cdot BMI^{-0,54} \text{ mit } R^2 = 0,947$$

(Gl. 7)

Die gemessenen spezifischen Körperoberflächen der weiblichen Testpersonen liegen zwischen $0,02 \text{ m}^2/\text{kg}$ beim größten gemessenen BMI und $0,031 \text{ m}^2/\text{kg}$ beim niedrigsten gemessenen BMI . Daran zeigt sich, dass die spezifische Körperoberfläche der Frauen bei mageren Körperformen bis zu 50 % größer sein kann als bei gedrungeneren Figuren. Diese mess-

technischen Befunde deuten auf signifikante thermodynamische Unterschiede in der Energiebilanz von Menschen unterschiedlicher Statur.

Ergebnisse bei männlichen Testpersonen

Die ermittelten Koordinaten für männliche Testpersonen zeigt ◆ Abbildung 5, wobei auch hier zum Vergleich die Linie $AMI = BMI$ gestrichelt

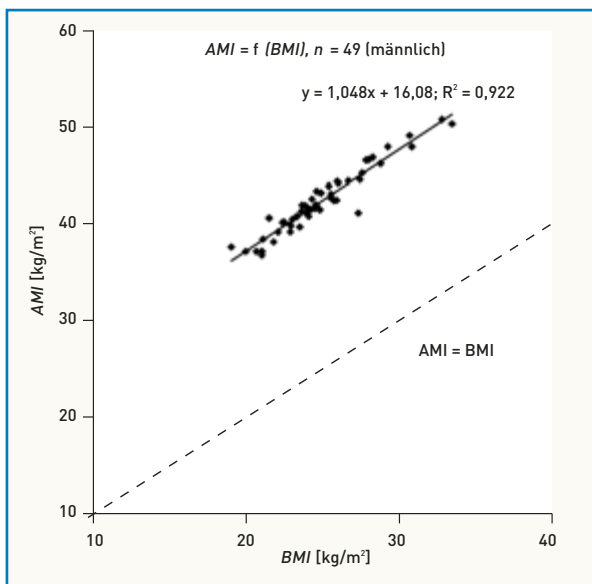


Abb. 5: Area Mass Index AMI als Funktion des BMI , $n = 49$ (männlich)

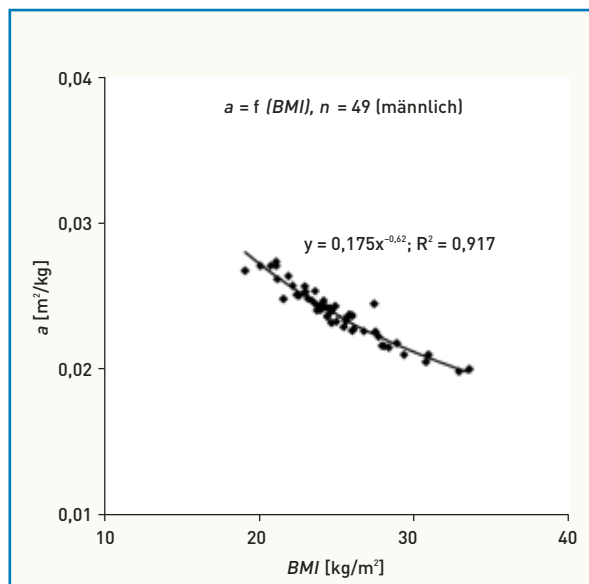


Abb. 6: Spezifische Körperoberfläche a als Funktion des BMI , $n = 49$ (männlich)

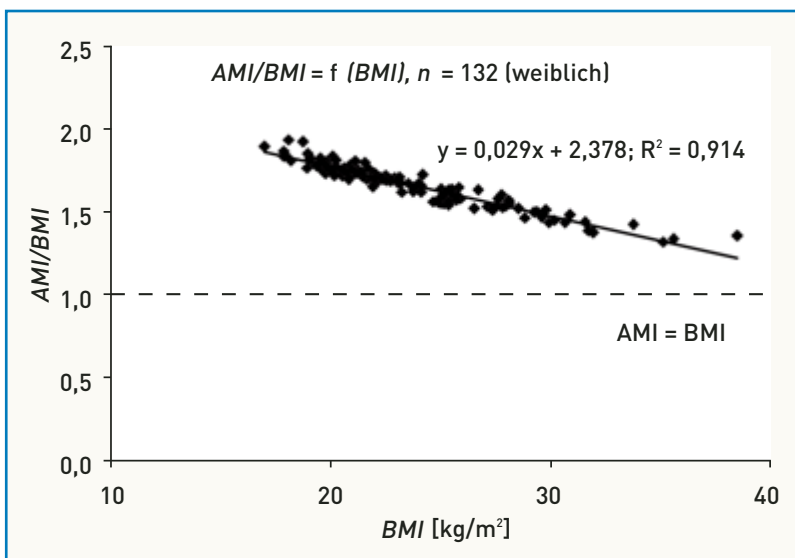


Abb. 7: Das Verhältnis von AMI zu BMI als Funktion des BMI (n = 132, weiblich)

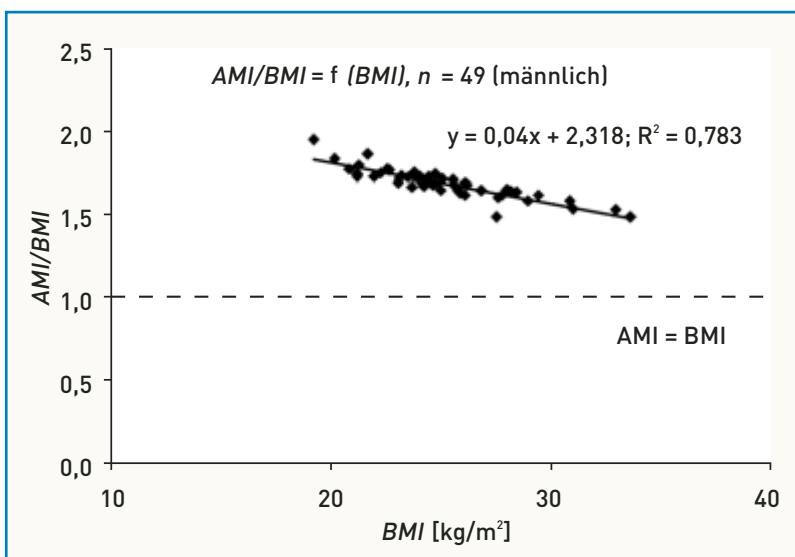


Abb. 8: Das Verhältnis von AMI zu BMI als Funktion des BMI (n = 49, männlich)

dargestellt ist. Auch bei den Männern zeigt sich eine deutliche Abweichung der *AMI*-Werte vom *BMI*. Die lineare Interpolation der Koordinaten ergibt ein überzeugendes Bild, obwohl die Anzahl der männlichen Testpersonen mit $n = 49$ gering ist. Die zugehörige Gleichung lautet:

$$AMI = 1,048 \cdot BMI + 16,08 \text{ mit } R^2 = 0,922 \quad (\text{Gl. 8}).$$

◆ Abbildung 6 zeigt die Korrelation der spezifischen Körperoberfläche der männlichen Testpersonen mit den zugehörigen *BMI*-Werten. Auch hier findet sich eine hyperbolische

Abhängigkeit, die mit der nachfolgenden nichtlinearen Regression interpoliert werden kann:

$$a = 0,175 \cdot BMI^{-0,62} \text{ mit } R^2 = 0,917 \quad (\text{Gl. 9}).$$

Die spezifischen Körperoberflächen der männlichen Testpersonen liegen zwischen $a = 0,02 \text{ m}^2/\text{kg}$ bei hohen und $a = 0,027 \text{ m}^2/\text{kg}$ bei niedrigen *BMI*-Werten. Ebenso wie Frauen weisen auch magere Männer eine größere spezifische Körperoberfläche auf als gedrungene. Generell scheint jedoch die spezifische Körperoberfläche der Männer etwas geringer zu

sein als die der weiblichen Testpersonen, was auf die unterschiedliche Physiognomie des weiblichen Körperbaus zurückzuführen sein dürfte. Angesichts der geringen Zahl von Testpersonen sollte dies mit der Analyse weiterer 3D-Body-Scans untermauert werden.

Abweichung zwischen *AMI* und *BMI*

Abschließend soll der Frage nachgegangen werden, ob die Abweichung zwischen *AMI* und *BMI* konstant ist oder nicht. Zu diesem Zweck wird in einem weiteren Schritt für jede Testperson das Verhältnis des Area Mass Index zum Body Mass Index gebildet und über dem jeweiligen *BMI* aufgetragen. Die Ergebnisse für weibliche und männliche Testpersonen sind in den ◆ Abbildungen 7 und 8 dargestellt. Zur Verdeutlichung der Abweichungen zwischen *AMI* und *BMI* ist hier $AMI/BMI = 1$ (d. h. $AMI = BMI$) als Horizontale eingezeichnet. Für weibliche Testpersonen ergibt die lineare Interpolation der Koordinaten eine gute Näherung mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,914$, für männliche Testpersonen immerhin noch von $R^2 = 0,783$. Für weibliche wie für männliche Probanden zeigt sich, dass das Verhältnis von *AMI* zu *BMI* nicht konstant ist, sondern mit zunehmendem *BMI* signifikant abnimmt.

Schlussfolgerungen

Die Testreihe zur Messung der Körperoberfläche mit Hilfe eines 3D-Body-Scans zeigt dessen methodische Eignung auch für ernährungswissenschaftliche Fragestellungen. Die spezifische Körperoberfläche a und der Area Mass Index *AMI* können für Aussagen zur Energiebilanz eines Menschen genutzt werden, weil die Körperoberfläche als realer Messwert vorliegt und in die Berechnung dieser Kenngrößen eingeht.

Nach den vorliegenden Ergebnissen einer Testreihe mit 188 Testpersonen sind systematische Abweichungen der traditionellen *BMI*-Berechnung of-

fensichtlich, da der *BMI* die tatsächliche Oberfläche des menschlichen Körpers nicht abbildet. Die systematische Abweichung des *BMI* vom hier neu eingeführten Area Mass Index *AMI* ist zudem nicht konstant, sondern nimmt mit zunehmendem *BMI* ab. Die Hypothese, dass eine Person mit großen *BMI*-Werten eine erheblich kleinere spezifische Körperoberfläche als eine Person mit magerem Körperbau aufweist, ist durch die vorliegende Testreihe signifikant nachgewiesen, sowohl für Frauen als auch für Männer. Testpersonen mit einem $BMI \leq 18$ weisen eine bis zu 50 % größere spezifische Körperoberfläche auf als Testpersonen mit $BMI \geq 35$. Insoweit zeigen sich prinzipielle thermodynamische Unterschiede in der Energiebilanz zwischen mageren und fettleibigen Menschen:

1. Bei Mageren verschiebt sich das Verhältnis von Energieerzeugung in der Muskelmasse und Wärmeabgabe über die größere spezifische Körperoberfläche in Richtung der Wärmeabgabe.
2. Umgekehrt gilt, dass bei Adipösen wegen der kleineren spezifischen Körperoberfläche weniger Energie in Form von Wärme in die Umgebung abgeführt werden kann, wobei dies zusätzlich durch die wärmeisolierende Fettschicht erschwert wird.
3. Die genannten Effekte wirken selbstverstärkend: Magerere können eher mager bleiben, weil die Wärmeabgabe über die größere spezifische Körperoberfläche auch bei größerer Energiezufuhr die Energiebilanz ausgleichen kann. Adipöse können eher fettleibig bleiben, weil die geringe Wärmeabgabe über die kleinere spezifische Körperoberfläche nicht so schnell zu einer negativen Energiebilanz führt.

Die Messung der spezifischen Körperoberfläche *a* und des Area Mass Index *AMI* kann zudem die bisher vorliegenden Schätzgleichungen für die Energiebilanz eines Menschen erheblich verbessern. Aufbauend darauf könnten in Zukunft auch thermodynamisch begründete Empfehlungen für den Auf- oder Abbau der Körpermasse des Menschen abgeleitet werden. Allerdings sind erhebliche weitere Forschungsarbeiten notwendig, um eine größere Zahl von Testpersonen zu berücksichtigen. Hierzu könnten im Prinzip alle bisher entstandenen 3D-Body-Scans – dies sind mehr als 13 000 Datensätze – aus dem Projekt „size Germany“ [11] genutzt werden. Die mitgeteilten Ergebnisse gelten zudem nur für gesunde Erwachsene aus Deutschland, also nicht für Kinder und Jugendliche, für andere Ethnien oder für besondere Gruppen wie Sportler/-innen und Rehabilitanden/-innen. Für solche Fragestellungen bieten sich individuelle 3D-Body-Scans als schnelle und berührungsfreie Methode zur Anthropometrie an. Im Spitzensport ist inzwischen die Nutzung von 3D-Body-Scans als ein weiteres Instrument der Körperanalyse bereits gängige Praxis.

Die Literatur zu diesem Artikel finden Sie auf Seite 213 in diesem Heft

Zusammenfassung

3D-Body-Scan als anthropometrisches Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Körperoberfläche

Elmar Schlich, Melitta Schumm, Gießen; Michaela Schlich, Koblenz

Die Oberfläche des Menschen dominiert den Wärmeaustausch mit der Umgebung. Auf Basis lasergestützter Messtechnik liegen 188 Datensätze zur Bestimmung der wahren Körperoberfläche von Testpersonen vor. Zur Auswertung werden die spezifische Körperoberfläche *a* und ein neu definierter „Area Mass Index“ *AMI* als deren Kehrwert berechnet. Dabei zeigt sich ein hyperbolisch-degressiver Zusammenhang zwischen der spezifischen Körperoberfläche *a* und dem *BMI*. Die Auswertung ergibt zudem eine signifikante Abweichung des *AMI* vom *BMI*, die mit zunehmendem *BMI* kleiner wird. Denn der *BMI* berücksichtigt nicht, dass schlanke Körper grundsätzlich eine höhere spezifische Oberfläche als gedrungene aufweisen. Insoweit sind Personen mit hohem *BMI* wegen ihrer kleineren spezifischen Oberfläche benachteiligt, wenn es um die Reduzierung der Körpermasse geht. Magerere haben wegen ihrer größeren spezifischen Oberfläche Schwierigkeiten, zuzunehmen, weil sie relativ viel Wärme an die Umgebung abgeben. Die traditionelle Berechnung des *BMI* kann mit Hilfe der hier vorliegenden Messdaten zur wahren Körperoberfläche verbessert werden, so dass die angesprochenen physikalischen Effekte Berücksichtigung finden.

Schlüsselworte: 3D-Body-Scan, Body Mass Index, Spezifische Körperoberfläche, Area Mass Index, Energiebilanz.

Summary

The 3D Body Scan as an anthropometric analysis to measure the specific body surface

Elmar Schlich, Melitta Schumm, Giessen; Michaela Schlich, Koblenz

The surface of the human body determines heat exchange to the environment – a major element of the energy balance. Laser-supported body scanning was used to measure the active heat exchange surface in 188 subjects. The evaluation was used to calculate the “specific body surface” (*a*) and its reciprocal, the “area mass index” (*AMI*). The specific body surface tended to decrease hyperbolically with *BMI*. There were significant differences between *AMI* and *BMI*, and these differences tended to be less at higher values of *BMI*. This is because the *BMI* fails to reflect the fact that slender bodies always exhibit higher surface areas than squat bodies. These results show that people with higher *BMI* face disadvantages in reducing body mass. On the other hand, people with lower *BMI* have problems gaining weight, because of their higher *a*. The data could help to amend the traditional role of *BMI* in body mass management, as is usually propagated by nutritionists, and serves to emphasise the importance of the individual build.

Keywords: 3D body scan, body mass index, specific body surface, area mass index, energy balance.

Ernährungs Umschau 57 (2010) S. 178–183