

## Die Energiebilanz des Menschen

Christine Waltner, Hartmut Wiesner, Giuseppe Colicchia

LMU München

### Kurzfassung

In den letzten Jahrzehnten traten im Zusammenhang mit den aktuell diskutierten Klimaänderungen Hitzewellen auf, die zu einem deutlichen Anstieg von Hitzekrankheiten führten. Der Energiehaushalt des Menschen ist von einem ausgewogenen Verhältnis zwischen Zunahme und Abgabe der inneren Energie geprägt, so dass die Kerntemperatur in einem großen Umgebungstemperaturbereich einschließlich tages- und jahresrhythmischen Schwankungen auf ein Niveau von  $37^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  eingestellt ist. Durch extreme Wetterbedingungen (z.B. hohe bzw. niedrige Umgebungstemperaturen und hohe Luftfeuchtigkeit) kann das Verhältnis aus dem Gleichgewicht geraten.

Im vorliegenden Beitrag werden die für den Menschen relevanten Energieaustauschmechanismen beschrieben. Die verschiedenen Mechanismen werden anhand von einfachen Demonstrationsexperimenten für den Physikunterricht simuliert.

### 1. Der Mensch – ein homiothermes Lebewesen

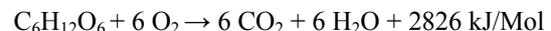
Während manche Lebewesen sich mit ihrer Körpertemperatur der Umgebung anpassen (z.B. Fische, Würmer, Schlangen usw.) haben Menschen, Säugtiere und Vögel die Eigenschaft unabhängig von aktuellen Wetter- und Klimalagen eine annähernd konstante Körpertemperatur aufrechtzuerhalten. Die Körpertemperatur des gesunden Menschen ist mit ca.  $37^{\circ}\text{C}$  in der Regel höher als die Umgebungstemperatur und muss in relativ engen Grenzen gleich bleiben. Steigt die Körpertemperatur über  $42^{\circ}\text{C}$  hinaus oder sinkt sie unter  $32^{\circ}\text{C}$ , so kann es zu unwiderruflichen Schäden bis hin zum Tod kommen. Energieproduktion und Energieabgabe müssen demzufolge im Gleichgewicht sein.

Über die Temperaturen der Haut und des Körperinneren orientieren den Körper die Signale der Thermorezeptoren. In der Haut liegen Kälterezeptoren, die auf eine Hauttemperatur unterhalb von  $34^{\circ}\text{C}$  ansprechen und im Hypothalamus befinden sich Wärmerezeptoren, die auf Temperaturen über  $37^{\circ}\text{C}$  ansprechen. Solange die Hauttemperatur nicht unter  $34^{\circ}\text{C}$  sinkt oder die Körperkerntemperatur über  $37^{\circ}\text{C}$  ansteigt, befindet sich der Körper im Bereich „idealer Behaglichkeit“. Dies ist beim unbedeckten Menschen in Ruhe bei etwa  $30^{\circ}\text{C}$  Umgebungstemperatur.

### 2. Bilanzgleichung

Für den Energieumsatz im menschlichen Körper ist die stoffwechselaktive Körpermasse maßgebend, d.h. bei körperlicher Arbeit nimmt die Erhöhung der inneren Energie um ein mehrfaches zu. Die in den Nahrungsmitteln enthaltenen Nährstoffe werden durch Stoffwechselfvorgänge im Körper zu energieärmeren Stoffen abgebaut oder zu komplexeren

Strukturen aufgebaut. Bei ersterem wird Energie frei, die für das Konstanthalten der Körpertemperatur auf  $37^{\circ}\text{C}$  (im Körperkern) bzw. auf ca.  $34^{\circ}\text{C}$  (in der Körperschale = Gliedmaßen und Haut) benötigt wird. Zum Beispiel werden bei Tätigkeiten im aeroben Bereich beim „Verbrennen“ von Glukose pro Mol  $2826\text{ kJ}$  an Energie frei (ausführlicher in [1]):



5-25% dieser Energie stehen zur Verrichtung von mechanischer Arbeit zur Verfügung (Wirkungsgrad des Menschen), der Rest wird in innere Energie im Körper umgewandelt. Der Großteil der inneren Energie muss abgegeben werden, damit sich die Körpertemperatur nicht unzulässig erhöht. Dies geschieht über die Haut und die Atemluft.

Die Energie(fluss)bilanzgleichung des Menschen beruht auf dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik. Die einzelnen Energieflüsse haben die Einheit  $\text{W}$ .

$$M \pm K \pm C \pm R - E - R_{\text{es}} - W (\pm N) = 0$$

$M$  ist die aufgrund des Metabolismus freiwerdende Energierate; sie umfasst den Grundumsatz (Aufrechterhaltung der Lebensfunktionen) und den Aktivitätsumsatz (wenn der Mensch nicht in Ruhe ist, geistige Leistung kann vernachlässigt werden); die metabolische Rate hängt stark von Geschlecht, Alter, Masse und weiteren individuellen Faktoren ab.  $K$ ,  $C$ ,  $R$  sind die Energieflüsse zwischen dem Körper und der Umgebung durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung.  $E$  ist der Energiefluss durch Verdunstung von Schweiß.  $R_{\text{es}}$  ist der respiratorische Anteil (die ausgeatmete Luft enthält Wasserdampf und durch die Haut hindurch verdunstet ebenfalls Wasser).  $W$  ist der Fluss der Energie für das Leisten externer mechanischer Arbeit. Interne Arbeit wäre

die Reibungsarbeit in den Blutgefäßen, die der menschliche Körper leisten muss, um den Blutkreislauf aufrecht zu erhalten. Dieser Teil ist in  $W$  nicht erfasst.  $N$  ist der Energiefluss zwischen Nahrung und Körper zur Anpassung an die Kerntemperatur, der auf Grund seiner geringen Größe auch vernachlässigt werden kann.

Beim Menschen als homiothermen Wesen ist der Energiehaushalt von einem ausgewogenen Verhältnis zwischen Zunahme und Abgabe der inneren Energie geprägt, so dass die Kerntemperatur in einem großen Umgebungstemperaturbereich einschließlich tages- und jahresrhythmischen Schwankungen auf ein Niveau von  $37^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  eingestellt ist [2].

Die notwendige Abgabe bzw. Aufnahme von Energie zur Temperaturstabilisierung erfolgt „trocken“ durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung. Verdunstung (Schwitzen) und auch Respiration tragen „feucht“ nur zur Energieabgabe bei. Die Anteile der einzelnen Komponenten hängen stark von den Umgebungsbedingungen (Luftfeuchtigkeit, Wind, Sonneneinstrahlung, Umgebungstemperatur usw.), aber auch von individuellen Größen (Geschlecht, Masse, Größe, Alter, Art der Bekleidung, usw.) ab.

### 3. Mechanismen der Energieabgabe

#### 3.1. Wärmeleitung

Die Wärmeleitung spielt bei der Energieabgabe des Körpers direkt an die Umgebungsluft praktisch keine Rolle. Ebenfalls hat sie auch wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit des Körpergewebes ( $\lambda_{\text{Fett}} = 0,2 \text{ W/mK}$ ;  $\lambda_{\text{Muskel}} = 0,4 \text{ W/mK}$ ) nur einen geringen Einfluss auf die Übertragung der Energie vom Körperinneren zur Körperoberfläche (großen Einfluss hat dagegen die Konvektion durch den Blutkreislauf).

Wärmeleitung kann bei Kontaktflächen eine Rolle spielen z.B. beim Sitzen oder Liegen. Die Größe einer durch Wärmeleitung pro Zeiteinheit übertragenen Energiemenge  $K$  hängt von der Temperaturdifferenz (Temperatur der Sitzfläche und Hauttemperatur)  $T_S - T_H$ , der Kontaktfläche  $A$ , der Dicke des übertragenden Wärmeleiters  $d$  und dessen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ab:  $K = \lambda A/d (T_S - T_H)$ . Die Dicke  $d$  ist in vielen Fällen sehr schwer anzugeben: der Hauptgrund ist, dass keine stationären Zustände vorliegen, sondern es sich um einen zeitlich variablen Energiefluss handelt. So wird zum Beispiel beim Beginn des Kontakts mit einer Sitzfläche auf Grund des hohen Temperaturunterschieds ein großer Energiefluss einsetzen, der dann zu einem annähernden Temperaturengleich der Kontaktflächen führt.

Die Wärmeleitfähigkeit der als Liege- und Sitzflächen benutzten Materialien ist vergleichsweise gering. Bei Sitzen auf Naturstein wurde bei  $T_S = 20^\circ\text{C}$  ein Energiefluss von  $8\text{W}$ , bei Holz von  $4\text{W}$  festgestellt. Beispielsweise kann wegen der sehr geringen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von Schuhsohlen, der Energie-

fluss durch die Schuhsohlen völlig vernachlässigt werden.

#### 3.2. Konvektion durch den Blutkreislauf

Zur Wärmeabgabe muss die im Körperinneren produzierte Energie bis an die Oberfläche transportiert werden. Dafür sorgt vor allem der Blutkreislauf: Das Blut wird im Körperinneren erwärmt und durch die Arterien bis unter die Haut befördert. Dabei gibt es einen Teil seiner inneren Energie ab. Dann fließt es durch die Venen zum Herzen zurück, damit der Zyklus wieder von vorne beginnen kann. Auf Grund der höheren spezifischen Wärmekapazität des Blutes und der großen Oberfläche der Kapillaren ist der Wärmeaustausch mit dem Hautgewebe sehr effizient. Deswegen kontrolliert der Blutstrom die Hauttemperatur: Seine Erhöhung durch Vergrößerung des Blutgefäßquerschnittes und der Pumpleistung des Herzens lässt die Hauttemperatur (bis hin zur Bluttemperatur) ansteigen, während seine Verminderung die Hauttemperatur an die Umgebungstemperatur angleichen lässt. Als Folge steigt im ersten Fall die Energieabgabe durch Konvektion in der Luft und Strahlung an (geringfügig auch durch Wärmeleitung). Im zweiten Fall, bei niedriger Umgebungstemperatur, werden die Blutgefäße verengt, weniger Blut fließt in die Arme und Beine, die Wärmeabgabe durch das Blut zur Körperoberfläche wird dadurch vermindert.

#### 3.3 Wärmeübertragung (Haut-Luft) mit Konvektion in Luft

Die Hauttemperatur des Menschen ist unter normalen Bedingungen geringer als die Kerntemperatur. Wenn die Umgebungstemperatur geringer ist als die Hauttemperatur, wird durch Wärmeübertragung die über der Haut liegende Luftschicht erwärmt. Die Erwärmung dieser hautnahen Luftschicht hat eine Verringerung ihrer Dichte zur Folge. Die warme Luftschicht ist leichter als die kältere darüber liegende Luftschicht und so kommt es zur beobachtbaren Luftströmung: „freie“ Konvektion.

Eine empirische Näherungsgleichung [3] für den Energiefluss durch Wärmeübertragung mit Konvektion in Luft ist:

$$C = \alpha_K \cdot A (T_U - T_H),$$

wobei  $A$  die Hautoberfläche,  $T_H$  die Hauttemperatur,  $T_U$  die Umgebungstemperatur und  $\alpha_K = 8,3v^{0,5} \text{ W (m/s)}^{-0,5} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  der Wärmeübergangskoeffizient ( $v$  die Luftgeschwindigkeit um den Körper bzw. die Geschwindigkeit des Körpers relativ zur Luft) sind.

Da Kleidung wie eine Isolierung wirkt und damit die Konvektion erheblich verhindert, müssen bei einer Abschätzung des Energieflusses durch Konvektion entsprechend bekleidete und unbedeckte Anteile des Körpers berücksichtigt werden.

### 3.4 Strahlung

Die von der Haut ausgehende elektromagnetische Strahlung kann erheblich zur Energieabgabe beitragen. Bei Behaglichkeitstemperatur zum Beispiel erfolgt mehr als die Hälfte der gesamten Energieabgabe über Strahlung (beim bekleideten Menschen). Die Strahlungsleistung beträgt nach dem Gesetz von Stefan-Boltzmann:

$$R = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

wobei  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  die Stefan-Boltzmann-Konstante,  $A$  die Körperoberfläche und  $\varepsilon$  die Emissionszahl der Hautoberfläche ist ( $\varepsilon$  beträgt ca. 0,8 und ist abhängig von der Temperatur und dem Pigmentierungsgrad der Haut). Den Körper umgebende Oberflächen strahlen ebenfalls, so dass der menschliche Körper Strahlungsenergie von der Umgebung absorbiert. Der Nettoenergiefluss durch Strahlung geht vom wärmeren zum kälteren Körper:

$$R = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_U^4 - T_H^4)$$

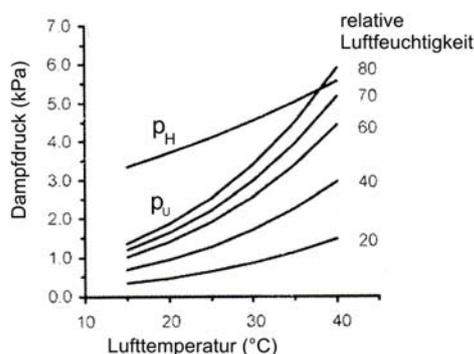
Ist der Körper der Sonnenstrahlung direkt ausgesetzt, so absorbiert er je nach Umständen zusätzliche Energie mit einer Leistung von bis zu 250W.

### 3.5 Verdunstung von Schweiß

Übersteigt die Außentemperatur die der Körperschale oder steigt die metabolische Rate durch körperliche Aktivität, erfolgt die Energieabgabe zusätzlich über Verdunstung. Mit der Verdunstung verfügt der menschliche Körper über einen sehr wirkungsvollen Mechanismus zur Abgabe von Energie. Die Leistung durch Verdunstung kann beschrieben werden durch

$$E = h_T \cdot A \cdot (p_U - p_H), \quad [4]$$

wobei  $h_T = \text{Verdunstungszahl} = 124 v^{0.5} \text{ W (m/s)}^{-0.5} \text{ m}^{-2} \text{ kPa}^{-1}$  und  $v$  die Luftgeschwindigkeit am Körper sind.  $A$  ist die effektive Hautoberfläche, von der Schweiß verdunstet wird.  $p_H$  ist der mittlere Wasserdampfdruck auf der Haut und  $p_U$  der Wasserdampfdruck in der umgebenden Luft. Die Verdunstung hängt von der Differenz  $p_H - p_U$  ab, die mit steigender Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit abnimmt (Abb. 1). Der Wasserdampf wird von der bewegten Luft wegtransportiert, somit spielen die Gestalt des Körpers und seine Lage neben dem Wind eine wichtige Rolle.



**Abb. 1:** Dampfdruck auf der Haut und in Luft für verschiedene relative Luftfeuchtigkeitswerte in Abhängigkeit der Lufttemperatur [5]

Der Mensch besitzt als einziges Lebewesen annähernd auf der gesamten Hautoberfläche Schweißdrüsen. Ihre Anzahl beträgt ca. 2 Millionen und ihre durchschnittliche Dichte beträgt  $125/\text{cm}^2$ . Die größte Schweißdrüsendichte ist in der Haut auf den Händen und Füßen lokalisiert. Die Schweißratenbildung beim Mann ist wesentlich höher als die bei der Frau. Durchschnittlich produziert eine Person unter normalen Bedingungen ca. 800ml Schweiß pro Tag. Die Verdunstung von 1 Liter Wasser auf der Körperoberfläche benötigt eine Energie von  $2,4 \cdot 10^6 \text{ J}$ . Die damit verbundene durchschnittliche Leistung pro Tag beträgt  $P = 0,8 \text{ kg} \cdot 2,4 \cdot 10^6 \text{ J} / (24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s kg}) = 22,2 \text{ W}$ . Es kann aber auch ein Erwachsener bei hoher Anstrengung und/oder hoher Umgebungstemperatur etwa 2 Liter Wasser in einer Stunde verlieren und damit einen Energiefluss von ca. 1,3 kW erreichen.

Wir können auch in einer Umgebung mit 100% relativer Feuchte über Verdunstung Wärme abgeben, sofern die Außentemperatur geringer ist als die der Hautoberfläche. Dauerhaft überleben wir aber kein Klima, bei dem Wasserdampfsättigung herrscht und gleichzeitig die Temperaturen oberhalb  $37^\circ\text{C}$  liegen. Entscheidend ist, dass der Schweiß verdunsten kann, denn nur Schweiß, der auf der Haut trocknet, entzieht der Haut Verdampfungswärme! Tropft bei sehr intensivem Schwitzen oder sehr hoher Luftfeuchtigkeit (Tropenaufenthalt) der Schweiß ab, ist er für das Abkühlen verloren!

Die Wärmeabgabe durch Strahlung nimmt bei Schweißbildung ab, da die Hautoberfläche durch die Schweißverdunstung kühler geworden ist.

Die Verdunstung hält bei durchschwitzter, nasser Kleidung auch nach Beendigung einer schweißtreibenden Aktivität an. Die metabolische Rate sinkt dann rasch, der Wärmeverlust durch Schweißverdunstung hält aber an. Dies kann leicht zur Unterkühlung führen.

### 3.6 Verdunstung durch Respiration

Zur Wärmeabgabe durch Verdunstung zählt auch die Respiration: Wasser diffundiert unbemerkt in Form von Wasserdampf durch die äußeren Schichten der Epidermis der Haut (und die Bekleidung) hindurch und er wird auch von den Schleimhäuten der Atemwege an die Atemluft abgegeben. Mit 500 – 800 ml pro Tag macht die Verdunstung durch Respiration ca. 20% der Gesamtenergieabgabe aus.

#### - Wasserdampfdiffusion durch Haut

Der Mensch nimmt diesen Wasserverlust des Körpers nicht wahr, da mit ihm keine Benetzung der Haut (oder der Kleidung) und keine merkliche Abkühlung der Hautoberfläche verbunden sind. Die Verdunstungsenergie, die zur Umwandlung des Wassers in den dann durch die Haut diffundierenden Wasserdampf benötigt wird, entstammt den tieferen Gewebeschichten der Haut, die keine Thermorezeptoren besitzen.

Schweißbildung kann die Wärmeabgabe durch Wasserdampfdiffusion beeinflussen, da an vollständig

benetzten Hautpartien keine Wasserdampfdiffusion mehr stattfindet, weil an der Hautschicht das erforderliche Dampfdruckgefälle nicht mehr besteht.

#### - Atemluft

Um das gegen Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen sehr empfindliche Gewebe der Lungen und Bronchien zu schützen, wird die Atemluft in den oberen Atemwegen, die sich von der Nase bzw. vom Mund bis zum Kehlkopf erstrecken, auf die Kerntemperatur von 37°C gebracht und mit Wasserdampf gesättigt. Es ist also pro Atemzug eine gewisse Energie notwendig um die eingeatmete Luft zu erwärmen und anzufeuchten. Mit jedem Atemzug wird Wasserdampf ausgeatmet

### 3.7 Wärmeaustausch mit der Nahrung

Damit ist nicht die in der Nahrung gebundene Energie, die durch den Metabolismus frei werdende Energie gemeint, sondern die Energie, die zwischen Körper und Nahrung auf Grund von Temperaturunterschieden ausgetauscht wird. Dieser Energieaustausch tritt nur während und kurz nach der Nahrungsaufnahme auf. Kalte Getränke und Mahlzeiten haben eine Temperatur, die zwischen Kühlschranktemperatur (8°C) und Zimmertemperatur (20°C) liegt. Warme Mahlzeiten haben gewöhnlich Temperaturen um 50°C. Da der Hauptbestandteil der Speisen und Getränke Wasser ist, kann als Wärmekapazität der Nahrung in guter Näherung die von Wasser angenommen werden [6].

Schätzt man den Gesamtenergiefluss für einen Tag ab, so ergibt sich etwa 0,8W. Der Nahrungsenergiefluss  $N$  hat daher, betrachtet man den gesamten Tagesverlauf, keine Bedeutung für den Energiehaushalt des Menschen. Während der Aufnahme der Nahrung jedoch können beachtliche Energiemengen von der Nahrung oder zur Nahrung fließen. Mit den Schülern kann dies an hand einfacher Beispiele abgeschätzt werden:

- Das Essen von 0,25 l heißer Suppe (60°C) in einem Zeitraum von 5 Minuten: Es ergibt sich eine Energiezufuhr von 24kJ. Dies bedeutet eine Leistung von 80W.
- Das Essen eines Speiseeises (-5°C) von einer Masse von 0,1kg innerhalb von 10 Minuten: Zur Anpassung der Speiseistemperatur an die Kerntemperatur wird dem Körper eine Energie von 50 kJ entzogen, das entspricht in der angegebenen Zeit einer Leistung von -83 W. Berücksichtigt ist dabei auch die Schmelzwärme, die nötig ist, um 0,1kg Speiseeis zu schmelzen.

### 4. Einfache Experimente zur Wärmeabgabe beim menschlichen Körper

Mit einfachen Experimenten kann ein Teil der beschriebenen Formen der Energieabgabe (z.B. Strahlung, Konvektion, Verdunstung und Respiration) beim menschlichen Körper demonstriert werden. Für die Schülerinnen und Schüler kann in diesem Kontext verdeutlicht werden, dass es zweckmäßig ist, die

Begriffe Temperatur, innere Energie bzw. Wärme bzw. Energiefluss deutlich zu unterscheiden.

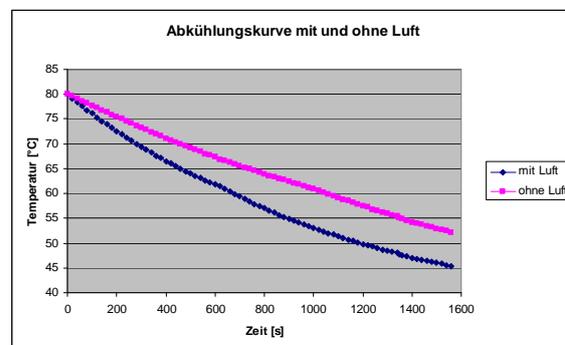
Unter anderem kann mit einfachen Mitteln simuliert werden, dass bei sportlicher Aktivität die Körpertemperatur zunimmt bzw. wie sie konstant gehalten werden kann. Durch Variation der Wetterbedingungen (z.B. Wind, Luftfeuchtigkeit) können die im Text beschriebenen Effekte (z.B. Änderung der Wärmeabgabe unter veränderter Luftfeuchtigkeit) recht gut demonstriert werden.

Allerdings lassen sich die Prozesse Wärmeübertragung mit Konvektion und Strahlung nicht so ohne weiteres voneinander trennen. Beide Prozesse treten unter realistischen Bedingungen fast immer zusammen auf, da der menschliche Körper und auch die Zimmerwände von Luft umgeben sind. Der jeweilige Anteil ist aber stark von vielen Bedingungen abhängig.

#### 4.1 Wärmeabgabe allein durch Strahlung

Für die Demonstration von Strahlungseffekten unter Ausschluss der Wärmeübertragung mit Konvektion empfehlen sich Abkühlungsversuche. Diese sind leicht durchzuführen und zeigen die Energieabgabe in sehr durchsichtiger Weise. Ungünstig ist der fehlende direkte Zusammenhang mit dem Verhalten des menschlichen Körpers, eine entsprechende Interpretation muss im Unterricht erfolgen.

Um die Konvektion auszuschalten bietet sich die Abkühlung eines Körpers unter der Vakuumlampe an. Wir haben z.B. einen in der Physiksammlung befindlichen Aluminium-Auftriebskörper (3cm x 3cm x 9cm) in heißem Wasser auf eine Temperatur von 80°C erhitzt und die Abkühlkurve zuerst in Luft (unter der nicht evakuierten Vakuumlampe) und dann unter einer evakuierten Vakuumlampe gemessen. Der sehr deutliche Unterschied (Abb. 2) – die Abkühlung unter der evakuierten Vakuumlampe erfolgt ebenfalls sehr zügig, aber deutlich langsamer als in Luft – muss nun gedeutet werden. Da unter der evakuierten Vakuumlampe weder Wärmeleitung noch Konvektion noch Verdunstung vorliegen können, muss die Energieabgabe allein über die Wärmestrahlung erfolgt sein.



**Abb.2** Temperaturverläufe des abkühlenden Aluminiumblocks unter der evakuierten Glocke und unter der nicht-evakuierten Glocke.

#### 4.2 Freihandversuche zur Strahlung

Freihandversuche verdeutlichen die Wirkung der Wärmestrahlung. Eine Hand wird in eine Metalldose gesteckt, es tritt sehr rasch ein Wärmegefühl auf, weil die von der Hand ausgehende Strahlung an der Dosenwand reflektiert wird. Misst man gleichzeitig mit einem Thermometer die Lufttemperatur in der Dose, stellt man nur eine sehr geringe Temperaturzunahme (ca.  $0,2^{\circ}\text{C}$ ) fest. Oder man erwärmt rußgeschwärzte Kieselsteine und hält sie dicht an die Haut.

#### 4.3. Qualitative Messungen der Strahlung

Die von dem Körper ausgehende Wärmestrahlung kann ergänzend mit einem IR-Sensor (z.B. von PASCO oder alternativ einer Thermosäule) gemessen werden. Dieser misst die Netto-Wärmeabgabe des Körpers an die Umgebung durch Strahlung in  $\text{Watt pro m}^2$ . Der Sensor selbst nimmt die Umgebungstemperatur an, die bei der Messung als Bezugstemperatur verwendet wird. Zur Messung wird der Sensor direkt auf den Körper oder auf die Haut (z.B. am Unterarm) gerichtet. Es ist allerdings mit dem Sensor nur ein qualitativer Vergleich der Strahlung feststellbar, die gemessenen Werte passen nicht exakt mit den berechneten Werten überein.

#### 4.4 Strahlung bei Erhöhung der Hauttemperatur

Erhöht sich bei sportlichen Aktivitäten die Temperatur der Haut, dann steigt nach dem Stefan-Boltzmannschen-Gesetz die Strahlungsleistung. Zur Demonstration, dass wärmere Körper pro Sekunde mehr Energie abstrahlen als kältere Körper, kann zum einen der Strahlungsmesser von PASCO benutzt werden oder bei der Abkühlkurve des Aluminiumkörpers unter der Vakuummantel die Zeitdauern für die Abkühlung von  $80^{\circ}$  auf  $70^{\circ}\text{C}$  mit der für die Abkühlung von  $50^{\circ}$  auf  $40^{\circ}\text{C}$  verglichen werden. In unseren Messungen betrug der Abkühlungsprozess von  $80^{\circ}$  auf  $70^{\circ}\text{C}$  acht Minuten und von  $50^{\circ}$  auf  $40^{\circ}\text{C}$  ca. 20 min. In beiden Fällen wird die gleiche Energiemenge abgestrahlt, bei höheren Temperaturen gibt sie aber der Körper schneller ab (Abb. 2). Sobald der Körper allerdings zu schwitzen beginnt, sinkt die Hauttemperatur und damit auch die Wärmeabgabe durch Strahlung.

#### 4.5 Abhängigkeit der Strahlungsleistung von der Art der Oberfläche (unterschiedl. Hautfarbe)

Berußt man eine Seite des  $80^{\circ}\text{C}$  heißen Aluminiumblocks mit Hilfe einer Kerze und misst dort die Wärmeabgabe mit dem IR-Sensor, so lässt sich ein deutlicher Unterschied feststellen. Bei  $77^{\circ}\text{C}$  wurde eine Energieabgabe des unberuhten Aluminiumblock von  $147 \text{ W pro m}^2$  und des beruhten Aluminiumblocks von  $165 \text{ W pro m}^2$  gemessen.

Mit einem Leslie-Würfel und dem Strahlungsmesser von PASCO kann zusätzlich sehr eindrücklich das unterschiedliche Emissionsvermögen verschiedener Oberflächen nachgewiesen werden.

#### 4.6 Strahlung von den umgebenden Wänden

Ein Körper strahlt Energie ab, wird aber von umgebenden Flächen selbst bestrahlt. Eine Nettoenergieabgabe kann also nur erfolgen, wenn die Temperatur der Flächen in der Umgebung des Körpers geringer als die der Oberfläche des Körpers ist. Zur Demonstration wird eine Blechdose schwarz angestrichen und der Aluminiumblock (mit Zimmertemperatur), auf dem ein Oberflächenthermometer steht, auf ein Stück Styropor in die Dose gestellt. Unter der Vakuummantel wird die Dose von außen mit einer Wärmelampe erwärmt, und zwar so, dass weder das Thermometer noch der Aluminiumkörper direkt bestrahlt werden. Man beobachtet, dass die Temperatur des Körpers (durch die Strahlung der Dosenwände) steigt. Ein Messbeispiel ergab bei einer Bestrahlungszeit von 3min eine Temperaturzunahme von ca.  $5^{\circ}\text{C}$ . Hinweis: Beim Abpumpen sinken am Anfang wegen der Druckreduzierung die Temperatur der Restluft und damit auch die Anzeige des Thermometers.

#### 4.7 Eine Blechdose als menschlicher Körper



Abb. 3: Die in Papiertücher gewickelte Blechdose mit Glühlampe im Inneren stellt den menschlichen Körper dar.

Bisher wurden vorzugsweise Abkühlungsversuche zur Demonstration verwendet, die entsprechend uminterpretiert werden mussten. Im Folgenden beschreiben wir Simulationsexperimente, bei denen realistischer für einen menschlichen Körper dessen Temperatur konstant gehalten wird. Für diesen Zweck simuliert eine Blechdose (z.B. Kaffeedose) den menschlichen Körper (Abb. 3). Eine leuchtende Glühlampe (6V; 5A) im Inneren der Dose stellt den Metabolismus dar, d.h. es wird ständig Energie nachgeliefert und der Körper (die Blechdose) dadurch von innen geheizt. Durch konstante Stromzufuhr wird nach ca. fünf bis zehn Minuten eine konstante „Körpertemperatur“ an der Oberfläche der Dose erreicht (z.B.  $T = 33^{\circ}\text{C}$  bei 2,5A, 2,3V). Die Temperatur wird mit einem Oberflächentemperaturfühler gemessen, der seitlich auf die Dose geklebt wird. Um die Dose wird dünnes, leicht saugfähiges Papier (z.B. von Papierhandtüchern) gewickelt und (z.B. mit Tesafilm) befestigt. Sportliche Aktivität wird dadurch simuliert, dass die an der Glühlampe anliegende Spannung und damit die Leistung erhöht werden. Regelt man zum Beispiel in unserer Anord-

nung die Spannung auf 2,9V, so stellt sich nach kurzer Zeit eine Temperatur von 38,2°C ein.

#### 4.8 Wetterbedingungen

Um Wind zu simulieren eignet sich ein stufenweise regelbarer Ventilator. Zur Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit (und zur „Schweißfreisetzung“) wird ein Zerstäuber verwendet. Falls ein Wettersensor (z.B. von Pasco) vorhanden ist, können damit die relative Luftfeuchtigkeit und die Umgebungstemperatur bestimmt werden.

#### 4.9 Geringere Energieabgabe durch Bekleidung

Die Dose simuliert den unbedeckten Menschen. Hat sich eine stabile Temperatur an der Dose eingestellt (Messbeispiel:  $T_U = 25,6^\circ\text{C}$ ,  $T_K = 34,3^\circ\text{C}$  bei einer Spannung von 2,1 V), wird über die Dose ein Stück Stoff gelegt. Innerhalb von wenigen Minuten steigt die Temperatur der Dose deutlich nachweisbar um mehrere Grad Celsius (ca. 5 °C) an.

#### 4.10. Mehr Konvektion bei Wind

Ausgangssituation ist wieder ein stabiles thermisches Gleichgewicht der Dose d.h. die Temperatur der Dose ändert sich nicht (Messbeispiel:  $T_U = 25,6^\circ\text{C}$ ,  $T_K = 34,3^\circ\text{C}$  bei  $U = 2,1\text{V}$ ). Mit einem Ventilator wird ein Luftzug um die Dose erzeugt. Dadurch sinkt die Temperatur an der Dosenoberfläche, während die Umgebungstemperatur konstant bleibt ( $T_K = 30,6^\circ\text{C}$  bei  $U = 2,1\text{V}$ ).

Führt man diesen Versuch mit der „bekleideten“ Dose durch, nimmt die Körpertemperatur ebenfalls ab, allerdings dauert es doppelt so lang wie ohne Stoff.

Dass die Umgebungstemperatur trotz Wind gleich bleibt und die Temperatur der Dose abnimmt ist für Schülerinnen und Schüler nicht selbstverständlich und kann hier sehr gut diskutiert werden. Richtet man den Luftstrom des Ventilators gegen den eigenen Körper (z.B. gegen den Arm) fühlt es sich ebenfalls kälter an, obwohl sich die Umgebungstemperatur (nachweisbar mit dem Temperaturfühler) nicht verändert.

#### 4.11 Schweißtreibender Sport

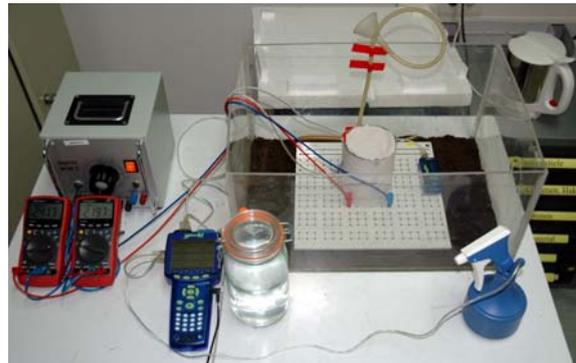
Ausgangssituation ist wieder ein thermisches Gleichgewicht bei einer stabilen Körper- und Umgebungstemperatur (Messbeispiel:  $T_U = 25,6^\circ\text{C}$ ,  $T_K = 33,9^\circ\text{C}$  bei  $U = 2,1\text{V}$ ). Der Modellkörper „treibt Sport“, es wird also seine Körpertemperatur ( $T_K = 38,0^\circ\text{C}$  bei  $U = 2,7\text{V}$ ) mit Hilfe der Spannungsregulierung am Lämpchen erhöht. Um die ursprüngliche Körpertemperatur wiederherzustellen, beginnt der Körper zu schwitzen. Dazu benetzt man mit einem Zerstäuber die „Hautoberfläche“ mit Wasser, das genau die Körpertemperatur von hier  $T_K = 38,0^\circ\text{C}$  hat. Wasser und Dose müssen die gleiche Temperatur haben, um schlüssig zeigen zu können, dass die Abkühlung der Dose auf die Verdunstung zurückzuführen ist und nicht etwa auf das Besprühen mit kühlerem Wasser. Die Körpertemperatur sinkt in

kurzer Zeit um mehrere Grad. Ist das Wasser vollständig verdunstet, steigt die Temperatur der Dose wieder auf die Ausgangstemperatur. Führt man den Versuch bei einer höheren Umgebungstemperatur (Aufwärmen mit der Wärmelampe) durch, kann man feststellen, dass die Verdunstung schneller erfolgt.

#### 4.12 Schwitzen bei hoher Luftfeuchtigkeit

Mit diesem Versuch kann demonstriert werden, dass bei hoher Luftfeuchtigkeit die Wärmeabgabe durch Verdunstung nicht mehr gut funktioniert. Es kann eindrücklich gezeigt werden, dass die Körpertemperatur bei Zunahme der Luftfeuchtigkeit ebenfalls zunimmt, wobei die Umgebungstemperatur konstant bleibt.

Die Dose wird mit dem Wettersensor (falls nicht vorhanden nur mit einem Temperaturfühler zur Messung der Umgebungstemperatur) in ein möglichst großes Plexiglasterrarium (Abmessungen in unserem Beispiel 52cm×37cm×27cm) auf ein zweifach zusammengelegtes Tuch gestellt. Das Terrarium wird dicht mit einer großen Styroporplatte abgedeckt. An der Seite des Terrariums wird ein Schlauch mit Trichter befestigt, so dass später Wasser ins Terrarium gefüllt werden kann, ohne dass der Styropordeckel dabei angehoben werden muss und so eventuelle Luftströme erzeugt.



**Abb. 4:** In einem möglichst großen Plexiglasterrarium kann die relative Luftfeuchtigkeit variiert werden (Das Einmachglas enthält Wasser von Umgebungstemperatur).

Zur Versuchsdurchführung (Abb. 4) muss man warten bis sich eine konstante Körpertemperatur einstellt. In unserem Messbeispiel betrug die Körpertemperatur 36,5°C. Jetzt wird nur das Papiertaschentuch auf der Oberseite der Dose durchfeuchtet (das Wasser muss ebenfalls die Temperatur von 36,5°C haben). Würde man die ganze Dose einfeuchten, steigt die Luftfeuchtigkeit bei geschlossenem Deckel zu schnell an. Der Deckel wird ab jetzt geschlossen gehalten und die Messung gestartet. Im Messbeispiel konnte eine Temperaturabnahme von über 2°C an der Dose festgestellt werden. Nach wenigen Minuten sinkt die Körpertemperatur nicht mehr und man gibt Wasser von der Temperatur der Umgebung (im Messbeispiel  $T_U = 30^\circ\text{C}$ ) über den Schlauch in das Terrarium ein. Der Stoff bzw. die Erde sollte vollständig durchnässt sein. Sofort beginnen die Luft-

feuchtigkeit und die Körpertemperatur zu steigen. Öffnet man den Styropordeckel des Terrariums beginnen die Luftfeuchtigkeit und die Körpertemperatur wieder zu sinken. Die Umgebungstemperatur schwankt nur unmerklich.

#### 4.13 Schwitzen mit und ohne Wind

Hat die trockene Dose eine stabile Temperatur erreicht (Messbeispiel:  $T_U=25,7^\circ\text{C}$ ,  $T_K=33,9^\circ\text{C}$  bei  $U=2,19\text{V}$ ) wird die „Hautoberfläche“ (die Papiertaschentücher) mit Wasser der Temperatur  $T_K$  benetzt. Die Messung der Körper- und Umgebungstemperatur wird gestartet und kurz darauf (im Messbeispiel nach 40 Sekunden) wird der Körper zusätzlich dem Luftstrom eines Ventilators ausgesetzt. Die Körpertemperatur sinkt mit Ventilator merklich schneller als ohne Windzug. Dieser Versuch funktioniert auch gut am eigenen Körper: Sprüht man Wasser von ca.  $33^\circ\text{C}$  (entspricht etwa der Hauttemperatur) auf den Arm, so fühlt es sich kühl an, durch Anblasen mit dem Ventilator fühlt es sich noch kühler an.

#### 4.14 Experimente zur Respiration

20% der Gesamtwärme wird beim Menschen über die Respiration abgegeben.

Der Anteil, der über die Schleimhäute abgegeben wird, kann den Schülern und Schülerinnen dadurch bewusst gemacht werden, dass man mit ihnen diskutiert, dass „trockene“ Luft mit Umgebungstemperatur eingeatmet wird und der Körper feuchte Luft von fast Körpertemperatur wieder abatmet. Schüler und Schülerinnen wissen aus Erfahrung, dass die ausgeatmete Luft zusätzlich noch Wasser aus dem Körper enthält. Dies lässt sich sichtbar machen, wenn man gegen einen Spiegel atmet.

Dagegen ist häufig Schüler und Schülerinnen nicht bekannt, dass unbemerkt Wasserdampf den mensch-

lichen Körper verlässt. Das Wasser verdampft bereits unter der Haut. Wir nehmen diese kühlende Wirkung durch Verdampfung nicht wahr, da die Verdampfung unter der Haut statt findet, wo sich keine Thermorezeptoren befinden. Durch einen einfachen Versuch, kann den Schülerinnen und Schülern diese Form der Energieabgabe ebenfalls bewusst gemacht werden: Dazu steckt man eine Hand in eine durchsichtige Frischhaltetüte und wartet ca. 2 min. Verblüffend für die Schüler und Schülerinnen ist, dass sich innerhalb dieser 2 min bereits Wassertropfen an der Innenseite der Frischhaltetüte zu beobachten sind, obwohl die Hand nicht schwitzt. Zusätzlich kann mit dem Wettersensor von PASCO ein Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit auf fast 100% in der Frischhaltetüte gemessen werden.

#### 5. Literatur

- [1] Waltner, C., Wiesner, H. (2008): Genügt ein Apfel für eine Bergtour? – Der Energieumsatz im menschlichen Körper, in: P. Labudde (Hrsg.): Naturwissenschaften vernetzen – Horizonte erweitern. Kallmeyer-Verlag.
- [2] Schmidt, R., et.al. (2005): Physiologie des Menschen (29. Aufl.), Springer, Berlin.
- [3] Bodil N. (1996): Olympics in Atlanta: a fight against physics, *Med Sci Sports Exerc.* 28 (1996) 6, 665 – 668.
- [4] Waltjen T. (2003): Wärmeansprüche des Menschen, Österreichisches Institut für Baubiologie und Ökologie.
- [5] Brotherhood, J. (2008): Heat stress and strain in exercise and sport, *Journal of Science and Medicine in Sport* 11/1, 6-19.
- [6] Höpfe, P. (1984): Die Energiebilanz des Menschen, Münchner Universitäts-Schriften, Wissenschaft. Mittelungen Nr. 49.