

Leben im Wärmebad

Von Hans Joachim Schlichting und Bernd Rodewald

1 Temperaturregelung

Der Mensch ist ein Warmblüter. Seine Körpertemperatur ist in der Regel höher als die Umgebungstemperatur und muß in relativ engen Grenzen gleich bleiben. Sie beträgt bei einem gesunden Menschen etwa 37 Grad Celsius, und darf nur geringfügig davon abweichen. Steigt die Körpertemperatur über 42 Grad hinaus oder sinkt sie unter 32 Grad, so kann es zu unwiderruflichen Schäden bis hin zum Tod kommen. Der Mensch muß daher über ein ausgeklügeltes Sensorium, den Wärmeempfindungen, verfügen, das ihn stets über die jeweils herrschenden thermischen Bedingungen „informiert“. Wärmeempfindungen, die z.B. eine Veränderung der Körpertemperatur signalisieren, führen in der Regel zu bewußten oder unbewußten Abwehrmaßnahmen (siehe unten).

Die Notwendigkeit zu solchen Abwehrmaßnahmen mag als Einschränkung der Freiheit und damit als evolutionärer Nachteil der Warmblütigkeit erscheinen. Das Gegenteil ist jedoch der Fall: Dadurch, daß die Körperfunktionen stets die gleichen Bedingungen vorfinden, vermag ein Warmblüter unabhängig vom Wechselspiel sich ändernder Umgebungstemperaturen zu handeln und sein Leben zu gestalten.

Man könnte vermuten, daß es unter diesen Bedingungen am günstigsten sei, wenn die Körpertemperatur und Umgebungstemperatur gleich wären. Wie wir aus Erfahrung wissen, ist eine Umgebungstemperatur von etwa 37 Grad jedoch auf Dauer schwer zu ertragen und macht bereits verschiedene „Abwehrmaßnahmen“ des Körpers erforderlich. Der Grund dafür ist, daß die Lebensvorgänge des Organismus „Abwärme“ produzieren, die an die Umgebung abgegeben werden muß, wenn es nicht zu einer Temperaturerhöhung kommen soll. Von selbst erfolgt eine solche Wärmeabgabe jedoch nur, wenn die Körpertemperatur genügend weit oberhalb der jeweiligen Umgebungstemperatur liegt (eine Folge des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik). Dann werden aufwendige Regelvorgänge zur Konstanthaltung

der Körpertemperatur, die stets eine körperliche Belastung darstellen, weitgehend überflüssig. Tatsächlich liegt die mittlere Temperatur auf der Erde mit etwa 10 Grad unterhalb der Körpertemperatur, was im Durchschnitt günstig für Warmblüter ist und vermutlich kein Zufall sein dürfte.

2 Wärmeempfinden

Der Mensch fühlt sich „thermisch“ gesehen wohl, wenn sein Organismus keinerlei Aktivitäten zur Aufrechterhaltung einer konstanten Körpertemperatur unternehmen muß. Eine solche Situation liegt vor, wenn der Wärmestrom zwischen Körper und Umgebung und die pro Zeiteinheit vom Körper produzierte Wärme gleich groß sind. Ein Gegenstand erscheint ihm thermisch neutral, also weder warm noch kalt, wenn diese Wärmebilanz auch noch lokal ausgeglichen ist. Alle Abweichungen von diesem Normalfall führen zu spezifischen Wärmeempfinden, aufgrund derer beurteilt wird, wie warm bzw. kalt die Umgebung oder bestimmte Gegenstände sind. *Je kälter bzw. wärmer die Umgebung erscheint oder je kälter bzw. wärmer sich ein Gegenstand anfühlt, desto stärker überwiegt der abgegebene Wärmestrom der pro Zeiteinheit produzierten Wärme bzw. umgekehrt.*

Demnach ist eine Klassifizierung der jeweiligen Umgebung oder von Gegenständen der Umgebung nach warm und kalt in eindeutiger Weise möglich. Schwierigkeiten mit einer solchen Klassifizierung gibt es erst dann, wenn man die Attri-

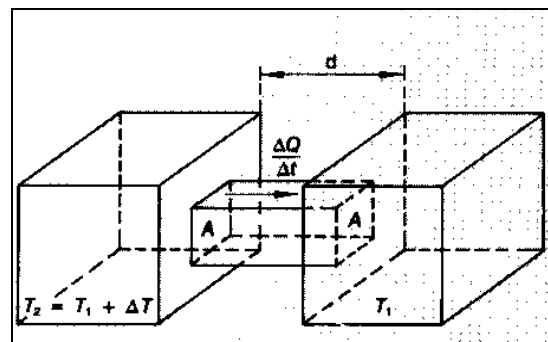


Abb. 1 Eine wärmeleitende Schicht der Dicke d und Querschnitt A transportiert Wärme vom Körper höherer Temperatur T_1 zum Körper niedriger Temperatur $T_2 = T_1 + \Delta T$

bute „warm“ und „kalt“ einer Temperaturskala zuordnen möchte. Denn nicht immer hat ein Gegenstand, der wärmer oder kälter als ein anderer erscheint, auch eine höhere oder niedrigere Temperatur. Unser Organismus ist eben kein Thermometer. Es wäre auch erstaunlich, wenn sich unser

Stoff	Temperatur in °C	Wärmeleitfähigkeit λ in W/(mK)
Silber	-100 bis 100	419
Kupfer	0 bis 100	390
Aluminium	0 bis 200	230
Stahl		79
Eis	0	1,7
Quarzglas	0 bis 100	1,38
Wasser	0	0,57
	10	0,58
	50	0,64
	100	
Luft	0	0,024
	20	
	50	0,028
	100	
Epidermis	37	0,186
Fett	37	0,186
Muskelgewebe	37	0,36
Blut	37	0,472

Tab. 1 Wärmeleitfähigkeit einiger Stoffe

für äußerst komplizierte thermische Aufgaben konzipiertes Wärmeempfinden zurückführen ließe auf derart einfache und idealisierte Vorgänge, wie sie einem Thermometer zugrundeliegen.

Das übliche methodische Vorgehen bei der Einführung der Temperatur, unseren Körper als schlechten Temperaturmesser zu überführen und damit die Benutzung eines Thermometers zu motivieren, ist daher zumindest irreführend. Statt zu untersuchen, wie gut oder wie schlecht unser Wärmeempfinden mit einem physikalischen Konzept, hier: der Temperatur, harmoniert, käme es umgekehrt darauf an, herauszufinden, welche physikalischen Konzepte zur physikalischen Beschreibung unseres Wärmeempfindens am besten geeignet sind. Dabei würde sich nämlich herausstellen, daß dafür der Wärmestrom zwischen Körper und Gegenstand angemessener ist als die Temperatur. Will man höheren Ansprüchen genügen, so muß man sogar auf beide Konzepte, auf Wärmestrom und Temperatur zurückgreifen. Damit hat man dann aber Begriffe zur Hand, die es

erlauben, alle gängigen thermischen Erfahrungen zumindest qualitativ auf einfache und konsistente Weise physikalisch zu erklären. Es ist eine der Zielsetzungen dieses Aufsatzes, dies an repräsentativen Beispielen zu zeigen.

3 Wärmetransportmechanismen

Die Bedeutung des Wärmestroms zwischen Körper und Umgebung lenkt das Augenmerk auf die Mechanismen, durch die der Wärmestrom vermittelt wird. Da der Temperaturunterschied zwischen menschlichem Körper und Umgebung bzw. Gegenständen der Umgebung jedoch gering ist, bleiben die Wärmetransportmechanismen als solche sehr unauffällig. Wir erörtern sie daher zunächst am Beispiel eines heißen Objekts, z.B. an einem heißen Ofen.

Offenbar gibt ein Ofen seine Wärme auf verschiedene Weise ab:

Wärmeleitung:

Ein Topf mit Wasser wird dadurch am besten erwärmt, daß man ihn direkt auf den Ofen stellt. Da die Wärme hier durch das die beiden Körper verbindende Material geleitet wird, spricht man bei dieser Art der Wärmeübertragung von *Wärmeleitung*.

Genaugenommen steht der Topf auch dann mit dem Ofen in Verbindung, wenn er dicht über ihm aufgehängt wird. Sie wird in diesem Fall durch die dazwischenliegende Luftschicht hergestellt. Auch wenn man eine Asbestschicht zwischen Topf und Ofen legt, besteht eine Verbindung. In der Tat läßt sich auch in diesem Fall nach einiger Zeit eine Erwärmung des Wassers feststellen. Es gibt demnach offenbar gute und schlechte Wärmeleiter. Metalle (Ofenplatte und Topf) sind beispielsweise gute, Luft und Asbest schlechte Wärmeleiter. (Genaugenommen macht sich in diesem Fall außerdem bereits eine weitere Wärmetransportart, die Konvektion, bemerkbar (siehe unten)).

Eine genauere Untersuchung dieses Wärmetransports zeigt, daß die pro Zeiteinheit übertragene Wärme P_L (Wärmestrom) proportional zur Übertragungsfläche A und umgekehrt proportional zur Dicke d des übertragenden Wärmeleiters sowie proportional zur Temperaturdifferenz $T_2 - T_1$ der beiden Körper ist, zwischen denen der Wärmeaustausch stattfindet (siehe Abb. 1).

$$P_L = \lambda \frac{A}{d} (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Die als Proportionalitätskonstante eingeführte Größe λ heißt *Wärmeleitfähigkeit*. Sie ist charakteristisch für das Material des Wärmeleiters (siehe

Abb. 1). Genaugenommen hängt λ auch noch von der Temperatur ab. In vielen der uns interessierenden Anwendungen kann dies jedoch vernachlässigt werden.

Konvektion:

Eine weitere Art der Wärmeübertragung kann man feststellen, wenn man über dem Ofen (oder einem Heizkörper) ein Blatt Papier beweglich aufhängt. Das Papier gerät sofort in heftige Bewegung, die auf eine vom heißen Ofen aufsteigende Strömung schließen läßt. Diese Erscheinung kommt dadurch zustande, daß zunächst die unmittelbar über der Ofenplatte befindliche Luftschicht durch Wärmeleitung erwärmt wird. Die Erwärmung hat aber eine Ausdehnung der Luftschicht und damit eine Verringerung ihrer Dichte zur Folge: Die Luftschicht wird daher leichter als die kälteren darüber befindlichen Luftschichten und von diesen nach oben weggedrückt (Auftrieb). Auf diese Weise kommt die beobachtete Luftströmung zustande. Sie ist insofern als Wärmetransporterscheinung anzusehen, als mit der aufsteigenden Luft die auf diese übertragene Wärme mitgenommen wird. Dieser in Gasen und Flüssigkeiten auftretende Wärmetransport wird *Konvektion* genannt.

Die Konvektion ist letztlich dafür verantwortlich, daß ein Ofen oder ein Heizkörper ein Zimmer ziemlich einheitlich erwärmen und warmhalten kann. Indem nämlich der über dem Ofen aufsteigende erwärmte Luftstrom seine Wärme allmählich an die kühleren Luftschichten (z.B. durch

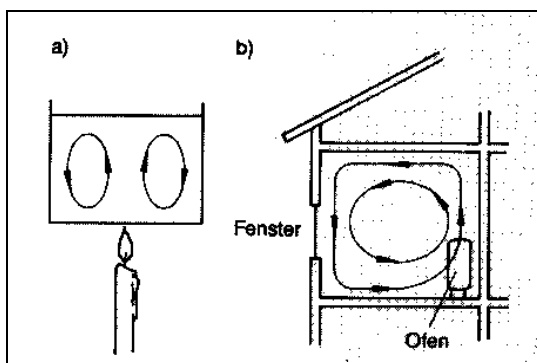


Abb. 2 Wärmetransportierende Konvektionsströme in einer Flüssigkeit (a) und in Zimmerluft (b)

Wärmeleitung) abgibt, sich selbst dadurch abkühlt, schwerer wird, nach unten absinkt und erneut zum Ofen nachströmt, um die dort aufsteigende Luft zu ersetzen, kommt ein geschlossener Luftstrom zustande. Er durchsetzt schließlich das ganze Zimmer und sorgt für eine allseitige Erwärmung (siehe Abb. 2).

Für die Konvektion ergibt sich ein ähnlich einfacher quantitativer Zusammenhang wie für die Wärmeleitung: Der konvektiv übertragene Wärmestrom P_K ist ebenfalls proportional zur Übertragungsfläche A und zur Temperaturdifferenz $T_2 - T_1$

$$P_K = q \cdot A(T_2 - T_1) \quad (2)$$

Dabei ist q eine für die jeweilige Situation experimentell zu bestimmende Konstante.

Wärmestrahlung:

Daß noch eine dritte Art des Wärmetransports auftritt, kann man feststellen, wenn man sich in der Nähe des heißen Ofens (besser noch: eines offenen Feuers) aufhält. Man spürt einen Wärmestrom, der direkt aus der Richtung der Wärmequelle kommt. Dafür können weder die Wärmeleitung noch die Konvektion verantwortlich sein. Man hat es mit der *Wärmestrahlung* zu tun. Sie funktioniert offenbar umso besser, je weniger Materie sich zwischen Wärmequelle und angestrahlter Person befindet. Ein gut wärmeleitender Ofenschirm verbessert nicht etwa den Wärmetransport sondern verschlechtert ihn, weil er die Strahlung unterbindet. Luft ist nahezu durchsichtig für Wärmestrahlung und stellt daher kaum ein Hindernis dar. Die Bedeutung der Wärmestrahlung für das Leben auf der Erde ermißt man u. a. daran, daß ohne Wärmestrahlung die auf der Sonne produzierte Wärmeenergie den zwischen Erde und Sonne liegenden luftleeren Raum nicht durchqueren könnte. Wie bei den beiden anderen Wärmetransportarten ist auch hier der übertragene Wärmestrom P_S umso größer, je größer die Wärme aufnehmende Fläche A oder je größer die Temperaturdifferenz zwischen dem ausstrahlenden und absorbierenden Körper ist. Ein quantitativer Zusammenhang ist i. a. komplizierter zu ermitteln. Nur für den Spezialfall, daß der ausstrahlende oder der aufnehmende Körper sich wie ein schwarzer Körper verhält, gilt

$$P_S = \sigma A(T_2^4 - T_1^4) \quad (3)$$

Hier bedeutet $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ die sogenannte Boltzmannkonstante. Die hier vorausgesetzten *schwarzen Körper* sind solche, die grob gesprochen die Strahlung aller Frequenzen absorbieren und Strahlung in Form einer regelmäßigen Frequenzverteilung aussenden (vgl. z.B. *Schlichting* 1981, S. 105 f.). Trotzdem ist diese Gleichung im Falle des Menschen näherungsweise anwendbar, weil

- der Mensch in dem Temperaturbereich ($T \approx 300\text{K}$), in dem er Wärme abstrahlt, sich nahezu wie ein schwarzer Körper verhält.

- Bei der Absorption ist er zwar auch Strahlung ausgesetzt. Sie geht jedoch einerseits in vielen Fällen von Strahlern (z.B. von der Sonne) aus, die sich nahezu wie schwarze Körper verhalten. Andererseits läßt sich in diesem Fällen die Abweichung des menschlichen Körpers vom Idealfall des schwarzen Körpers durch den sogenannten Schwärzegrad ϵ erfassen, welcher den Bruchteil der Strahlung angibt, die vom menschlichen Körper absorbiert wird. Er variiert zwischen 0,65 für die hellste und 0,85 für die dunkelste menschliche Haut.

Die Aufteilung des Wärmetransports in verschiedene Transportarten ist nur idealerweise möglich. In der Praxis lassen sich die Einflüsse nur näherungsweise trennen. Für den Wärmetransport zwischen menschlichem Körper und Umgebung wollen wir das Problem noch weiter vereinfachen. *Wir können uns für die meisten Fälle auf Wärmeleitung und Wärmestrahlung beschränken, indem wir die Konvektion in der folgenden Weise auf die Leitung reduzieren:*

Der menschliche Körper überträgt Wärme auf die ihn unmittelbar umgebende Luft durch Wärmeleitung. Dadurch wird die Luftschicht (spezifisch) leichter. Es entsteht eine Auftriebskraft, die - sobald sie groß genug ist, um die innere Reibung mit den angrenzenden Luftschichten zu überwinden - zur Konvektion führt. Da aufgrund der Rauigkeit der Körperoberfläche (Poren, Behaarung) die Reibung zwischen Körper und angrenzender Luftschicht größer ist als die zwischen den einzelnen Luftschichten, bleibt stets eine mehr oder weniger dünne Luftschicht an der Körperoberfläche haften. Die Körperwärme wird demnach zunächst durch diese anhaftende Luftschicht geleitet und dann durch Konvektion weiter geführt. Die Dicke der anhaftenden Luftschicht beträgt je nach der Ausprägung des Haarkleides 4–8 mm. (Precht et al. 1973). Obwohl durch sie die Wärme vom Organismus wegtransportiert wird, liegt ihre Bedeutung gleichsam im Gegenteil begründet:

Wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit der Luft trägt sie nicht unwesentlich zur Isolierung des menschlichen Körpers bei. Sie schützt ihn gegebenenfalls mehr gegen Auskühlung als die äußere Haut, die mit 0,04 bis 0,2 mm Dicke (Leonard 1977) in ihrer Isolierwirkung meist vernachlässigt werden kann. Die Konvektion sorgt gewissermaßen dafür, daß die isolierende Luftschicht nicht zu groß wird und stellt somit den Wärmeaustausch mit der umgebenden Luft sicher. Bei Kenntnis der Dicke der anhaftenden Luft genügt es jedoch, die Wärmeleitung durch diese Luftschicht in Rechnung zu stellen, da ja die gesamte Wärme diese Schicht passieren muß.

4 Wie der Mensch seine eigenen Wärmetransportphänomene erlebt

Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung treten beim Menschen weit weniger auffällig in Erscheinung als etwa beim heißen Ofen. Daran ist hauptsächlich die sehr viel geringere Temperaturdifferenz zwischen Mensch und Umgebung schuld, aufgrund derer nur relativ kleine Wärmeströme auftreten. Dennoch gibt es eine Vielzahl von Erscheinungen, die sich mit Hilfe der Wärmetransportmechanismen deuten lassen.

Kalte Gegenstände:

Metalle, Wasser, Steinfußböden fühlen sich fast immer kalt an; Federn, Styropor, Holz dagegen fast immer warm. Aufgrund dieser Erfahrungen ist man zuweilen geneigt, z.B. Metallen und Styropor verschiedene Temperaturen zuzuordnen. Die Regelmäßigkeit dieser Beobachtung müßte einem jedoch zu denken geben. Sie widerspricht der Erfahrung, daß alle Gegenstände in ein und der selben Umgebung nach einer gewissen Zeit dieselbe Temperatur angenommen haben.

Nach der eingangs skizzierten Modellvorstellung können derartige Beobachtungen nur so gedeutet werden, daß zwischen den sich unterschiedlich warm anführenden Gegenständen und dem menschlichen Körper offenbar unterschiedlich große Wärmeströme ausgetauscht werden. Nach dem am Beispiel des heißen Ofens systematisierten Erfahrungen kann ein unterschiedlich starker Wärmestrom verschiedener Körper mit derselben Temperatur nur dann möglich sein, wenn die Wärmeleitfähigkeit der Gegenstände einen unterschiedlichen Wert besitzt. Das ist in der Tat der Fall, wie man beispielsweise Tabelle 1 entnehmen kann:

Bei Umgebungstemperatur nimmt gut leitendes Eisen einen weitaus größeren Wärmestrom vom menschlichen Körper auf als schlecht leitendes Styropor.

Heiße Gegenstände:

In einer warmen Umgebung (z.B. in der Sauna oder an einem heißen Sommertag) fühlen sich meist gerade die Gegenstände besonders warm an, die in einer kühleren Umgebung kalt erscheinen. Beispielsweise kann man sich in einer aufgeheizten Sauna am Thermometer die Hand verbrennen. Demgegenüber empfindet man das Handtuch, erst recht aber eine Styroporplatte als verhältnismäßig kühl.

Die Erklärung für diesen Sachverhalt scheint nach dem für kalte Gegenstände Gesagten auf der Hand

zu liegen: *Der Wärmestrom vom menschlichen Körper zur Umgebung kehrt sich einfach um.* Nunmehr führen gut leitende Gegenstände dem Körper einen größeren Wärmestrom zu als schlecht leitende Gegenstände mit der Folge daß sie sich wärmer anfühlen als schlechter leitende Gegenstände.

Diese Erklärung ist jedoch nicht immer korrekt: Zum einen, muß sich der Wärmestrom nicht unbedingt umkehren, um eine derartige Empfindung hervorzurufen. Es genügt bereits, daß der betreffende Gegenstand so warm ist, daß der Wärmestrom vom Körper zur Umgebung kleiner ist als dies normalerweise der Fall ist. Zum anderen kann es durchaus der Fall sein, daß der Sonne ausgesetzte Gegenstände tatsächlich unterschiedliche Temperaturen besitzen, so daß zusätzlich zur Änderung des Wärmestroms aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit eine Änderung aufgrund einer unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zu berücksichtigen ist. Im Unterschied zur thermischen Gleichgewichtssituation, die normalerweise in einem Zimmer zumindest näherungsweise vorliegt, ist bei starker Sonneneinwirkung von einer thermischen Nichtgleichgewichtssituation auszugehen.

Daß es für den menschlichen Körper wichtiger ist, Wärmeströme zu „messen“ als Temperaturen, wird an dem folgenden Beispiel besonders deutlich: Während man sich in Luft von 100 Grad Celsius (z.B. in einer Sauna) durchaus einige Zeit wohlfühlen kann, ist bereits ein kurzzeitiger Aufenthalt in 100 Grad heißem Wasser tödlich.

Sonnenbaden bei Eis und Schnee:

Winterurlauber erleben nicht selten, daß sie bei Umgebungstemperaturen unterhalb des Gefrierpunktes an einem windgeschützten Platz mit entblößtem Körper Sonnenbaden können. Auf den ersten Blick scheint es unmöglich zu sein, diesen Sachverhalt im Rahmen unseres Wärmestrommodells zu erklären. Denn der entblößte Körper muß aufgrund der großen Temperaturdifferenz zur Umgebung einen sehr großen Wärmestrom abgeben. Daß es dennoch nicht zu einer entsprechend starken Kälteempfindung und einer Unterkühlung kommt, liegt daran, daß in diesem speziellen Fall *Wärmeleitung und Wärmestrahlung nicht wie in den meisten Fällen gleichsinnig sondern gegensinnig* erfolgen. Der Wärmestrom aufgrund der intensiven Sonneneinstrahlung, die häufig noch durch Reflexionen aus der schneebedeckten Umgebung unterstützt wird, gleicht den großen Wärmeverlust aufgrund von Wärmeleitung offenbar mehr als aus. Für unseren Körper ist - bei nicht zu großen lokalen Unterschieden - nur der Gesamt-wärmestrom entscheidend, und der ist im vorlie-

genden Fall - wie das Wärmeempfinden zum Ausdruck bringt - ausgeglichen. Die Lufttemperatur entscheidet demnach nur über Richtung und Größe des Wärmestroms aufgrund der Wärmeleitung. Bei Anwesenheit von Wärmestrahlern, die nicht die Temperatur der umgebenden Luft besitzen, kann es deshalb zu derartigen Erscheinungen kommen.

Ausgekühlte Räume:

Dies gilt auch für den umgekehrten Fall, indem also die Lufttemperatur hoch ist. Durch die gleichzeitige Anwesenheit von Wärmestrahlern niedriger Temperatur kann dann das auf den Gesamtwärmestrom ausgerichtete Wärmeempfinden den Eindruck von Kälte vermitteln. Beispielsweise können ausgekühlte schnell aufgeheizte Räume bereits eine Lufttemperatur von über 20 Grad Celsius aufweisen. Der Körper strahlt jedoch den noch kalten Wänden soviel Wärme zu, daß sich insgesamt noch kein thermisches Wohlbefinden einstellen kann. Eine entsprechende Erklärung gilt für die Unbehaglichkeit, die man zuweilen in Räumen mit schlecht isolierten Wänden, großen Fensterfronten u. ä. empfindet.

Kühlung durch warme Luft:

Wer hat sich nicht schon einmal darüber gewundert, daß man durch Anpusten etwa der Hand eine Kühlwirkung verspürt, obwohl die Luft doch nahezu Körpertemperatur besitzen muß, jedenfalls wärmer als die Umgebungsluft ist. Die Kühlung kommt dadurch zustande, daß der durch das Pusten hervorgerufene Luftstrom die isolierende Luftschicht aufreißt, die den Körper umgibt. Dadurch kann an dieser Stelle ein größerer Wärmestrom vom Körper abgeleitet werden als im Normalfall, was sich als Kälteempfinden bemerkbar macht.

Eine ganz entsprechende Ursache liegt übrigens der Kühlwirkung eines Ventilators zugrunde. Dieser fächert dem Körper nicht etwa kühle Luft zu - woher sollte sie in einer warmen Umgebung auch kommen? - sondern der vom Ventilator ausgehende Luftstrom verdünnt wiederum die den Körper umgebende isolierende Lufthülle.

Schwitzen:

Dieses Prinzip funktioniert nur so langt, wie die Umgebungstemperatur unterhalb der Körpertemperatur liegt. Anderenfalls würde das Gegenteil bewirkt:

Man denke nur an das Verwedeln von Luft in einer Sauna. Die den Körper streichende Luft erscheint heißer als bei Bewegungslosigkeit. Daher

ist vor allem bei höheren Umgebungstemperaturen gleichzeitig ein anderer Effekt von Bedeutung: Um sich gegen eine Überhitzung zu schützen, sondert der Körper Wasser ab, das auf der Körperoberfläche verdunstet. Wegen der hohen Verdunstungswärme von Wasser wird dem Körper dadurch ein relativ großer Wärmestrom entzogen. Dieses sogenannte Schwitzen ist umso effektiver, je niedriger die Luftfeuchte der umgebenden Luft ist. Bei ruhiger Luft wird die den Körper unmittelbar umgebende Lufthülle sehr schnell feuchtigkeitsgesättigt sein und kann keine weitere Feuchtigkeit mehr aufnehmen. Das Schwitzen wird dann wirkungslos. Luftbewegungen können in einem solchen Fall die feuchte Luft gegen relativ trockene Luft austauschen und eine entsprechende Kühlung hervorrufen. Ist die dem Körper zugeführte Luft jedoch bereits relativ feucht, so nützt auch die Luftbewegung nichts mehr. Feuchte warme Luft (Schwüle) wird daher häufig als sehr viel unangenehmer empfunden als trockene warme Luft.

Warme Kleidung:

In vielen Fällen ist jedoch die kühlende Wirkung von bewegter Luft (z.B. Wind) unerwünscht. Nämlich dann, wenn die Umgebungstemperaturen so niedrig sind, daß der unbedeckte Mensch dadurch zuviel Wärme verliert. In solchen Fällen muß dafür Sorge getragen werden, daß die Konvektion vermindert und die den Körper isolierende Luftschicht möglichst vergrößert wird. Vor allem diesem Zweck dient die Bekleidung. Indem sie einerseits verhindert, daß Luftbewegungen den Körper direkt erreichen können und andererseits durch die Fasern zusätzlich Luft festhalten, wird der Körper von der kalten Umgebung isoliert. Interessant ist, daß nicht der Gewebestoff selbst entscheidend ist, sondern sein Vermögen, den schlechten Wärmeleiter Luft an den Körper zu binden und ihn vor Konvektion zu schützen.

Flauschige Pullover nehmen besonders viel Luft auf und eignen sich sehr gut als Schutz gegen niedrige Umgebungstemperaturen. Allerdings wird ihre wärmende Wirkung durch Wind vermindert, weil der Wind durch die Maschen der Wolle hindurchdringt und die schützende Lufthülle verdünnt. Für diesen Fall sind Windjacken u. ä. geeigneter, die den Zweck haben, den Wind abzuhalten (Einzelheiten siehe z.B. Kelley 1956). Auch die im Häuserbau verwendeten Isoliermaterialien aus Glas- oder Steinwolle sind in erster Linie Konvektionsverhinderer für die in ihrem Innern eingeschlossene Luft.

Blutkreislauf als Wärmetransporteur:

Dafür, daß die vor allem im Innern des menschlichen Körpers anfallende Wärme zur Körperoberfläche transportiert wird, ist in erster Linie der Blutkreislauf verantwortlich. Im Körperinnern erwärmtes Blut wird durch die Arterien bis unter die Haut transportiert und gibt hier aufgrund der niedrigen Temperatur der äußeren Körperregionen einen Teil der Wärme ab. Das abgekühlte Blut wird durch die Venen zum Herzen zurückgepumpt und nimmt erneut Wärme aus dem Körperinnern auf (Ashoff et al. 1958). Ohne diesen konvektiven Wärmetransport wäre eine ausreichende Wärmeentsorgung des Organismus nicht möglich.

Unter gewissen Umständen kann dieser Wärmetransport ganz gezielt zur Temperaturregelung des Körpers eingesetzt werden. Wenn der Organismus aufgrund extremer Außentemperaturen auszukühlen droht, kann der Blutstrom in Extremitäten, z.B. in den Beinen, bevorzugt auf innere Adern verlagert werden. Dadurch wird einerseits die Wärmeabgabe vermindert, weil das warme Blut nicht in allzu kalte Bereiche kommt. Andererseits wird durch die fehlende Erwärmung der Außenbereiche die Temperatur dort weiter abgesenkt, der Temperaturunterschied zur Umgebung und damit die Wärmeabgabe vermindert. Notfalls nimmt der Körper Erfrierungen der weniger „wichtigen“ Extremitäten in Kauf um eine lebensbedrohende Absenkung der Körpertemperatur zu verhindern.

Bei sehr hohen Außentemperaturen können umgekehrt bevorzugt äußere Adern benutzt werden, um auf diese Weise die Hauttemperatur und damit die Wärmeabgabe an die Umgebung zu erhöhen. Dieser Vorgang wird als Rötung der Haut sichtbar. Bei einigen Tieren spielen ähnlichen Gegenstrommechanismen bei der Temperaturregelung eine wichtige Rolle (vgl. Schmidt-Nielsen 1979, S. 7 ff.).

5 Mechanismen der Temperaturregelung

Der Vorteil der Warmblüter besteht in ihrer größeren Unabhängigkeit von den Schwankungen der Umgebungstemperatur. Allerdings muß diese Unabhängigkeit durch sicher wirkende Mechanismen erkauft werden die Körpertemperatur allen äußeren Einflüssen zum Trotz konstant zu halten.

Das Gleichgewicht zwischen der vom menschlichen Körper produzierten und abgegebenen Wärme wird gestört, wenn

- bei unveränderten äußeren Bedingungen die Energieproduktion des Organismus verändert wird (z.B. dadurch, daß man sich nach getaner körperlicher Arbeit ausruht oder im Anschluß an körperliche Ruhe körperlich aktiv wird).

- bei gleichbleibender Energieproduktion die äußeren Bedingungen sich ändern (z.B. dadurch, daß man einer Umgebung mit einer anderen Temperatur ausgesetzt ist.)

Besteht die Störung des Fließgleichgewichts zwischen körperlicher Energieproduktion und -abgabe darin, daß mehr Wärme abgeführt als vom Körper produziert wird, so empfindet der betroffene Mensch es als zu kalt, im umgekehrten Fall als zu warm.

Wenn einem zu warm ist, stehen in der Regel mehrere Abwehrreaktionen zur Wahl. Zum Beispiel:

- Es wird ein kühler, schattiger Ort aufgesucht oder ein kühles Bad genommen (Erniedrigung der Umgebungstemperatur).
- Kleidung wird abgelegt (Verminderung der Isolierung);
- Mit Hilfe eines Fächers oder Ventilators wird den unbedeckten Teilen des Körpers Luft zugewedt (Erhöhung der Konvektion).

Können aus welchen Gründen auch immer derartige bewußte Maßnahmen nicht getroffen werden, so reagiert der Organismus unwillkürlich:

- Der Mensch beginnt zu schwitzen, d.h. Wasser wird über die Haut abgegeben (Manche Tiere z.B. Hunde, geben die Feuchtigkeit durch Hecheln mit der Atemluft an die Umgebung ab).

Die Hauttemperatur an Extremitäten (z.B. an den Beinen) wird erhöht, indem das vom Herzen kommende warme Blut durch weiter außen gelegene, das zum Herzen fließende kühlere Blut durch weiter innen gelegene Adern geleitet wird (siehe oben). (Erhöhung der Temperaturdifferenz zur Umgebung).

Wenn einem zu kalt ist, wird man hingegen in der Regel eine oder mehrere der folgenden Maßnahmen ergreifen:

- Einen wärmeren, sonnigeren oder windgeschützteren Ort aufsuchen (Erhöhung der Umgebungstemperatur oder Verminderung der Konvektion).
- Zusätzliche „warme“ oder windundurchlässige Kleidung anziehen (Erhöhung der Isolierung).
- Körperlich aktiv werden (z.B. Armschlagen, Laufen, dadurch Erhöhung der körperlichen Wärmeproduktion). Dabei kann es jedoch zu folgendem Konflikt kommen: Durch die Bewegung kann insbesondere bei unbedeckten Menschen die isolierende Luftschicht zerstört werden, wodurch wiederum eine Abkühlung bewirkt wird.

Wenn derartige bewußte Maßnahmen unterblei-

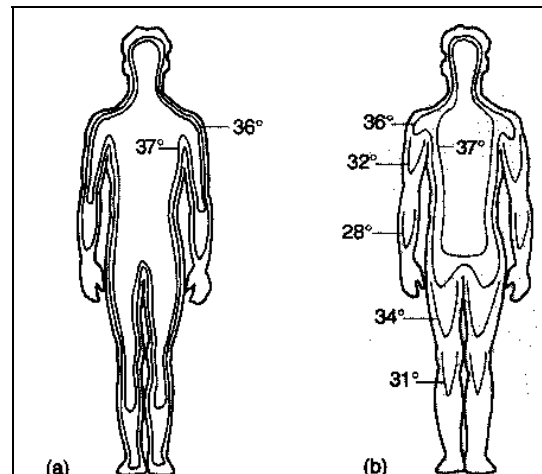


Abb. 3 Oberflächen konstanter Temperatur im menschlichen Körper in einer warmen (a) und einer kalten (b) Umgebung. (Nach Ashoff et al. 1958)

ben, hilft sich der Organismus wiederum so gut er kann selbst:

- Im Schlaf frierende Menschen rollen sich zusammen. Manche Tiere z. R Kühe kuscheln sich aneinander (Verminderung der der kalten Umgebung ausgesetzten Körperoberfläche).
- Es entsteht eine Gänsehaut. Dabei treten die Körperporen hervor, und es werden die Körperhaare aufgestellt. Auf diese Weise wird eine dickere Luftschicht an den Körper gebunden als es bei glatter Haut der Fall wäre, und der Wärmestrom vom Körper zur Umgebung wird verringert. (Erhöhung der Isolierung).
- Durch Kältezittern werden Muskeln aktiviert. (Erhöhung der Wärmeproduktion des Organismus).
- Die Hauttemperatur an Extremitäten (z. B. an den Beinen) wird erniedrigt, indem das warme Blut durch weiter innen gelegene das kühlere Blut durch weiter außen gelegene Adern geleitet wird (siehe oben). (Erniedrigung der Temperaturdifferenz zur Umgebung).

Alle Maßnahmen laufen somit darauf hinaus, das gestörte Fließgleichgewicht zwischen Wärmeproduktion und -abgabe wieder herzustellen, indem formal gesprochen - einzelne der in den Gleichungen (1), (2) und (3) auftretenden Variablen entsprechend beeinflußt werden.

6 Einige quantitative Abschätzungen

Die wesentlichen Wärmetransporterscheinungen zwischen Mensch und Umgebung lassen sich rein qualitativ beschreiben. Manchmal kann es jedoch

interessant sein, über genauere zahlenmäßige Abschätzungen zu verfügen. Dann muß man mit den Gleichungen. (1), (2) und (3) rechnen.

Dazu einige Beispiele: *Beispiel 1:* Ein Mensch Körpermasse $m = 70$ kg, Körperoberfläche $A = 1,8\text{m}^2$ produziere aufgrund leichter körperlicher Aktivitäten einen Wärmestrom von $P_L = 270\text{W}$. Damit es im Körperinnern (das sei das im Durchschnitt tiefer als $d = 3\text{cm}$ unter der Haut befindliche Gebiet des Körpers) zu keiner Temperaturerhöhung über $T = 310\text{K}$ ($\equiv 37^\circ\text{C}$) hinaus kommt, muß der Wärmestrom P_L nach außen zur Körperoberfläche abgeführt werden. Welche Temperatur T_H müßte die Haut haben, wenn der Wärmestrom allein durch Wärmeleitung erfolgte? (Für die Wärmeleitfähigkeit des Körpers setzen wir den für Fett ermittelten $\lambda_M = 0,2$ W/(m K) ein (vgl. Tab. 1). Durch Umformung von Gl. (1) und Einsetzen der bekannten Größen erhält man

$$T_H = T_K - \frac{d \cdot P}{\lambda_M A} = 287,5 \text{ K} \quad (\equiv 14,5^\circ\text{C}).$$

Das ist ein völlig unrealistischer Wert, wenn man bedenkt (siehe Abb. 3), daß die Hauttemperatur allenfalls einige Grade unter der Körpertemperatur liegt. Ganz abgesehen davon wäre in einem solchen Fall bei Außentemperaturen oberhalb von $14,5^\circ\text{C}$ überhaupt keine Wärmeabgabe an die Umgebung mehr möglich.

Aus dem Beispiel erkennt man, daß bei diesem Wärmetransport die Wärmeleitung durch das Körpergewebe nur von untergeordneter Bedeutung sein kann. Entscheidend ist der konvektive Wärmetransport durch das Blut, das im Körperinnern aufgewärmt wird, in die kühleren Hautregionen fließt, dort Wärme abgibt und auf diese Weise abgekühlt ins Körperinnere zurückkehrt usw.

Wir haben bereits darauf hingewiesen, daß der Wärmetransport von der Körperoberfläche zur Umgebung durch ein Zusammenspiel von Wärmeleitung und Konvektion zustande kommt. Dabei wird die Wärme durch die am Körper haftende Luftschicht geleitet, (die je nach Luftbewegung, Bekleidung usw. in ihrer Dicke schwanken kann) und gelangt dann in bewegte Luftschichten, d.h. wird durch Konvektion weiter transportiert. Da beim Übergang von Wärmeleitung zur Konvektion keine Wärme verlorengehen kann, genügt es, entweder den Wärmestrom durch Wärmeleitung P_L oder durch Konvektion P_K (siehe oben) zu berechnen. Im ersten Fall muß man die mittlere Luftschichtdicke d_1 , im letzten Fall den Wert der Konstanten q (in Gl. (1) bzw. (2)) kennen.

Beispiel 2: Sowohl über d_1 als auch über q findet man in der Literatur Angaben für spezielle Situationen. Beispielsweise beträgt für einen nackten

Menschen bei Windstille $d_1 = 4-8$ mm (je nach Ausprägung des Haarkleides) (*Precht et al. 1973*); für eine vergleichbare Situation beträgt $q = 7/(\text{m}^2 \text{K})$ (*Kane et al. 1980, S. 204*). Für einen wenig behaarten, nackten Menschen ($d_1 = 4$ mm) in einer Umgebung von $T_U = 296\text{K}$ ($\equiv 23^\circ\text{C}$) berechnet man gemäß GL. (1):

$$P_L = \frac{\lambda_i}{d_1} \cdot A (T_H - T_U) = 105 \text{ W},$$

wenn man von einer Hauttemperatur $T_H = 305\text{K}$ ($\equiv 32^\circ\text{C}$) $\lambda_1 = 0,026\text{W}/(\text{m K})$ und $A = 1,8\text{m}^2$ ausgeht:

Benutzt man stattdessen Gl. (2), so ermittelt man für dieselbe Situation

$$P_K = q \cdot A (T_H - T_U) = 113 \text{ W},$$

also einen vergleichbaren Wert.

Der auf diese Weise berechnete Wärmestrom $P_L = P_K$ entspricht in etwa dem Leistungsinput eines ruhig sitzenden (70kg schweren) Menschen (vgl. Tab. 8 in: *Schlichting 1983*). Die Wärmebilanz scheint demnach ausgeglichen zu sein, und der Mensch müßte sich eigentlich behaglich fühlen. Erfahrungsgemäß ist dies jedoch unter den gegebenen Umständen für einen nackten Menschen nicht der Fall. Er wird mit Sicherheit frieren, d.h. in Wirklichkeit mehr Wärme verlieren, als wir abgeschätzt haben. Der Grund ist darin zu sehen, daß wir die Wärmestrahlung völlig außer Acht gelassen haben.

Beispiel 3. Zusätzlich zum Wärmestrom P_L bzw. P_K tritt noch gemäß Gl. (3) ein Wärmestrom von

$$P_S = \sigma A (T_H^4 - T_U^4) = 100 \text{ W},$$

hinzu, wenn man unterstellt, daß die Gegenstände in der Umgebung, mit denen der menschliche Körper Strahlung austauscht, die Temperatur der umgebenden Luft besitzen. Um nicht zu frieren, müßte der unbedeckte Mensch schon einen Gesamtwärmestrom $P = P_S + P_L$ von etwas mehr als 200W aufbringen. Dies würde ihm gemäß Tab. 8 (a. a. O.) erst bei leichten Freiübungen gelingen.

Literatur

- [1] *J Ashoff, R. Wever:* Kern und Schale im Wärmehaushalt des Menschen. Die Naturwissenschaften 4-5, 477 (1958)
- [2] *J. Kane, M. Stemheint:* Physics. New York: Wiley 1980
- [3] *I. B. Kelley:* Heat, Cold and Clothing. Scientific American 194/2, 109 (1956)

[4] *H. Leonardt*: Histologie, Zytologie und Mikroanatomie des Menschen. München: Thieme 1977

[5] *H. Precht* (Hrsg.): Temperature and Life. Berlin etc.: Springer 1973

[6] *H. J. Schlichting*: Energie und Energieentwertung in Naturwissenschaft und Umwelt, Heidelberg: Quelle & Meyer 1983

[17] *K. Schmidt-Nielsen*: Physiologische Funktionen bei Tieren. Stuttgart: Fischer 1979