

Prof. Dr.-Ing. E. Specht  
Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

# **Der Mensch als wärmetechnisches System**

(Mess- und Regelungsmechanismus der Betriebstemperatur, Wärmeabgabe, Energieerhaltung,  
Gewichtsänderung, Behaglichkeit)

17.05.2005

## 1. Einleitung

Der Mensch ist aus technischer Sicht ein biologischer Reaktor mit einer Betriebstemperatur von 37 °C. Da die Umgebungstemperatur des Menschen niedriger ist, gibt er ständig Wärme ab. Daher muß durch innere Oxidations- (Verbrennungs-) prozesse laufend Energie erzeugt werden. Wie bei jedem Verbrennungsprozeß werden auch beim Menschen Abfallstoffe erzeugt. Diese sind fest, flüssig und gasförmig, wobei für jede dieser drei Abfallarten ein separater Ausgang besteht. Die gasförmigen Emissionen verteilen sich allerdings gelegentlich auf zwei Ausgänge. Im folgenden steht jedoch nicht die Abfallproblematik sondern der Energiehaushalt im Vordergrund. Der Energiehaushalt und damit das Gewicht sowie die Figur unterliegt physikalischen Gesetzen und kann mit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik erklärt werden. Der Mensch reagiert äußerst empfindlich auf Änderungen seiner Betriebstemperatur. Daher besitzt er ein aufwendiges Meß- und Regelungssystem. Hierauf wird zunächst eingegangen.

## 2. Betriebstemperatur des Menschen

Die Reaktionen im menschlichen Körper sind auf eine Kerntemperatur von 37 °C eingestellt mit einer Toleranz von etwa  $\pm 0,5$  Kelvin (Grad). Am wärmsten ist es in der Leber und in der Niere, wo die intensivsten chemischen Reaktionen ablaufen, am kältesten ist die Haut, die etwa 4 bis 7 Kelvin (Grad) kälter ist. Der Mensch ist gegenüber inneren Temperaturschwankungen sehr empfindlich. Das empfindlichste Organ beispielsweise, das Gehirn, bricht bei Temperaturen oberhalb von 40,5 °C und unterhalb von 35 °C zusammen. Ab einer Temperatur von 41 °C beginnen sich die Eiweißstrukturen zu verformen und das Gewebe zu zerstören. Bei einer Temperatur von 34 °C läßt die Aufmerksamkeit nach und man verliert die Sprache. Unterhalb von 33 °C wird der Stoffwechsel reduziert und die Fähigkeit der Thermoregulation geht verloren. Es besteht dann Lebensgefahr. Bei 27 °C wird man bewegungsunfähig und bei 25 °C tritt als Folge ungenügender Atmung der Tod ein.

## 3. Meßsystem

Zur Wahrnehmung der Temperatur besitzt der Mensch zwei spezielle Sinne, nämlich einen Kälte- und einen Wärmesinn. Damit hat der Mensch mehr als die sonst bekannten "fünf" Sinne. In der Haut befinden sich Wärme- und Kältepunkte, jeder etwa einen Quadratmillimeter groß. Unter ihnen stecken Nervenzellen, deren innere Chemie sich je nach Temperatur verändert. Dadurch werden Signale ausgelöst und ans Gehirn geleitet.

Die Sensoren liegen am dichtesten auf den Lippen. Die Dichte beträgt hier 25 Sensoren pro Quadratcentimeter. Mit den Lippen wird überwacht, daß die Nahrung, die wir zu uns nehmen, nicht zu heiß oder zu kalt ist. An den Fingern befinden sich noch 5 Sensoren pro Quadratcentimeter. Mit den Fingern können daher gut Temperaturen getastet werden. Am Rumpf befindet sich ungefähr nur 1 Sensor pro Quadratcentimeter. Am temperaturunempfindlichsten sind die Waden. Daher werden zur Fiebersenkung "Wadenwickel" gemacht, da dort die Wärmeabfuhr am wenigsten bemerkt wird und nicht so unangenehm ist.

Es gibt wesentlich mehr Kälte- als Wärmepunkte. Deren Meßgenauigkeit ist sehr hoch, der Meßbereich ist jedoch relativ klein. Die Kältesensoren besitzen einen Meßbereich von etwa 8 °C bis 37 °C und die Wärmesensoren von etwa 37 °C bis 50 °C. Unter 8 °C und über 50 °C besitzt der Mensch keinen Temperatursinn mehr sondern empfindet Schmerz. Die Kältesensoren haben ungefähr bei 25 °C und die Wärmesensoren bei 45 °C ihre höchste Empfindlichkeit, bei der noch Temperaturunterschiede von einem Hundertstel Kelvin wahrgenommen werden können.

#### 4. Mechanismus der Wärmeabgabe

Der Körper erzeugt ständig Wärme. Hierzu wird die Nahrung, die wir zu uns nehmen oxidiert und damit verbrannt. Zur Bewegung der Muskeln und damit zur Erzeugung von mechanischer Energie muß ebenfalls Nahrung verbrannt werden. Der Wirkungsgrad der Muskeln ist jedoch relativ gering. Etwa wie beim Automotor wird nur 20 % der Verbrennungsenergie zur Bewegung verbraucht. Die restlichen 80 % werden in Wärme umgewandelt und müssen als Wärmeverlust an die Umgebung abgeführt werden. Aufgrund unserer Bewegung fällt also stets Abwärme an.

Wie wird diese Abwärme an die Umgebung abgeführt? Zunächst muß die Wärme aus dem Inneren an die Oberfläche des Körpers transportiert werden. Dieser Transport wird durch den Blutkreislauf bewirkt. Zwischen Haut und Unterhaut befindet sich ein dichtes Geflecht von Adern und Venen, das lediglich der Wärmeabfuhr dient. Muß mehr Wärme als normal abgeführt werden, steigt die Hauptdurchblutung um das Acht- bis Zwölfwache. Dann wird fast ein Drittel des Blutes an die Oberfläche gepumpt. Die Adern und Venen weiten sich auf. Dadurch wird die Oberfläche zur Wärmeabgabe vergrößert. Man erkennt diesen Zustand an einer starken Rotfärbung der Haut. Bei Kälte dagegen verringert sich die Durchblutung der Haut auf ein Fünftel des Normalwertes. Die Haut sieht folglich kreidebleich aus. Durch Saunagänge übrigens wird das extreme Weiten der Hautgefäße und das anschließende jähe Zusammenziehen im Tauchbecken trainiert.

Von der Haut aus wird die Wärme durch Strahlung und durch Konvektion an die Umgebung abgegeben. Strahlung sind elektromagnetische Wellen, die luftdurchlässig sind und an festen Wänden absorbiert werden. Der Mechanismus des Wärmeübergangs durch Strahlung ist von der Strahlung der Sonne her bekannt. Mit Konvektion bezeichnet man die Wärmeabgabe an das umgebende Medium, in der Regel Luft und beim Baden Wasser. Reicht die Wärmeabgabe durch Strahlung und durch Konvektion nicht aus, weil beispielsweise die Umgebungstemperatur zu hoch ist oder weil durch starke Bewegung wie etwa sportliche Betätigung von den Muskeln viel Wärme erzeugt wird, so setzt der Körper als weiteres Mittel der Wärmeabgabe das Schwitzen ein. Durch die Verdunstung des Schweißes (Wasser) wird dem Körper die überaus hohe Phasenumwandlungswärme vom flüssigen in den dampfförmigen Zustand entzogen.

Zum Schwitzen besitzt der Mensch etwa zwei Millionen Schweißdrüsen. Die größte Dichte an Drüsen befindet sich am Kopf, da das Gehirn am schützenswertesten ist, die geringste Dichte befindet sich an den Gliedmaßen. Die Schweißdrüsen an den Handflächen und Fußsohlen dienen allerdings nicht der Kühlung. Diese Drüsen werden bei Unruhe, Beklemmung und Angst aktiv und bewirken das sogenannte "psychische Schwitzen". Die Schweißdrüsen in den Achselhöhlen haben ebenfalls einen anderen Sinn als kühlen. Sie erzeugen Duftstoffe mit ursprünglich sexueller Bedeutung.

Die Aufteilung der verschiedenen Arten der Wärmeabgabe beträgt bei einem ruhenden Menschen in einer Umgebung von 20 °C:

- 46 % Strahlung
- 33 % Konvektion
- 19 % Schwitzen
- 2 % Atmung.

Bei einer Veränderung der oben genannten Voraussetzungen verschieben sich die Anteile. Herrscht ein starker Wind, so erhöht sich der Anteil der Konvektion. Dadurch kommt es uns bei dieser Wetterbedingung kälter vor. Bei sportlicher Betätigung steigt der Anteil des Schwitzens.

## 5. Höhe der Wärmeabgabe

Die Höhe der biologisch notwendigen Wärmeabgabe hängt im wesentlichen

- von der Schwere der Tätigkeit und
- von der Größe der Körperfläche und damit von der Körpergröße des Menschen ab.

Im Bild 1 ist der abgegebene Wärmestrom eines Menschen mit Normgröße (75 kg) dargestellt, und zwar in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur mit der Schwere der Tätigkeit als Parameter. Der Normmensch gibt demnach als Mindestwert während ruhigem Sitzen bei Umgebungstemperaturen oberhalb 16 °C einen Wärmestrom von 120 W ab (durchgezogene Linie). Dieser Wert ist hierbei unabhängig von der Umgebungstemperatur. Unterhalb 16 °C nimmt der Wärmestrom mit abnehmender Umgebungstemperatur etwas zu. Die untere gestrichelte Linie des schraffierten Gebietes gibt die Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion wieder. Diese Art der Wärmeabgabe nimmt mit der Umgebungstemperatur bis zum Wert null bei 36 °C ab. Hat die Umgebung nämlich die Körpertemperatur erreicht, kann folglich durch Strahlung und Konvektion keine Wärme mehr abgeführt werden. Bei solch hohen Umgebungstemperaturen wird die Wärme ausschließlich durch Schwitzen abgeführt. Der schraffierte Bereich gibt die Höhe dieser Art der Wärmeabgabe an. In einer Umgebung mit Temperaturen oberhalb 37 °C kann also die Wärme nur noch durch Schwitzen abgeführt werden. Bei mittelschwerer Arbeit verdoppelt sich ungefähr die Wärmeabgabe des Menschen gegenüber dem ruhigen Sitzen, da die Muskeln, wie bereits erwähnt, zu 80 % Abwärme erzeugen. Bei schwerer Arbeit kann die Wärmeabgabe auf ca. 300 W ansteigen. Trainierte Sportler können noch höhere Leistungen erzeugen.

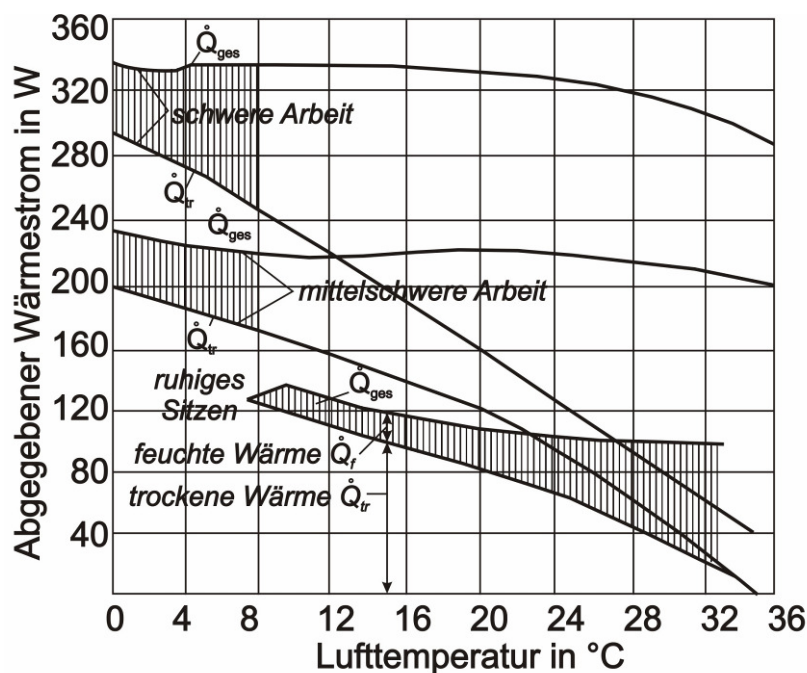


Bild 1: Wärmeabgabe des Menschen (75 kg)

Der abgeführte Wärmestrom  $\dot{Q}$  des menschlichen Körpers lässt sich mathematisch durch den Newtonschen Ansatz beschreiben:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot (\vartheta_{\text{Haut}} - \vartheta_{\text{Umgeb.}}) \quad (1)$$

Hierbei bedeutet  $k$  den Wärmedurchgangskoeffizient,  $A$  die Körperoberfläche,  $\vartheta_{\text{Haut}}$  die Temperatur der Hautoberfläche und  $\vartheta_{\text{Umgeb.}}$  die Temperatur der Umgebung. Die Wärmeabgabe des Menschen ist also proportional seiner Oberfläche und damit von der Körpergröße abhängig. Die Oberfläche eines normalen Menschen beträgt ungefähr  $2 \text{ m}^2$ . Große Menschen geben demnach mehr Wärme ab und müssen folglich mehr Energie mit der Nahrung zu sich nehmen, kleine Menschen entsprechend weniger. Aus der obigen Gleichung ist weiterhin ersichtlich, daß der Mensch umso mehr Wärme abgeben würde je kälter die Umgebung ist. Der Mensch gleicht diesen Effekt aus, indem er den Wärmedurchgangskoeffizienten entsprechend verringert. Dieser sogenannte  $k$ -Wert ist ein Maß für die Wärmeisolierung. Ein nackter Mensch hat beispielsweise einen  $k$ -Wert von ungefähr  $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Damit ergibt sich aus der obigen Gleichung der Wärmestrom von  $120 \text{ W}$  für eine Umgebungstemperatur von  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ . Bei dieser Temperatur fühlt sich der Mensch im Mittel am wohlsten. Bei höheren Temperaturen setzt vermehrtes Schwitzen ein. Unterhalb dieser Temperatur muß der Mensch seinen  $k$ -Wert verringern, um der erhöhten Wärmeabgabe entgegen zu wirken. Den  $k$ -Wert verringert man bekanntlich durch die Art der Kleidung. Durch normale Kleidung beispielsweise wird der  $k$ -Wert halbiert, durch warme Kleidung um  $2/3$  gesenkt.

## 6. Energiebilanz des Menschen

### Täglicher Energiebedarf

Wie aus Bild 1 ersichtlich ist, gibt ein durchschnittlich großer Mensch bei leichter Tätigkeit einen Wärmestrom von ungefähr  $120 \text{ W}$  ab. Damit ergibt sich eine über den Tag (24 Stunden) abgegebene Wärmemenge (durch Multiplikation mit  $24 \text{ h}$ ) von ungefähr

2,9 kWh pro Tag.

Dies ist eine relativ kleine Energiemenge. Dieselbe Menge an Energie wird beispielsweise verbraucht, wenn eine Glühbirne von  $120 \text{ W}$  den ganzen Tag brennt. Der Wert dieser Energie liegt unter Zugrundelegung eines Strompreises von  $30 \text{ Pf}$  je Kilowattstunde bei  $90 \text{ Pf}$ .

Die obige abgeführte Energiemenge beträgt in einer anderen Einheit dargestellt

2500 kcal pro Tag.

Diese Energiemenge muß der durchschnittliche Mensch dem Körper jeden Tag mit der Nahrung wieder zuführen.

### Verminderte Energiezuführung (Gewichtsabnahme)

Was passiert nun, falls dem Körper mit der Nahrung weniger als diese  $2500 \text{ kcal}$  pro Tag zugeführt werden? Da der Körper die  $2500 \text{ kcal}$  unbedingt zur Verbrennung und damit zur Aufrechterhaltung seiner Temperatur benötigt, muß er die Differenz zwischen benötigter und zugeführter Energie aus seiner gespeicherten Energiemenge decken. Dieses entspricht der Energieerhaltung, die ein Naturgesetz ist und als 1. Hauptsatz der Thermodynamik bezeichnet wird. In allgemeiner Form besagt dieses Gesetz, daß die Differenz aus zu- und abgeführter Energie gleich der Zu- oder Abnahme der gespeicherten Energie sein muß.

Der Körper speichert Energie in Form von Fettpolstern. Fett ist ein Stoff mit überaus hohem Energiegehalt und besitzt eine Verbrennungswärme von rund  $8000 \text{ kcal}$  pro Kilogramm. Wenn man also einen Tag lang keine Energie zuführt (Nulldiät), baut der Körper  $300 \text{ Gramm}$

Fett ab. Dies ist die maximale Gewichtsabnahme, die man pro Tag erreichen kann! Mehr kann man aus physikalischen Gründen (Energieerhaltung) nicht abnehmen.

Aus obigen Ausführungen wird deutlich, daß der Körper (zwangsläufig!) Fett und damit Gewicht abbauen muß, falls ihm mit der Nahrung keine Energie zugeführt wird. Unter Nahrung wird Essen und Trinken verstanden. Insbesondere über zucker- und alkoholhaltige Getränke wird dem Körper oftmals viel Energie zugeführt. Ein Mensch mit beispielsweise 30 kg Übergewicht müßte 100 Tage lang fasten, um Normalgewicht zu erreichen. Er könnte aus energetischer Sicht einen Winterschlaf halten, ohne zu verhungern. Dieses ist jedoch stofflich nicht möglich, da der Mensch durch Schwitzen Wasser und damit auch Salze und Mineralstoffe verliert. Tiere, die einen Winterschlaf halten, können daher nicht schwitzen. Falls dem Körper also genügend Wasser, Mineralien und auch Vitamine zugeführt werden, ist ein Fasten bei gesunden Menschen unbedenklich! Erst wenn alle Fettreserven aufgebraucht sind, wird Fasten gefährlich: Der Körper baut dann nämlich Muskeln zur Energieerzeugung ab. Der Mensch kann sehr lange Fasten ohne zu verhungern, sofern ausreichend Flüssigkeit zugeführt wird. Dies ist in der Praxis oftmals bewiesen worden: Auf makabre Weise in Gefangenen- und Konzentrationslagern, bei Hungerstreiks und bei radikalen Kuren zum Abspecken, bei denen oft ein Jahr lang gefastet wurde.

Schlankheitsmittel versprechen oft höhere Gewichtsabnahmen pro Tag als 300 Gramm. Diese Mittel enthalten Stoffe, die Wasser aus dem Gewebe ziehen, das dann über den Harnweg ausgeschieden wird. Da der Körper zu 60 % aus Wasser besteht, kann durch Wasserentzug eine schnelle Gewichtsreduzierung vorgetäuscht werden. Ein gesunder Körper lagert das Wasser nach Absetzung der Präparate wieder an. Eine echte Gewichtsabnahme kann also nur durch Fettabbau und damit Fasten erreicht werden. Andere Schlankheitsmittel enthalten daher Appetitzügler und/oder Stoffe, die im Magen aufquellen und somit ein Sättigungsgefühl hervorrufen.

### **Vermehrte Energiezuführung (Gewichtszunahme)**

Was passiert nun, wenn man mit der Nahrung mehr als die 2500 kcal pro Tag zur Deckung der Wärmeverluste dem Körper zuführt? Entsprechend der Energieerhaltung (1. Hauptsatz der Thermodynamik) wird dann die Differenz zwischen der zugeführten und abgeführten Energie gespeichert, und zwar in Form von Fett. Falls man permanent mehr Energie als 2500 kcal pro Tag zuführt, wird solange Fett angesetzt, bis ein neuer Gleichgewichtszustand erreicht ist. Dieser Zustand ist dann gegeben, wenn entsprechend Gleichung (1) sich die Oberfläche des menschlichen Körpers so vergrößert hat, daß die zugeführte Energie wieder an die Umgebung abgeführt werden kann. Nimmt man beispielsweise durchschnittlich 3000 kcal pro Tag zu sich, stellt sich der neue Gleichgewichtszustand bei einer um 20 % vergrößerten Körperoberfläche ein.

Da bei Übergewicht mehr Wärme abgeführt werden muß, wird ein höherer Blutkreislauf benötigt, um die Wärme aus dem Inneren des Körpers an die Hautoberfläche zu transportieren. Folglich wird das Herz stärker als im Normalfall belastet. Dies ist mit ein wesentlicher Grund, warum Übergewichtige besonders stark von Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Bluthochdruck, Cholesterin, Diabetis, Arteriosklerose, u.s.w. betroffen sind und dadurch eine geringere Lebenserwartung besitzen.

### **Einfluß des Stoffwechsels**

Wie aus den bisherigen Ausführungen ersichtlich ist, muß ein durchschnittlich großer Mensch bei leichter Tätigkeit zwangsläufig abnehmen, falls er weniger als 2500 kcal pro Tag mit der Nahrung zu sich nimmt. Falls er mehr Kilokalorien zuführt, wird er zwangsläufig

übergewichtig. Häufig wird behauptet, daß dieses nicht stimmen können, da die Menschen einen unterschiedlichen "Stoffwechsel" hätten. So soll der eine Mensch zunehmen, weil er angeblich alles verwerten kann, ein anderer Mensch jedoch trotz gleicher Nahrungsaufnahme schlank bleiben. Der Wirkungsgrad der Verbrennung sei also bei den Menschen verschieden.

Betrachten wir in diesem Zusammenhang die menschliche Entwicklungsgeschichte. Während einer mehr als 100 000jährigen Evolution hatte der Mensch stets unter Mangelernährung zu leiden, zumindest nach der Völkerwanderung in unseren Breiten. Im Mittelalter sind mehr Menschen verhungert als durch Krankheiten und Kriege gestorben. Der menschliche Organismus hat sich daher, ebenso wie der tierische Organismus, dahingehend entwickelt, die zugenommene Nahrung vollständig verwerten zu können. Daher kann er auch in Phasen eines Nahrungsüberschusses diesen sofort in Fett umwandeln und speichern. Ein permanentes Überangebot an Nahrung steht den Menschen, und auch nur denen der Industrienationen, erst seit etwa 40 Jahren zur Verfügung - ein winziger Zeitraum der Menschengeschichte. Lediglich ein kranker Organismus kann die Nahrung nicht vollständig verwerten. Beispielsweise bei einer Erkrankung der Galle wird Fett zum Teil unverdaut ausgeschieden, was dann an einer hellgelblichen Färbung des Stuhls zu erkennen ist.

Kleinere individuelle Unterschiede in der Nahrungsverwertung gibt es dennoch, die jedoch eine andere Ursache haben. Der Magen-Darmtrakt kann manche Lebensmittel nur verwerten, wenn diese ausreichend zerkleinert sind. So können beispielsweise ganze Getreidekörner nicht verdaut werden. Bei Menschen, die ihre Nahrung also nur flüchtig und grob zerkauen, können daher Teile unverdaut wieder ausgeschieden werden. Der Anteil dieser Lebensmittel an unserer gesamten Nahrung ist allerdings so gering, daß dieser unwesentlich zu Unter- oder Übergewicht beiträgt. Der Mensch hat keine Möglichkeit, überschüssige Nahrung wieder auszuschcheiden.

## **7. Individueller Energieverbrauch**

Der individuelle Energieverbrauch eines jeden Menschen kann sehr unterschiedlich sein, wie in den bisherigen Ausführungen gezeigt wurde. Die wichtigsten Ergebnisse werden im folgenden zusammengefaßt:

- Der Energieverbrauch des Menschen wird im wesentlichen durch seine Wärmeverluste an die Umgebung bestimmt.
- Der abgegebene Wärmestrom ist daher von der Größe des Menschen abhängig. Ein Mensch durchschnittlicher Größe mit einem Gewicht von 75 kg gibt einen Wärmestrom von ungefähr 120 W ab.
- Daraus ergibt sich ein täglicher Energiebedarf für diesen Normmenschen von 2500 kcal bei sitzender oder leichter Tätigkeit. Für jedes Kilogramm Abweichung von diesen 75 kg ändert sich der Energieverbrauch um etwa 30 kcal. Ein Mensch von 60 kg Gewicht benötigt daher täglich nur 2050 kcal, ein Mensch von 90 kg jedoch 2950 kcal.
- Dieser Grundbedarf erhöht sich etwas, wenn z. B. schwerere berufliche Tätigkeiten durchgeführt werden, Sport betrieben wird, oder falls man mit Fieber erkrankt ist.
- Der Grundbedarf kann sich geringfügig aufgrund des individuellen Wärmeempfindens des Menschen verändern. Menschen, die ihre Räume hoch heizen oder sich regelmäßig warm anziehen und sich damit besser isolieren, besitzen geringere Wärmeverluste und brauchen daher weniger Energiezufuhr. Menschen, die umgekehrt eine kältere Umgebung lieben und sich weniger warm anziehen, benötigen entsprechend mehr Energie.
- Wer weniger als seinen individuellen Grundbedarf an Energie (2500 kcal beim Normmenschen) zu sich nimmt, muß aus physikalischen Gründen zwangsläufig

- abnehmen. Die zur Aufrechterhaltung der Körpertemperatur benötigte Energie wird dann durch den Abbau des körpereigenen Fettes gedeckt.
- Die maximale Gewichtsabnahme bei vollständigem Fasten beträgt beim durchschnittlich großen Menschen etwa 300 Gramm pro Tag. Abmagerungskuren können deshalb nur über relativ lange Zeiträume durchgeführt werden.
  - Da Frauen in der Regel kleiner sind als Männer, nehmen sie bei Nulldiät weniger an Gewicht ab.
  - Wer durchschnittlich mehr als seinen individuellen Grundbedarf an Energie isst und trinkt, nimmt zwangsläufig, zu. Die Zunahme dauert so lange, bis die Oberflächenvergrößerung ausreicht, die Energie wieder an die Umgebung abzugeben.
  - Der individuelle Stoffwechsel des Menschen übt keinen Einfluß auf ein Unter- oder Übergewicht aus. Aufgrund der überwiegenden Mangelernährung der Menschen hat der Organismus während der Evolution alle Fähigkeiten entwickelt, in Phasen eines Überangebots an Nahrung, diese vollständig zu verwerten und die überschüssige Energie in Form von Fett zu speichern.

## 8. Behaglichkeit des Menschen

Die Behaglichkeit des Menschen hängt von der wärmephysiologisch "richtigen" Temperatur ab. Diese Temperatur ist jedoch keine Normgröße, sondern unterliegt subjektiven Empfindungen. Beispielsweise empfinden bei einer Raumlufttemperatur von 20 °C etwa 45 % der Männer und 40 % der Frauen thermisches Wohlbefinden. Diese Temperatur empfinden jedoch 15 % der Männer und 20 % der Frauen als zu kühl und jeweils 40 % als zu warm.

Die empfundene Temperatur des Menschen hängt von seiner Wärmeabgabe ab. Diese setzt sich durch Strahlung an die Raumwände mit der mittleren Temperatur  $\vartheta_w$  und durch Konvektion an die Luft mit der Temperatur  $\vartheta_L$  zusammen. Die empfundene Temperatur kann daher nach der Gleichung

$$\vartheta_e = \frac{\alpha_K \cdot \vartheta_L + \alpha_S \cdot \vartheta_w}{\alpha_K + \alpha_S} \quad (2)$$

berechnet werden, wobei  $\alpha_K$  und  $\alpha_S$  die Wärmeübergangskoeffizienten durch Konvektion bzw. Strahlung bedeuten. Auf deren Ermittlung wird hier nicht weiter eingegangen. In vielen Fällen sind die beiden Wärmeübergangskoeffizienten in etwa gleich groß, so daß die empfundene Temperatur näherungsweise als das arithmetische Mittel der Raum- und Lufttemperatur angesehen werden kann.

Der Mensch steht nun im Strahlungsaustausch mit mehreren Flächen unterschiedlicher Temperatur veranschaulicht ist. So strahlt der Mensch Wärme an die Fenster, an die Raumwände und an den Fußboden ab, die in der Regel unterschiedliche Temperaturen aufweisen. Je niedriger die Temperatur der Fläche ist, desto höher ist der abgestrahlte Wärmestrom. Vom Heizkörper nimmt der Mensch dagegen Strahlungswärme auf. Als mittlere Wandtemperatur für den Strahlungsaustausch wird die sogenannte Umschließungstemperatur  $\vartheta_U$  angesehen, die sich aus der flächenmäßigen Mittelung der einzelnen Wandtemperaturen entsprechend

$$\vartheta_U = \frac{A_1 \cdot \vartheta_1 + A_2 \cdot \vartheta_2 + \dots + A_n \cdot \vartheta_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (3)$$

zusammensetzt.



Die bei verschiedenen Luft- und Wandtemperaturen noch als behaglich empfundenen Temperaturen sind in Bild 2 dargestellt (schraffierter Bereich). So empfindet man es beispielsweise trotz einer relativ hohen Lufttemperatur von 25 °C als zu kalt, wenn die Umschließungstemperatur der Wände unterhalb 12 °C liegt. Dagegen fühlt man sich bei Lufttemperaturen von 15 °C noch behaglich, falls die Wandtemperaturen mit 22 °C bis 28 °C relativ warm sind.

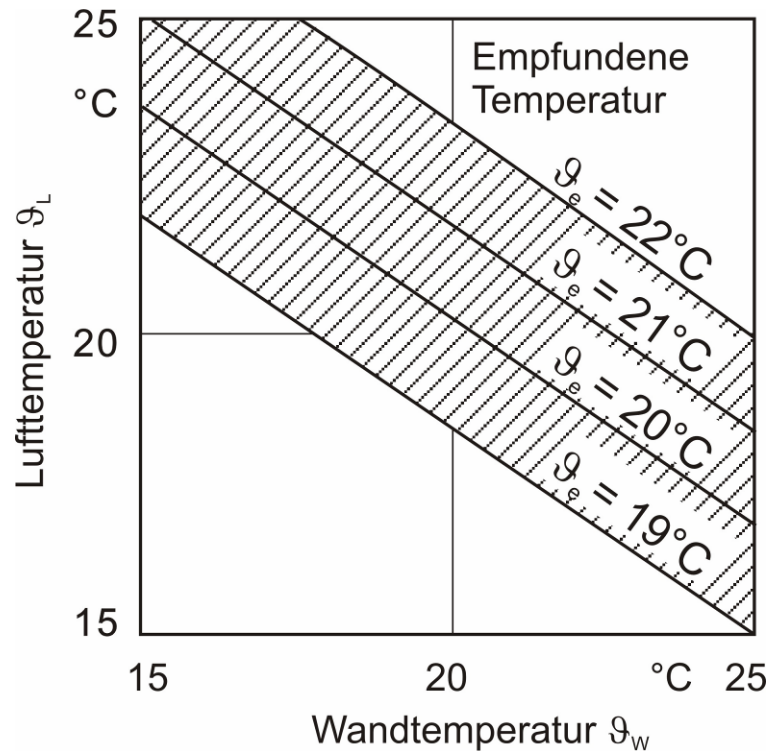


Bild 2: Behaglichkeitsfeld empfundene Temperatur in Räumen

Ein analoges Temperaturempfinden ergibt sich auch im Freien. Dort strahlt man Wärme an die Umgebung ab und empfängt Strahlung von der Sonne. An die Luft wird Wärme konvektiv abgeführt. Herrscht starker Wind, so ist die konvektive Wärmeübertragung um ein Vielfaches höher als bei ruhender Luft. Folglich kommt es einem draußen kälter vor. Das gleiche Kälteempfinden hätte man bei Windstille erst bei einer Lufttemperatur, die erheblich niedriger als die Windtemperatur ist. In den Wetterberichten wird die Windtemperatur als aktuelle Lufttemperatur bezeichnet und die Temperatur bei Windstille mit vergleichbarer Wärmeabgabe als "gefühlte" Lufttemperatur. Entsprechend fühlt oder empfindet man bei klarem Himmel eine höhere Außentemperatur als bei wolkeigem Wetter.

Eine Luftbewegung in Räumen hat ebenfalls Einfluß auf die Behaglichkeit, wie mit Bild 3 verdeutlicht wird. Bei einer Raumlufthtemperatur von 21 °C werden für sitzende Tätigkeiten Luftgeschwindigkeiten oberhalb ungefähr 0,17 m/s als Zug empfunden, für leichte Arbeiten im Stehen dagegen erst oberhalb 0,3 m/s. Mit zunehmender Raumlufthtemperatur verlagert sich das Zugempfinden zu höheren Geschwindigkeiten. Im Sommer beispielsweise mit einer Raumlufthtemperatur von 26 °C können noch Luftgeschwindigkeiten bis 0,5 m/s als behaglich empfunden werden.

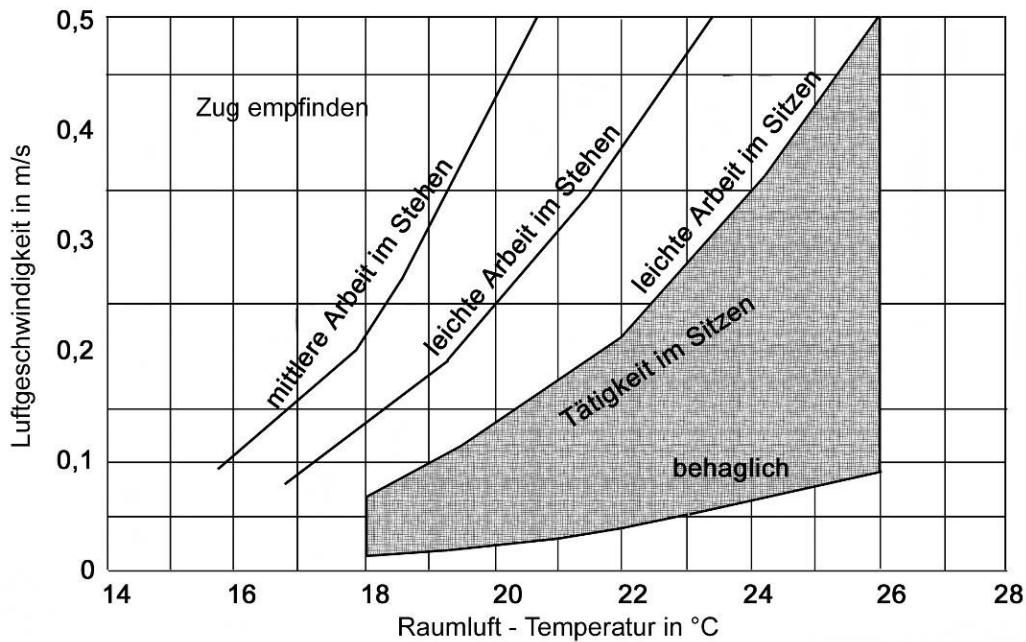


Bild 3: Behaglichkeit Luftgeschwindigkeit/Raumlufttemperatur

Einen weiteren Einfluß auf die Behaglichkeit übt die Luftfeuchtigkeit aus, da von dieser die Wärmeabgabe durch Schwitzen abhängt. **Bild 4** zeigt hierzu das Behaglichkeitsfeld. Eine relative Luftfeuchtigkeit von 60 % wird demnach bei Raumlufttemperaturen unterhalb 18 °C als zu trocken und oberhalb 23 °C als zu feucht oder zu schwül empfunden. Je höher die Raumlufttemperatur ist, desto niedriger liegt der Wert der relativen Luftfeuchtigkeit, der als Schwüle empfunden wird.

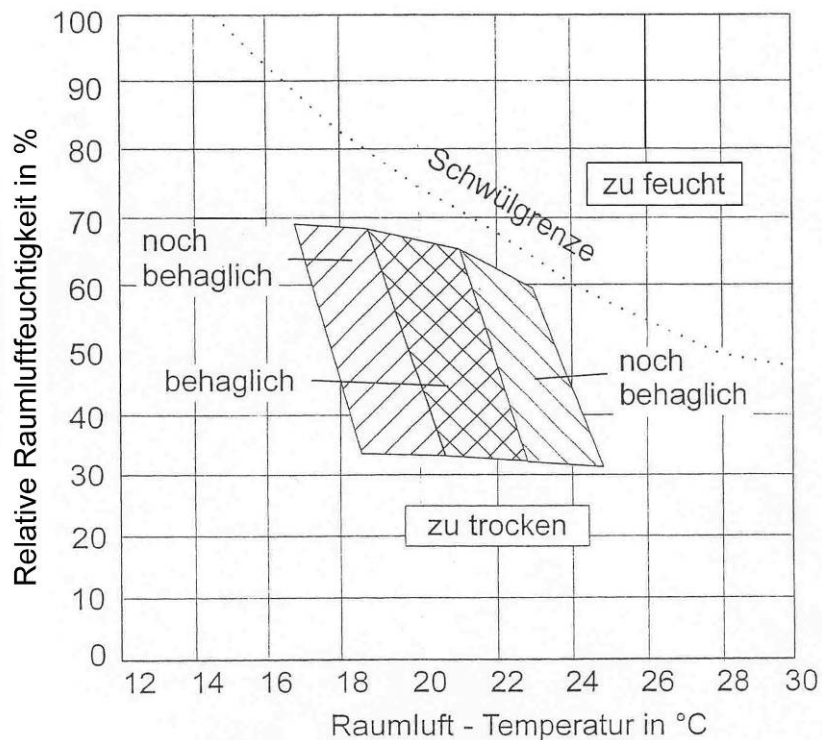


Bild 4: Behaglichkeitsfeld Raumlufttemperatur/rel. Luftfeuchtigkeit

Schließlich wirken sich noch Geruchsstoffe und Staub auf die Behaglichkeit aus. Staub macht sich bei zu trockener Luft als Kratzen im Hals bemerkbar. Im Winter besitzt die Außenluft nur eine geringe absolute Feuchtigkeit. Wird diese Luft durch die Raumheizung erwärmt, sinkt die relative Feuchtigkeit stark ab. Daher wird insbesondere in stark geheizten Räumen im Winter die Luft als trocken empfunden. Abhilfe schaffen in diesen Fällen Wasserverdunstungskästen an den Heizkörpern.

Geruchsstoffe werden von den Menschen laufend durch Schwitzen, Atmung, Sekretreste, Schleimhautzersetzungen usw. abgegeben. Ab einer gewissen Konzentration in der Luft werden die Geruchsstoffe als unangenehm empfunden. Folglich müssen Räume regelmäßig gelüftet werden. Infolge der Atmung wird von jedem Menschen etwa 20 l Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) je Stunde an die Raumluft abgegeben. Die gleiche Menge wird entsprechend an Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) verbraucht, so daß insbesondere in dichtbesetzten Räumen der Sauerstoffgehalt mit der Zeit etwas abnehmen kann. Allerdings ist bis herab zu 16 Vol % Sauerstoff in der Luft keine Beeinträchtigung des Wohlbefindens nachweisbar. Eine solch niedrige Sauerstoffkonzentration wird jedoch wegen der Undichtigkeit von Räumen nie erreicht. Daher ist das Lüften wegen "schlechter Luft infolge Sauerstoffmangels" als Begründung falsch. Störungen des Wohlbefindens in unzureichend belüfteten, dicht besetzten Räumen sind primär auf Behinderungen der Wärmeabfuhr infolge gesteigener und damit zu hoher Raumlufttemperatur sowie Luftfeuchte zurückzuführen. Ebenso trägt eine Anreicherung der Luft mit den Geruchsstoffen und mit dem ausgeatmetem Kohlendioxid bei. Wenn der  $\text{CO}_2$ -Gehalt in der Luft in Verbindung mit Geruchsstoffen den Wert von ungefähr 0,15 Vol % überschreitet (entspricht etwa den Fünffachen des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes der Umgebungsluft), läßt sich die Raumluft von der als appetitlich empfundenen Umgebungsluft geruchsmäßig unterscheiden und wird dann als schlecht oder unangenehm empfunden. Personen, die von außen solch volle Räume betreten, nehmen die schlechte Raumluft besonders deutlich wahr.