

Lebensraum Zimmer

thermodynamische Modellierung für das Wohlbefinden

von Gerhard Dorn
Referat am 26.4.2018 (Graz)

In diesem kurzen Artikel soll das subjektive Wohlbefinden in einem Raum bezogen auf die Temperatur, Wind, Luftfeuchtigkeit betrachtet werden. Dabei kann der Mensch als wärmetechnisches System betrachtet werden, das über eine ausgeklügelte Regelungstechnik verfügt, die eine optimale Betriebstemperatur von 36 bis 37° Celsius im Inneren gewährleistet. Das empfindlichste Organ des Menschen ist dabei das Gehirn, das Funktionseinbußen außerhalb des Temperaturbereichs von 35 bis 40,5° Celsius aufweist.

Temperatursensorik

Die zur Regelung notwendige Temperaturmessung findet ausschließlich an der Haut statt. Dabei weisen die Lippen die höchste Dichte an sogenannten Wärme- und Kältepunkten und die Waden die geringste Dichte auf.

Wärmeleistung

Der menschliche Stoffwechsel produziert als Nebenprodukt Wärme (die Wärmeleistung beträgt im Schnitt 120 Watt), die an die Umwelt abgeführt werden muss. Der Energiebedarf beträgt also ca. 2,9 Kilowattstunden, was etwa 2500 Kilokalorien entspricht.

Wärmeaustausch

Der Wärmeaustausch mit der Umgebung erfolgt auf vier verschiedene Arten (Prozentangaben beziehen sich auf einen ruhenden Menschen bei 20° Celsius Umgebungstemperatur):

1. Konvektion – der Wärmeaustausch über Materie (Erwärmen der Luft an der Haut), ca. 33%
2. Strahlung – Wärmeaustausch durch Infrarotstrahlung, ca. 46%
3. Atmung – Ausstoß von warmer Materie (feuchte Atemluft), ca. 2%
4. Schwitzen – Ausstoß von Flüssigkeit, Kühlung durch Verdampfung an Haut, ca. 19%

Der menschliche Körper hat im wesentlichen zwei Möglichkeiten um seine Temperatur zu regulieren (abgesehen von Bekleidungsvarianten). Die Haut besitzt ein feines Geflecht an Äderchen, welches einen Wärmetauscher darstellt. Bei hoher Außentemperatur können sich die Äderchen erweitern um so einen größeren Blutdurchfluss und eine damit verbundene höhere Wärmeabgabe zu ermöglichen. Die Haut erscheint deshalb rötlich. Bei kalter Außentemperatur kontrahiert sich dieses Äderchengeflecht, der Blutdurchfluss und damit die Wärmeabgabe an die kältere Umgebung wird minimiert und die Haut erscheint weißlich.

Bei steigender Umgebungstemperatur verliert dieses Wärmetauscherprinzip sukzessive seine Wirksamkeit. Speziell bei einer Umgebungstemperatur über 37° Celsius versagt dieses Kühlmechanismus komplett, da keine Wärme nach außen abgegeben sondern lediglich nach innen aufgenommen werden kann.

Um höheren Temperaturen gewachsen zu sein, besitzt der menschliche Körper ein zweites Wärmeaustauschsystem: das Schwitzen.

Dieses System macht sich die Verdampfungswärme von Wasser zu nutze. Die Haut scheidet Wasser in Form von Schweiß aus, welches verdampft. Der Verdampfungsprozess benötigt Wärme, entzieht also der Haut Wärme (bis zu 333 Watt pro Quadratmeter) wodurch diese gekühlt wird.

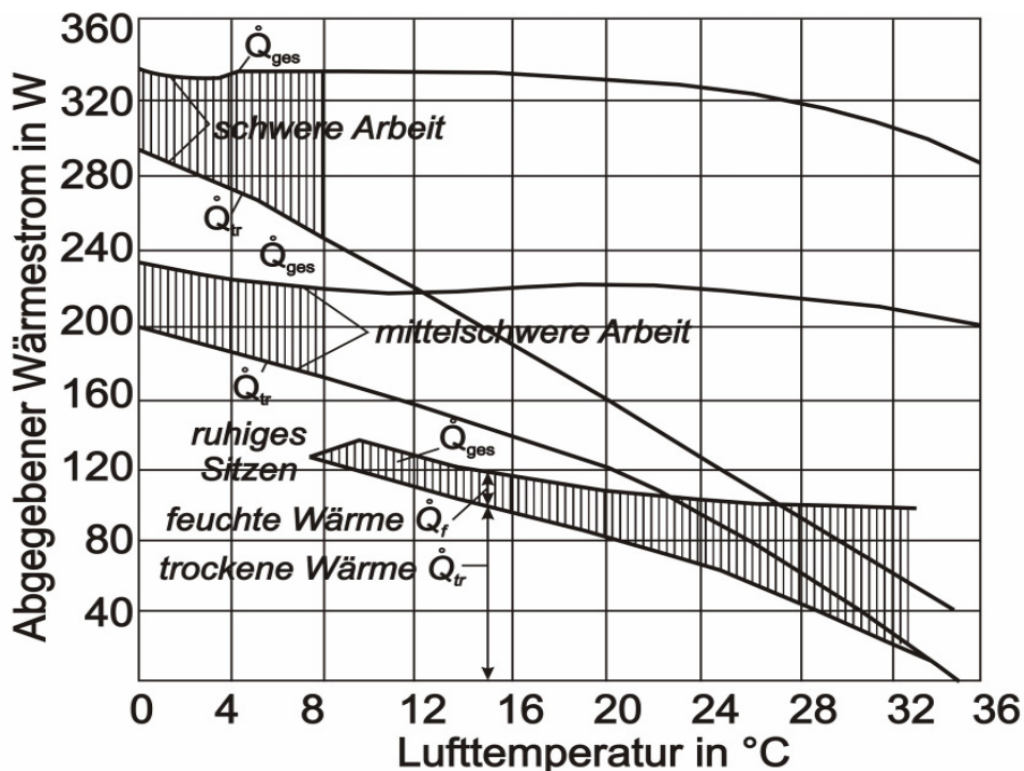


Abbildung 1: Höhe der Wärmeabgabe in Abhängigkeit der Lufttemperatur und der körperlichen Tätigkeit. Der strichlierte Bereich stellt den Anteil der Wärmeabgabe durch Schwitzen und Atmen dar. [1]

Die Effektivität von Schwitzen hängt stark von der Luftfeuchtigkeit ab, denn je höher die Luftfeuchtigkeit ist, desto schwerer verdampft der Schweiß, womit die Kühlung des Körpers erschwert wird, was an schwülen Sommertagen zu beobachten ist.

Modellierung der effektiven Umgebungstemperatur

Um in einem Raum eine effektive Umgebungstemperatur zu ermitteln muss neben der Lufttemperatur auch die Wandtemperatur mitbetrachtet werden. Luft und Wand tauschen Wärme mit dem Menschen aus, was durch die Wärmeübergangskoeffizienten α_K (Konvektion) und α_S (Strahlung) quantifiziert wird. Damit lässt sich die effektive Umgebungstemperatur durch folgende Formel ausdrücken:

$$T_U = \frac{\alpha_K \cdot T_L + \alpha_S \cdot T_W}{\alpha_K + \alpha_S}$$

Die Wärmeübergangskoeffizienten werden von Luftzug und der Bekleidung beeinflusst, können aber in einfachen Modellen als gleich groß angenommen werden. In einem Raum mit unterschiedlichen Temperaturen an den Wänden (Heizkörper, Fußbodenheizung, Fenster), wird die Wandtemperatur als gewichtetes arithmetisches Mittel errechnet.

An kalten Wintertagen reicht es für ein behagliches Raumklima nicht aus, eine Lufttemperatur von 25° Celsius zu haben, wenn die Wände zugleich sehr kalt sind. Heizkörper als sogenannte Hochtemperaturwärmeabgabesysteme heben sowohl die Lufttemperatur als auch die Wandtemperatur (da deren Oberfläche zur Raumbooberfläche gezählt wird), bewirken allerdings durch ihre hohe Temperatur ein thermisches Ungleichgewicht, wodurch ein Luftzug entstehen kann. Besser geeignet um solche Luftströme und der damit verbundenen Staubverwirbelung zu vermeiden sind großflächige Niedertemperaturwärmeabgabesysteme wie etwa Fußbodenheizungen.

Weitere Parameter zur thermodynamischen Modellierung

Um tatsächlich ein Raumklimamodell zu erstellen, sollten auch Luftfeuchtigkeit und Luftzug mitberücksichtigt werden. Zum einen haben sie wesentlichen Einfluss auf die Wärmeabgabemechanismen des Körpers, da eine höhere relative Luftfeuchtigkeit die Effizienz von Schwitzen mindert und ein Luftzug durch den Abtransport von verdampftem Schweiß die Effizienz erhöht. Zum anderen gibt es je nach Raumtemperatur gewisse Parameterbereiche für Wind und Luftfeuchtigkeit, die als behaglich oder unangenehm empfunden werden.

Beispiele für ein thermodynamisches Wohlfühlmodell

Um detaillierte Ergebnisse zu erhalten wird sowohl der Raum als auch der Körper in kleine Segmente unterteilt.

Das UC Berkeley Thermal Comfort Model [2] zerlegt zum Beispiel den Körper in 16 Segmente und unterteilt jedes Segment in vier Schichten, die grob nach Kern, Muskeln, Fett und Haut unterteilt sind. Jede dieser Schichten jedes Segmentes besitzt eine eigene Temperatur, und steht mit seiner Nachbarschaft auf unterschiedliche Weise in Wärmeaustausch. Der Kopf strahlt etwa wesentlich mehr Wärme ab als der Rumpf, da dieser durch Bekleidung recht gut isoliert wird.

Je nach Anstrengung produziert jedes dieser Schichtsegmente eine unterschiedliche Wärmemenge.

Ziel des Modelles ist es Behaglichkeit unter bestimmten äußeren Rahmenbedingungen vorherzusagen. Je nach Art der Belüftung, der Außentemperatur (Wandtemperatur) sollen Aussagen über das Wohlbefinden (etwa keine kalten Füße) getroffen werden können. Zum Beispiel können Simulationen einer Flugzeugkabine die Belüftung und die Behaglichkeit während des Fluges optimieren [4].

Quellen:

[1] Der Mensch als Wärmetechnisches System (Uni Magdeburg)

http://www.uni-magdeburg.de/isut/TV/Download/Der_Mensch_als_waermetechnisches_System.pdf

[2] Huizenga, C., Zhang, H., Arens, E., A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments. Building and Environment, 2001

[3] Völker, C., & Kornadt, O. (2010). Simulation und Messung der thermischen Behaglichkeit. Bauphysik, 32(6), 365-372.

[4] Streblow, R., Müller, D., Gores, I., & Bendfeldt, P. (2009). Thermisches Komfortmodell für inhomogene Umgebungsbedingungen. Bauphysik, 31(1), 38-41.