



C1 Einleitung

Hauptaufgabe der Heiz- und Raumlufttechnik ist es, ein für den Menschen angenehmes Raumklima zu schaffen. Der Begriff des Raumklimas umfaßt das thermische Klima und die Raumluftqualität. Dabei wird thermisches Raumklima den Parametern, die den Wärmehaushalt des Menschen beeinflussen, zugeordnet, während Raumluftqualität die übrigen auf den Menschen wirkenden Komponenten der Luft umfaßt.

Diese Definition des Raumklimas entspricht im großen und ganzen der Definition der Meteorologen für das Außenklima. Hinzuweisen ist auf eine mitunter breitere Auffassung, etwa im Sinne des Humboldtschen Mikroklimas, die alle physikalischen Größen, auch akustische und optische, einbezieht.

Zwar hat das Außenklima eine große Bedeutung für den Menschen, das Raumklima aber nimmt in einem wesentlichen Teil der Welt einen weit wichtigeren Platz für Gesundheit und Behaglichkeit des Menschen ein. Grund hierfür ist, daß in der Industriegesellschaft das Leben zu etwa 90% im Innenraum – in Wohnungen, Arbeitsstätten, Verkehrsmitteln – verbracht wird.

Die Lehre vom Raumklima besitzt interdisziplinären Charakter – sie umfaßt technische, naturwissenschaftliche und besonders auch medizinische Aspekte. Und sie hat vor allem zwei Ziele: Erstens den Einfluß des Raumklimas auf den Menschen zu erforschen und zweitens dieses Wissen technisch umzusetzen, um die Bedürfnisse des Menschen zu befriedigen.

Das Raumklima wirkt auf Behaglichkeit und Gesundheit des Menschen. Gesundheit wird oft als Abwesenheit von Krankheit definiert. Die Weltgesundheitsorganisation hat eine weit umfassendere Definition vorgegeben: „Gesundheit ist nicht nur das Freisein von Krankheit und Gebrechen, sondern der Zustand völligen körperlichen, geistigen und sozialen Wohlbefindens“. Die WHO hat damit auch die Behaglichkeit entsprechend gewichtet.

Ein Raumklima zu erzeugen, das Behaglichkeit und Gesundheit für alle sichert, ist wünschenswert. Es gibt viele Gründe, die dies behindern, und Klagen in der Praxis zeigen, wie schwierig es ist, alle Betroffenen zufriedenzustellen. Einer der wichtigsten Gründe ist die große individuelle Streuung, durch die unterschiedliche

Anforderungen an das Raumklima gestellt werden. Vom raumklimatischen Standpunkt wäre es wünschenswert, wenn sich jeder Mensch in einem besonderen Raum aufhielte, ausgestattet mit einer technischen Anlage, die ihm sein Wunschklima erzeugt. Auch in Räumen mit mehreren Menschen sollte daher angestrebt werden, daß der einzelne das ihn umgebende Klima beeinflussen kann. Aber selbst bei individueller Regelung kann es schwierig sein, alle Personen zufriedenzustellen. So können einige Menschen z.B. besonders empfindlich gegenüber einer bestimmten Luftbeimengung sein und daher eine wesentlich intensivere Belüftung verlangen. Es ist offensichtlich, daß auch ökonomische Grenzen bestehen, wenn man ein Raumklima schaffen will, das alle zufriedenstellt.

Neben der raumklimatischen Wirkung auf Gesundheit und Behaglichkeit werden auch physische und mentale Leistungen beeinflusst. So können bestimmte Raumklimata stimulierend, andere hemmend wirken. Unser Wissen auf diesem Gebiet ist derzeit noch recht bescheiden, und die folgenden Abschnitte befassen sich im wesentlichen mit dem thermischen Raumklima und der Raumluftqualität im Hinblick auf Behaglichkeit und Gesundheit.

C2 Thermisches Raumklima

C2.1 Vorbemerkung

Thermisches Raumklima umfaßt diejenigen Parameter, die den Wärmehaushalt des Menschen beeinflussen. In der Regel soll mit dem Raumklima eine thermisch behagliche Umgebung für den Menschen geschaffen werden. In einigen Fällen ist dies nur unvollkommen zu erreichen, sei es aus meteorologischen und/oder ökonomischen Gründen, sei es aufgrund thermisch belastender Arbeitsprozesse.

Das Verständnis für die Reaktion des menschlichen Körpers basiert auf den Kenntnissen seines Temperaturregelsystems. In den folgenden Abschnitten werden daher physiologische Grundlagen der Thermoregulation, Raumklimaparameter und Wärmehaushalt betrachtet. Auf dieser Basis wird eine Behaglichkeitsgleichung aufgestellt, und es werden die thermischen Indizes PMV und PPD definiert. Eine praktische Methode zur Beurteilung des Raumklimas folgt.

C2.2 Thermoregulation des Menschen

Wichtige, zentral gelegene Organe des menschlichen Körpers – insbesondere das Gehirn – sind nur in einem engen Temperaturbereich um 37 °C funktionsfähig. Nur durch sein effektives Temperaturregelsystem ist der Mensch in der Lage, selbst bei tropischer Wärme, Polarkälte, in Sauna und Eisbädern und selbst beim plötzlichen Anstieg der inneren Wärmeproduktion auf das Zehnfache diese innere Temperatur konstant zu halten.

Das menschliche Temperaturzentrum befindet sich am Boden des Mittelhirns (Hypothalamus). Es erhält von zentralen und peripheren Rezeptoren Signale. Aus-

läufer dieser auf thermische Reize reagierenden Nervenzellen werden als Thermorezeptoren bezeichnet und vermitteln uns den Eindruck von Wärme und Kälte. Sie reagieren auf Temperaturniveau und Temperaturänderungen, wobei eine Differenzierung für Temperaturbereiche und die Änderungsrichtung besteht. Die aufgenommenen Temperaturreize werden dem Zentralnervensystem als elektrische Impulse über Nervenstränge übermittelt und dort als Eingangsgröße zur Temperaturregelung und für unser thermisches Empfinden verwendet.

Sinn dieser Signale ist einerseits, zu anderem Verhalten anzuregen, z. B. durch Bekleidungs- oder Ortswechsel drohender Überhitzung oder Unterkühlung zu entgehen. Andererseits verfügt das Thermoregulationssystem über wirkungsvolle Mechanismen, die für die Konstanz der Körperkerntemperatur sorgen. Steigt die Temperatur, wird der Blutfluß in der Körperschale erhöht (Vasodilatation) und damit auch die Hauttemperatur und die Wärmeabgabe gesteigert. Ist dieser Regelmechanismus überfordert, wird die fühlbare Schweißsekretion angeregt. Etwa zwei Millionen Schweißdrüsen, verteilt über einer mittleren Hautfläche von $1,8 \text{ m}^2$, können im Bedarfsfall und besonders nach Adaptation weit über einen Liter Schweiß pro Stunde als Sekret ausscheiden und damit durch Verdunstung desselben eine beträchtliche latente Wärmeleistung abführen. Fällt die Körpertemperatur, verringert sich die Hautdurchblutung (Vasokonstriktion), die Oberflächentemperatur fällt und mit ihr der Wärmeverlust. Reicht dies nicht aus, werden die Temperaturen peripherer Körperteile gesenkt, indem über Bypass- und Wärmeaustauschmechanismen des Blutkreislaufs kühleres Blut in Arme und Beine gelangt. Reicht auch diese Maßnahme nicht, um die Temperatur der lebenswichtigen Organe zu garantieren, wird eine zusätzliche Wärmeproduktion eingeleitet, die durch Muskelspannung und Kältezittern, beim Säugling auch über den Abbau eines dafür vorgesehenen Speichergewebes, erfolgt.

Gesamtenergieumsatz

Die innere Wärmeproduktion ist eine Folge des Prozesses des menschlichen Lebens. Ein in völliger Ruhe befindlicher erwachsener Mensch hat einen Grundumsatz von etwa $0,8 \text{ met}$ ($1 \text{ met} = 58 \text{ W pro m}^2 \text{ Körperoberfläche}$); jegliche Aktivität erhöht den Stoffwechsel. So beträgt der Gesamtenergieumsatz einer entspannt sitzenden Person 1 met . Für leichte, vorwiegend sitzende Tätigkeit beträgt er $1,2 \text{ met}$ und kann bis zu 10 met bei entsprechender sportlicher Betätigung (z. B. Langstreckenlauf) ansteigen. Tabelle C2-1 gibt eine Übersicht zum Gesamtenergieumsatz einiger Tätigkeiten. Zu beachten ist, daß maximal 25% der aufgewendeten Energie in äußere Arbeit umgesetzt werden, in der Regel aber die gesamte Energie innerhalb des Körpers in Wärme umgewandelt wird.

In der Praxis ist es nicht möglich, das thermische Raumklima ohne Kenntnis des Aktivitätsniveaus der Raumnutzer zu beurteilen. Es ist daher notwendig, den Verwendungszweck des jeweiligen Raumes zu kennen, um so einen entsprechenden Gesamtenergieumsatz der Menschen im Raum vorzugeben.

Bekleidung

Neben der inneren Wärmeproduktion ist auch die Bekleidung des Menschen als Grenzschicht zwischen Raumklima und Körper von entscheidender Bedeutung für

Tabelle C2-1. Gesamtenergieumsatz als Funktion der körperlichen Aktivität

Aktivität	Gesamtenergieumsatz <i>M</i>	
	bezogen [<i>met</i>]	absolut [W/m ²]
Grundumsatz	0,8	46
entspanntes Sitzen	1,0	58
entspanntes Stehen	1,2	70
leichte, vorwiegend sitzende Tätigkeit	1,2	70
stehende Tätigkeit I: Geschäft, Labor, Leichtindustrie	1,6	93
stehende Tätigkeit II: Verkäufer, Haus- und Maschinenarbeit	2,0	116
mittelschwere Tätigkeit: Schwerarbeit an Maschinen, Werkstattarbeit	2,8	165

die thermische Behaglichkeit. Primär ist dabei die wärmedämmende Eigenschaft der Kleidung, mithin ihr Wärmeleitwiderstand zwischen Haut und Umgebung zu berücksichtigen. In die Berechnung geht die gesamte Körperoberfläche, bekleidet und unbekleidet, ein. Der Wärmeleitwiderstand von Kleidungsstücken wird meßtechnisch mit einem sogenannten „Thermal Manikin“, einer beheizten Puppe, die die Abmessung eines Menschen besitzt, erfaßt. Die Dämmung wird als Wärmeleitwiderstand in m²K/W oder häufiger als Relativmaß in *clo* (1 *clo* = 0,155 m²K/W) angegeben. Aus Tabelle C2-2 geht die Dämmung einiger typischer Bekleidungen hervor. Der bezogene Wärmeleitwiderstand einer unbekleideten Person beträgt 0 *clo*, einer typischen Innenraumbekleidung im Sommer 0,5 *clo* und im Winter 1,0 *clo*. Ebenfalls läßt sich aus Tabelle C2-2 die Wärmedämmung einer gegebenen Bekleidung abschätzen, gegebenenfalls ist zu interpolieren. Darüber hinaus gibt die Tabelle den Flächenfaktor an, d. h. das Verhältnis der bekleideten Körperoberfläche zu der Oberfläche des unbekleideten Körpers. Dieser Faktor geht in die Berechnung des menschlichen Wärmehaushalts ein.

Tabelle C2-3 zeigt den bezogenen Wärmeleitwiderstand einzelner Bekleidungsstücke, aus denen der Gesamtwärmeleitwiderstand durch einfache Addition näherungsweise ermittelt werden kann. Der Einfluß der unterschiedlichen Flächen der verschiedenen Schichten ist in den Zahlenwerten der bezogenen Wärmeleitwiderstände berücksichtigt. Alle in den Tabellen angegebenen Werte beziehen sich auf stehende Personen. Im Sitzen kann sich der bezogene Wärmeleitwiderstand um etwa 0,2 *clo* durch die Dämmung der Sitzfläche erhöhen. Körper- und Luftbewegung können den Luftaustausch in und unter der Bekleidung intensivieren und dadurch den Wärmeleitwiderstand verringern.

C2.3 Thermische Raumklimaparameter

Das thermische Raumklima wird im wesentlichen durch vier klassische Parameter bestimmt, die den Wärmehaushalt des Menschen beeinflussen: Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte.

Tabelle C2-2. Wärmeleitwiderstände typischer Bekleidungskombinationen

Bekleidung	Oberflächen- verhältnis f_{cl}	Wärmeleitwiderstand	
		bezogen [clo]	absolut [m ² K/W]
Unterhose, T-Shirt, Shorts, leichte Strümpfe, Sandalen	1,10	0,30	0,050
Slip, Unterkleid, Strumpfhose, leichtes Kleid mit Ärmeln, Sandalen	1,15	0,45	0,070
Unterhose, Hemd mit kurzen Ärmeln, leichte Hose, leichte Socken, Sandalen	1,15	0,50	0,080
Slip, Strumpfhose, Bluse mit kurzen Ärmeln, Rock, Sandalen	1,25	0,55	0,085
Unterhose, Hemd, leichte Hose, Socken, Schuhe	1,20	0,60	0,095
Slip, Unterkleid, Strumpfhose, Kleid, Schuhe	1,20	0,70	0,105
Unterhose, Hemd, Hose, Socken, Schuhe	1,20	0,70	0,110
Unterhose, Jogginganzug, lange Socken, Sportschuhe	1,20	0,75	0,115
Slip, Unterkleid, Bluse, Rock, dicke Kniestrümpfe, Schuhe	1,30	0,80	0,120
Slip, Bluse, Rock, kragenloser Pullover, dicke Kniestrümpfe, Schuhe	1,30	0,90	0,140
Unterhose, Unterhemd mit kurzen Ärmeln, Hemd, Hose, Pullover mit V-Ausschnitt, Socken, Schuhe	1,25	0,95	0,145
Unterhose, Hemd, Hose, Jacke, Socken, Schuhe	1,30	1,00	0,155
Slip, Strumpfhose, Bluse, Rock, Weste, Jacke	1,35	1,00	0,155
Slip, Strumpfhose, Bluse, langer Rock, Jacke, Schuhe	1,45	1,10	0,170
Unterhose, Unterhemd mit kurzen Ärmeln, Hemd, Hose, Jacke, Socken, Schuhe	1,35	1,10	0,170
Unterhose, Unterhemd mit kurzen Ärmeln, Hemd, Hose, Weste, Jacke, Socken, Schuhe	1,35	1,15	0,180
Lange Unterwäsche, Hemd, Hose, Pullover mit V-Ausschnitt, Jacke, Socken, Schuhe	1,35	1,30	0,200
Kurze Unterwäsche, Hemd, Hose, Weste, Jacke, Mantel, Socken, Schuhe	1,50	1,50	0,230

Tabelle C2-3. Wärmeleitwiderstände typischer Kleidungsstücke

Kleidungsstück	bezogener Wärmeleitwiderstand [clo]
<i>Unterwäsche</i>	
Slip	0,03
Hose mit langen Beinen	0,10
Hemd ohne Ärmel	0,04
Hemd 1/4 Arm	0,09
Hemd mit langen Ärmeln	0,12
Slip und BH	0,03

Tabelle C2-3. (Fortsetzung)

Kleidungsstück	bezogener Wärmeleitwiderstand [<i>clo</i>]
<i>Hemden und Blusen</i>	
Kurze Ärmel	0,15
Lange Ärmel, leicht	0,20
Lange Ärmel, normal	0,25
Lange Ärmel, warm	0,30
Leichte Bluse, lange Ärmel	0,15
<i>Hosen</i>	
Shorts	0,06
Sommer, leicht	0,20
Normal	0,25
Winter, warm	0,28
<i>Röcke und Kleider</i>	
Leichter Rock	0,15
Kräftiger Rock	0,25
Leichtes Kleid, kurze Ärmel	0,20
Kräftiges Kleid, lange Ärmel	0,40
<i>Latzhose</i>	0,55
<i>Pullover</i>	
Weste, ohne Ärmel	0,12
Leicht	0,20
Normal	0,28
Dick	0,35
<i>Jacken</i>	
Leichte Sommerjacke	0,25
Normal Jacke	0,35
Kittel	0,30
<i>Thermozeug – Synthetikpelz</i>	
Latzhose	0,90
Hose	0,35
Jacke	0,40
Weste	0,20
<i>Straßenbekleidung</i>	
Mantel	0,60
Daunenjacke	0,55
Parka	0,70
Overall, wattiert	0,55
<i>Verschiedenes</i>	
Socken, leicht	0,02
Socken, dick, kurz	0,05
Socken, dick, lang	0,10
Nylonstrümpfe	0,03
Schuhe, leicht	0,02
Schuhe, schwer, Holzschuhe	0,04
Stiefel	0,10
Handschuhe	0,05

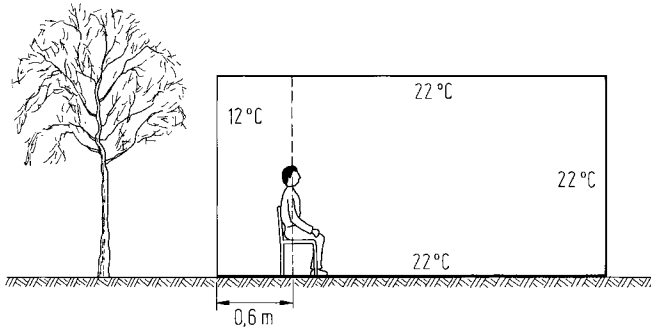


Bild C2-1. Person im asymmetrischen Strahlungsfeld (Beispiele C2-1, C2-2 und C2-3)

Die *Lufttemperatur* ϑ_L ist die Temperatur in Aufenthaltszonen von Personen, jedoch außerhalb der Grenzschicht erwärmter Luft in unmittelbarer Nähe der Körperoberfläche. Die Lufttemperatur beeinflusst die konvektive Wärmeabgabe des Menschen. Ihre Messung sollte für sitzende Personen in 0,6 m Höhe (Schwerpunkt) erfolgen, für detaillierte Analysen und zur Beurteilung von lokalem Discomfort durch Zug oder vertikale Temperaturgradienten werden zusätzliche Messungen in Kopf- (1,1 m) und Knöchelhöhe (0,1 m) empfohlen.

Die *mittlere Strahlungstemperatur* $\bar{\vartheta}_r$ (auch: Ganzraumstrahlungstemperatur) wird als diejenige Temperatur aller umgebenden Flächen definiert, die denselben Strahlungswärmeaustausch einer Person hervorruft, wie die tatsächlichen (unterschiedlichen) Oberflächentemperaturen. Die Strahlungstemperatur ist für den Wärmehaushalt des Menschen genauso wichtig wie die Lufttemperatur. Mit der Einführung der mittleren Strahlungstemperatur läßt sich die Beurteilung der komplizierten Strahlungseinflüsse vereinfachen:

$$\bar{\vartheta}_r = \Phi_{P-1} \cdot \vartheta_1 + \Phi_{P-2} \cdot \vartheta_2 + \dots + \Phi_{P-n} \cdot \vartheta_n \quad (\text{C2-1})$$

wobei Φ_{P-n} die Einstrahlzahl zwischen einer Person und der Fläche n des Raums ist und ϑ_n die Temperatur dieser Fläche.

Beispiel C2-1.

Berechne die mittlere Strahlungstemperatur für die in Bild C2-1 gezeigte Person. Das Fenster (3·3 m) erstreckt sich vom Boden bis zur Decke, so daß sich eine Einstrahlzahl von 0,30 ergibt.

$$\bar{\vartheta}_r = 0,30 \cdot 12 + 0,70 \cdot 22 = 19^\circ \text{C}$$

Die Einstrahlzahl einer sitzenden Person zu senkrechten und waagerechten Flächen geht aus den Bildern C2-2 und C2-3 hervor. Für weitere Daten, auch für stehende Personen und andere Richtungen, sei auf die Literatur verwiesen [1].

Die *relative Luftgeschwindigkeit* v_{rel} beeinflusst über den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten den Wärmeaustausch des Menschen mit seiner Umgebung. Für eine ruhig sitzende Person ist v_{rel} die mittlere Geschwindigkeit in der Aufenthaltszone, jedoch außerhalb der Grenzschicht in unmittelbarer Nähe der Person. Die Luftgeschwindigkeit wird an den gleichen Meßpunkten ermittelt, wie die Lufttemperatur. Bewegt sich die Person, ist die relative Geschwindigkeit zwischen Kör-

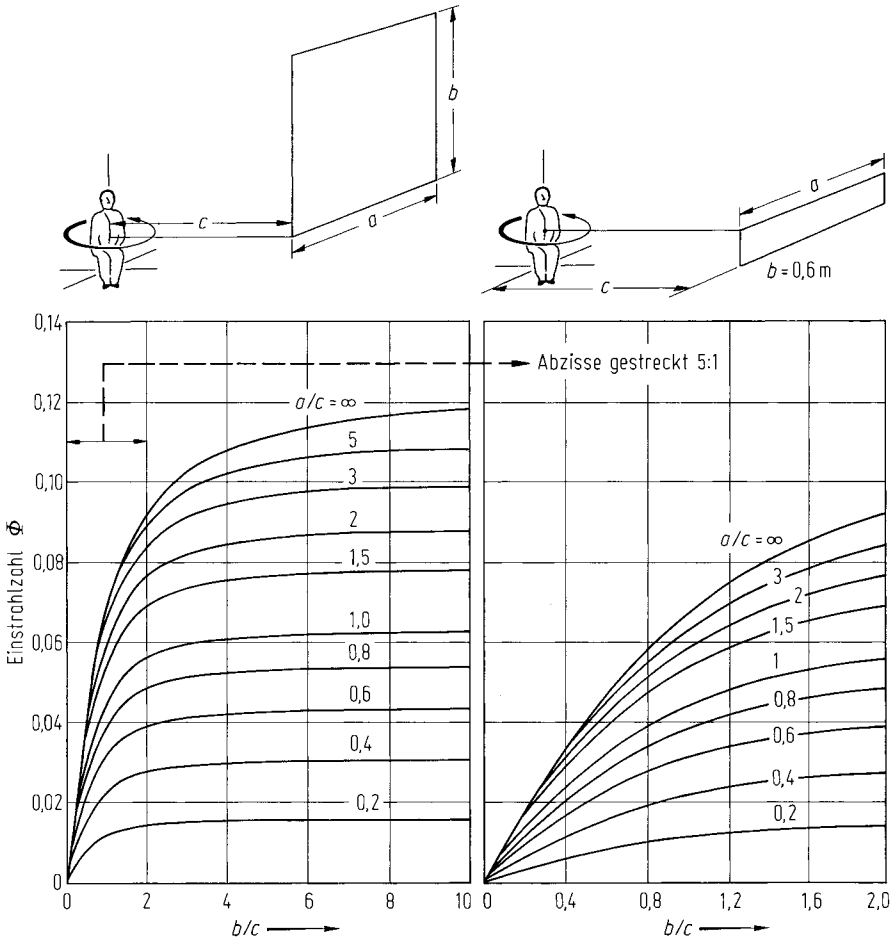


Bild C2-2. Mittelwert der Einstrahlzahl zwischen einer sitzenden Person und einem senkrechten Rechteck (über oder unter seinem Zentrum), wenn diese Person um eine senkrechte Achse rotiert. Diese Einstrahlzahl wird benutzt, wenn der Ort der Person, nicht aber deren Orientierung bekannt ist. Beispiel $a = 4 \text{ m}$, $b = 3 \text{ m}$, $c = 5 \text{ m}$. $b/c = 0,6$, $a/c = 0,8$: $\phi = 0,029$

per und Luft ausschlaggebend. Für die Abhängigkeit der relativen Luftgeschwindigkeit von der körperlichen Aktivität kann die folgende Beziehung angegeben werden:

$$v_{\text{rel}} = v + 0,005 (M - 58) \text{ [m/s]} \tag{C2-2}$$

$v \text{ [m/s]}$ Luftgeschwindigkeit im Raum
 $M \text{ [W/m}^2\text{]}$ Gesamtenergieumsatz

Vor allem bei ruhig sitzenden Personen kann die Luftbewegung das Gefühl von Zug hervorrufen. Bild C2-4 zeigt typische Luftgeschwindigkeitsschwankungen in

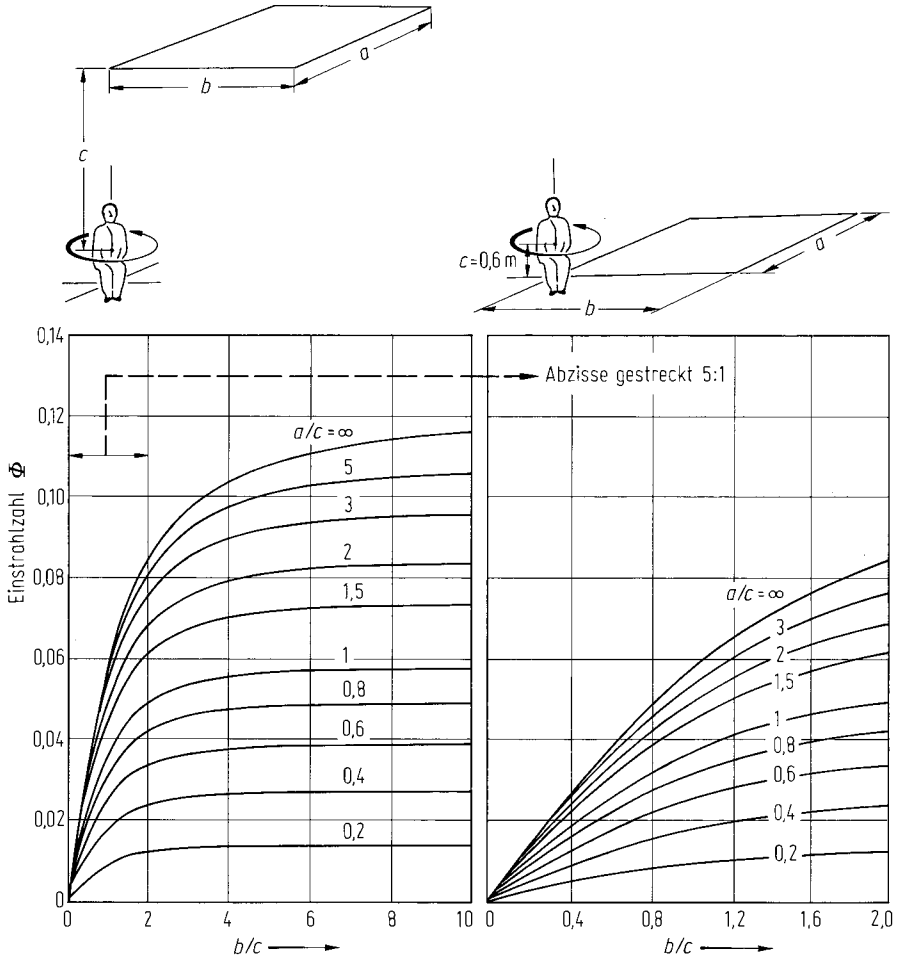


Bild C2-3. Mittelwert der Einstrahlzahl zwischen einer sitzenden Person und einem waagerechten Rechteck (an der Decke oder am Boden), wenn diese Person um die senkrechte Achse rotiert. Dieses Winkelverhältnis wird benutzt, wenn der Ort der Person, nicht aber deren Orientierung bekannt ist. Beispiel $a = 3$ m, $b = 6$ m, $c = 2$ m. $b/c = 3,0$, $a/c = 1,5$: $\phi = 0,067$

der Aufenthaltszone eines gelüfteten Raums. Von Bedeutung sind hier sowohl der Mittelwert der Geschwindigkeit als auch der Turbulenzgrad Tu , der als Quotient aus Standardabweichung und mittlerer Geschwindigkeit definiert ist [4, 5]

$$Tu = \frac{sD_v}{\bar{v}} = \frac{v_{84} - v_{50}}{v_{50}} \quad (\text{C2-3})$$

mit

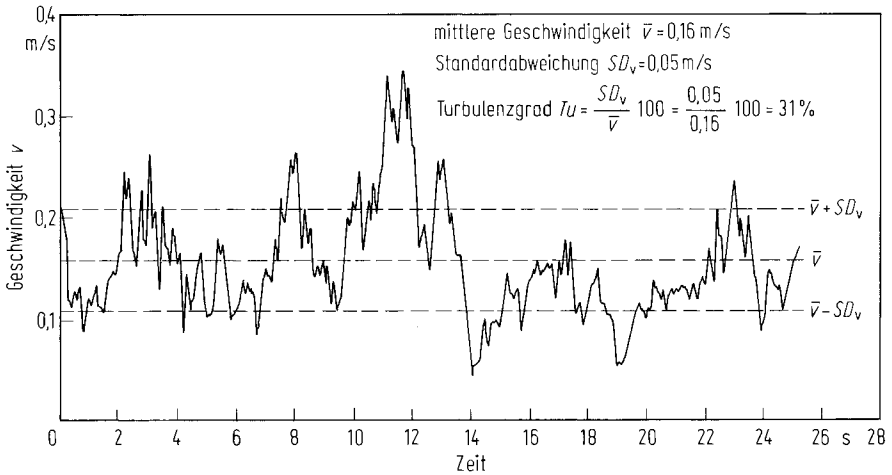


Bild C2-4. Typische Fluktuation der Luftgeschwindigkeit in der Aufenthaltszone eines belüfteten Raums. Es wird empfohlen, mindestens 3 Minuten zu messen, um eine repräsentative Stichprobe der Fluktuationen zu bekommen

sD_v	Standardabweichung
$v_{50} = \bar{v}$	arithmetischer Mittelwert der Geschwindigkeit, bei Normalverteilung die Geschwindigkeit, die 50% der Zeit nicht überschreitet
v_{84}	wie vor, jedoch 84% der Zeit nicht überschreitet

Die *Luftfeuchtigkeit* beeinflusst die sensible und insensible Transpiration des Menschen. Der Partialdruck des Wasserdampfes der umgebenden Luft p_D steht bei stationären Verhältnissen mit dem Wärmeverlust durch Verdunstung in Verbindung. Im instationären Fall, wenn eine plötzliche Veränderung der Feuchte z. B. durch Raumwechsel erfolgt, kann außerdem die Sorption von Wasserdampf in der Bekleidung einen Einfluß auf thermische Größen nehmen. Hier ist die relative Luftfeuchte von Bedeutung (Sorptionisotherme).

Neben den vier o. g. klassischen Raumklimaparametern werden auch die folgenden Größen häufig in der Literatur verwendet: Operativtemperatur bzw. Raumtemperatur¹, Äquivalenztemperatur, Halbraum-Strahlungstemperatur und Strahlungstemperatur-Asymmetrie.

Die Raumtemperatur¹ (Operativtemperatur) ϑ_R ist diejenige Temperatur von Luft und Umgebungsflächen, die zur gleichen Wärmeabgabe des Menschen führt, wie die tatsächlichen (unterschiedlichen) Temperaturen. Mit der Raumtemperatur lassen sich die oft komplizierten thermischen Verhältnisse eines Raums sehr einfach beschreiben. Räume mit der gleichen Raumtemperatur und Luftbewegung rufen beim Menschen dasselbe Wärmeempfinden hervor. In den meisten praktischen

¹ Von den genannten zwei gleichbedeutenden Bezeichnungen wird nachfolgend die weiterbenutzt, die in der DIN 1946 Teil 2 hierfür festlegt ist: Raumtemperatur

Fällen läßt sich ϑ_R mit ausreichender Genauigkeit als Mittelwert zwischen mittlerer Strahlungs- und Lufttemperatur annehmen. Dies gilt, wenn die relative Luftgeschwindigkeit klein ($< 0,2$ m/s) oder die Differenz zwischen den beiden Temperaturen kleiner als 4 K ist. Allgemein gilt die folgende Beziehung:

$$\vartheta_R = A \cdot \vartheta_L + (1-A) \overline{\vartheta_r} \quad (\text{C2-4})$$

Für A können in Abhängigkeit von der relativen Luftgeschwindigkeit folgende Werte eingesetzt werden:

v_{rel} [m/s]	$< 0,2$	$0,2 \dots 0,6$	$0,6 \dots 1,0$
A	$0,5$	$0,6$	$0,7$

Beispiel C2-2.

Für die Person in Bild C2-1 gilt eine Lufttemperatur von 23°C und eine relative Luftgeschwindigkeit von $v_{\text{rel}} < 0,2$ m/s. Berechne die Raumtemperatur.

$$\vartheta_R = 0,5 \cdot (23 + 19) = 21^\circ\text{C}$$

Die *Äquivalenztemperatur* ϑ_{eq} ist diejenige Raumtemperatur bei unbewegter Luft, die beim Menschen dieselbe Wärmeabgabe hervorruft, wie die tatsächliche Raumtemperatur bei höherer Luftgeschwindigkeit.

Die *Halbraum-Strahlungstemperatur* ϑ_{rh} ist die gleichförmige Temperatur der umgebenden Flächen eines Halbraums, die denselben Strahlungswärmeaustausch mit einem kleinen ebenen Flächenelement hervorruft wie die tatsächlichen (unterschiedlichen) Oberflächentemperaturen.

Die *Strahlungstemperatur-Asymmetrie* $\Delta\vartheta_{rh}$ ist die Differenz zwischen den ϑ_{rh} -Werten zweier, diametral gelegener Halbräume und damit ein Maß für die auf den Menschen wirkenden und von diesem fühlbaren Unterschiede in der örtlichen Wärmestrahlung. Als Meßort wird auch hier der Schwerpunkt einer sitzenden Person, $0,6$ m über dem Boden gewählt, und es wird waagrecht bzw. senkrecht, jeweils parallel zur Fläche, die die Asymmetrie hervorruft, gemessen bzw. gerechnet.

Beispiel C2-3.

Bild C2-1 zeigt eine Person, die in der Nähe eines kalten Fensters sitzt. Berechne die Strahlungstemperatur-Asymmetrie.

Die Einstrahlzahl bezüglich eines kleinen senkrechten Flächenelements, das sich im Zentrum der Person und $0,6$ m über dem Boden befindet, beträgt $0,80$. Damit errechnet sich die Halbraumstrahlungstemperatur in Richtung Fenster zu:

$$\vartheta_{rh} = 0,80 \cdot 12 + 0,20 \cdot 22 = 14^\circ\text{C}$$

Und deren Differenz beträgt:

$$\Delta\vartheta_{rh} = 22 - 14 = 8 \text{ K}$$

C2.4 Die Wärmebilanz des Menschen

Aufgabe des menschlichen Temperaturregelsystems ist es, die Körpertemperatur nahezu konstant zu halten. Das bedeutet, daß Wärmegleichgewicht herrscht: Es wird weder Wärme im Körper gespeichert noch überschreitet die Wärmeabgabe die gewünschte Größe (Unterkühlung). In einem breiten Bereich thermischer Umge-

bungsbedingung ist diese Regelung möglich, deren wichtigste Mechanismen Transpiration und Hauttemperaturänderung sind. Die Forderung nach Wärmegleichgewicht gilt für lange Zeiträume (gewöhnlich Stunden). Wärmegleichgewicht bedeutet, daß abgegebene und im Körper erzeugte Wärme gleich sind. Es gilt folgende Bilanzgleichung:

$$K = R + C = M - W - E_{dif} - E_{sw} - E_{res} - C_{res} \quad (C2-5)$$

K	Wärmestrom durch die Kleidung
R	Wärmestrom durch Strahlung
C	Wärmestrom durch Konvektion
M	Gesamtenergieumsatz
W	mechanische Arbeit
E_{dif}	latente Wärmeabgabe durch Wasserdampfdiffusion durch die Haut
E_{sw}	latente Wärmeabgabe durch sensible Transpiration über die Hautoberfläche
E_{res}	latente Wärmeabgabe durch Atmung
C_{res}	sensible Wärmeabgabe durch Atmung

Für die obigen Bilanzgrößen² gilt beim bekleideten Menschen

$$K = (\vartheta_{sk} - \vartheta_{cl}) / I_{cl} \quad [\text{W/m}^2] \quad (C2-6)$$

ϑ_{sk}	Hauttemperatur [°C]
ϑ_{cl}	Oberflächentemperatur der Kleidung [°C]
I_{cl}	Wärmeleitwiderstand der Kleidung [m ² k/W]

Für den Wärmestrom durch Strahlung gilt

$$R = f_{eff} f_{cl} \varepsilon \sigma \{ (\vartheta_{cl} + 273)^4 - (\bar{\vartheta}_r + 273)^4 \} \quad [\text{W/m}^2] \quad (C2-7)$$

f_{eff}	Oberflächenverhältnis zwischen effektiver Strahlungsfläche und ganze Fläche des bekleideten Körpers ($f_{eff} = 0,7[-]$)
f_{cl}	Oberflächenverhältnis zwischen bekleidetem und unbekleidetem menschlichem Körper
ε	mittlere Emissionszahl für Haut und Kleidung ($\varepsilon = 0,97[-]$)
σ	Stephan-Boltzmann-Konstante ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2 \text{K}^4]$)

Es gilt weiter

$$\begin{aligned} f_{cl} &= 1,00 + 1,29 \cdot I_{cl} \quad \text{für } I_{cl} < 0,078 \text{ [m}^2 \text{K/W]} \\ f_{cl} &= 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl} \quad \text{für } I_{cl} > 0,078 \text{ [m}^2 \text{K/W]} \end{aligned} \quad (C2-8)$$

Damit erhält man aus Gl. (C2-7):

$$R = 3,9 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \{ (\vartheta_{cl} + 273)^4 - (\bar{\vartheta}_r + 273)^4 \} \quad [\text{W/m}^2] \quad (C2-9)$$

² Die Ansätze in den Gl. (2-5), (2-6) und (2-9) sind formal auf die – weitaus überwiegenderen – bekleideten Körperpartien bezogen, enthalten jedoch die Wärmeabgabe der nicht bekleideten Körperpartien mit. Die Werte ϑ_{sk} , ϑ_{cl} und I_{cl} stellen daher gewogene Mittelwerte dar, die den gemachten vereinfachenden Ansätzen Rechnung tragen.

Für den Wärmestrom durch Konvektion³ gilt

$$C = f_{cl} \cdot \alpha_k (\vartheta_{cl} - \vartheta_L) \quad [\text{W/m}^2] \quad (\text{C2-10})$$

α_k konvektiver Wärmeübergangskoeffizient

Für α_k gilt bei erzwungener Konvektion mit v_{rel} [m/s]

$$\alpha_k = 12,1 \sqrt{v_{rel}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (\text{C2-11})$$

und bei freier Konvektion

$$\alpha_k = 2,4 (\vartheta_{cl} - \vartheta_L)^{0,25} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (\text{C2-12})$$

Für praktische Berechnungen ist es ausreichend, jeweils den größeren Wert aus den Gln. (C2-11) oder (C2-12) einzusetzen.

Für den latenten Diffusionswärmestrom gilt mit ϑ_{sk} in °C

$$E_{dif} = 0,31(2,56 \cdot \vartheta_{sk} - 33,7 - 0,01 \cdot p_D) \quad [\text{W/m}^2] \quad (\text{C2-13})$$

p_D = Wasserdampfdruck der Luft [Pa]

Der Verdunstungswärmestrom E_{sw} ist eine Folge des Schwitzens (transpiratio sensibilis) und damit ein vom thermischen Zustand des Menschen abhängiger Regelmechanismus.

Für den latenten Atmungswärmestrom gilt mit M in W/m^2

$$E_{res} = 0,0017 \cdot M(58,7 - 0,01 p_D) \quad [\text{W/m}^2] \quad (\text{C2-14})$$

Für den sensiblen Atmungswärmestrom gilt

$$C_{res} = 0,0014 \cdot M(34 - \vartheta_L) \quad [\text{W/m}^2] \quad (\text{C2-15})$$

Die Wärmebilanzgleichung (C2-5) gibt Informationen über den absoluten und relativen Einfluß der einzelnen Raumklimaparameter auf den Menschen. Im folgenden Abschnitt über die Behaglichkeitsbedingungen wird dieses näher diskutiert. Gleichung (C2-5) läßt sich aber auch dazu verwenden, die thermische Belastung eines Raums durch die Abgabe von Wärme und Wasserdampf der im Raum befindlichen Menschen zu beurteilen. Tabelle C2-4 gibt Werte an, die für die Dimensionierung und Analyse von heiz- und raumluftechnischen Anlagen von Bedeutung sind. Aus dieser Tabelle geht hervor, daß bei sitzender Tätigkeit knapp 30% der Energie als latente Wärme (Verdunstung) abgegeben wird. Dieser Wert steigt mit höherer Aktivität auf gut 40% der Gesamtenergieabgabe. Die restliche Wärme wird konvektiv (Luft) und durch Strahlung (Umgebungsflächen) übertragen. Beide Beiträge besitzen bei kleinen Luftgeschwindigkeiten die gleiche Größenordnung, während bei größeren Geschwindigkeiten die Konvektion dominiert. Die Werte in Tabelle C2-4 sind unabhängig von der Temperatur, da die thermische Behaglichkeit eine jeweils angepaßte Kleidung voraussetzt.

³ Der begrenzte Einfluß des Turbulenzgrades kann bei Bilanzbetrachtungen vernachlässigt werden, bei lokalen Abkühlungserscheinungen (Zug) dagegen ist der Turbulenzgrad ein wichtiger Parameter (s. Bilder 2-15, 2-16 und 2-17 im Vergleich mit 2-8).

Tabelle C2-4. Abgabe von Wärme und Wasserdampf des Menschen im Zustand der thermischen Behaglichkeit. Die Tabelle gilt für normale, erwachsene Personen (1,75 m² Hautoberfläche); die mittlere Strahlungstemperatur ist gleich der Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte beträgt 50%

Bezogener Gesamt- energieumsatz M [met]	v_{rel} [m/s]	Wärmeabgabe				Wasserdampf- abgabe [g/h]
		sensibel		latent	Gesamt [W]	
		Konvektion [W]	Strahlung [W]	Verdunstung [W]		
1	<0,1	36	36	29	101	43
1,2	0,1	41	41	39	121	59
2	0,3	76	47	82	205	123
3	0,5	120	53	134	307	200

Beispiel C2-4.

Der bezogene Wärmeleitwiderstand der Bekleidung von Personen in einem Sitzungssaal im Sommer beträgt 0,5 clo. Bestimme die sensible Wärme- und die Wasserdampf-abgabe der Personen, die sich in thermischer Behaglichkeit befinden.

Tabelle C2-4 entnimmt man eine Wasserdampf-abgabe von 59 g/(h·Person) und eine sensible Wärmeabgabe von 82 W/Person, verteilt auf je 41 W/Person für Strahlung und Konvektion.

C2.5 Behaglichkeitsgleichung

Thermische Behaglichkeit wird oft als der Zustand definiert, bei dem der Mensch mit seiner thermischen Umgebung zufrieden ist, sich thermisch neutral fühlt und weder eine wärmere, noch eine kältere Umgebung wünscht. Darüber hinaus sollte er an keiner Körperstelle störende lokale Abkühlung oder Erwärmung empfinden.

Die erste Bedingung für die thermische Behaglichkeit ist die Erfüllung der Wärmebilanzgleichung (C2-5). Diese Gleichung ist ein Ausdruck für das Bestreben des Thermoregulationssystems, die Körpertemperatur konstant zu halten. Aus ihr geht hervor, daß neben dem Stoffwechsel zwei weitere physiologische Variable, Hauttemperatur und Schweißsekretion, eingehen. In Abhängigkeit von diesen und den äußeren Variablen stellt sich im Körper eine Temperaturverteilung ein, die eine Folge des angestrebten Wärme Gleichgewichts ist. Oft wird der Mensch, obwohl seine Wärmebilanz stimmt, die Umgebung als zu kalt oder zu warm empfinden. Für das Gefühl der thermischen Neutralität ist Wärme Gleichgewicht daher nur eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung. Hauttemperatur und Schweißabsonderung müssen bei dem jeweiligen Stoffwechsel Werte annehmen, die als neutral empfunden werden. Lange Zeit war man davon überzeugt, daß diese Neutralität bei einer Hauttemperatur von 33–34 °C und ohne sichtbare Transpiration vorhanden ist. Der Begriff des „Schwitzens“ wurde von vielen offenbar synonym für „Es ist zu warm“ verwendet. Dies hat schließlich zu der Annahme geführt, daß sich Schwitzen und thermische Behaglichkeit ausschließen. Breite experimentelle Arbeiten haben schon 1970 gezeigt, daß diese Annahme falsch ist. Menschen bevor-

zugen eine deutliche Transpiration, wenn sie körperlich aktiv sind und halten diese nur dann für nicht wünschenswert, wenn sie einer sitzenden Tätigkeit nachgehen. Das Ergebnis der genannten Untersuchungen zeigt Bild C2-5. Dargestellt ist die bevorzugte Schweißsekretion als Funktion der Aktivität. In den Versuchen war es möglich, die Transpiration durch Absenkung der Raumtemperatur vollständig zu vermeiden. Die meisten Versuchspersonen empfanden diese Temperatur jedoch als viel zu kalt. War das Aktivitätsniveau höher als das beim „Stillsitzen“, wurden Umgebungsbedingungen bevorzugt, die eine gewisse Schweißabsonderung hervorriefen.

Ebenso wurde bei höheren Aktivitäten eine niedrigere Hauttemperatur bevorzugt (s. Bild C2-6). Bei einer Aktivität von 3 met z. B. ist die Körperkerntemperatur etwa 0,5 K höher als bei 1 met, und zur Kompensation wird offenbar eine um 3 K niedrigere Hauttemperatur vorgezogen. Die Kombination einer höheren Körperkerntemperatur mit einer verringerten Hauttemperatur vermittelt das Gefühl thermischer Neutralität und bedingt gleichzeitig die erwähnte Schweißsekretion. In dem Zustand thermischer Neutralität treten Handtemperatur und Schweißsekretion bei den einzelnen Personen unterschiedlich auf. Die eingezeichneten Regressionslinien dienen als weitere Kriterien für die thermische Neutralität einer Durchschnittsperson.

$$\dot{v}_{sk} = 35,7 - 0,0275 \cdot M \text{ [}^\circ\text{C]} \tag{C2-16}$$

$$E_{sw} = 0,42 (M - 58) \text{ [W/m}^2\text{]} \tag{C2-17}$$

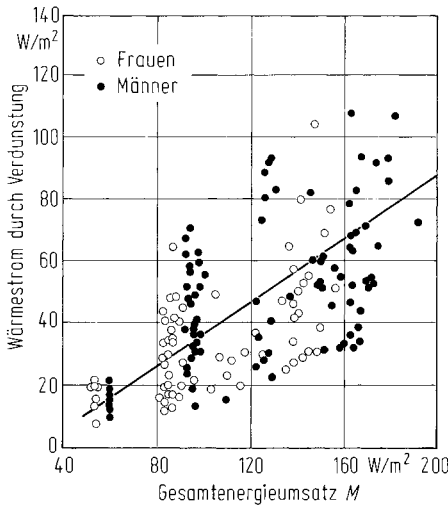


Bild C2-5. Schweißsekretion (latente Wärmeabgabe über die Haut (Verdunstung)), die für thermische Behaglichkeit notwendig ist, als Funktion der Aktivität (Gesamtenergieumsatz). Bei höherem Aktivitätsniveau als Stillsitzen wird Schwitzen bevorzugt

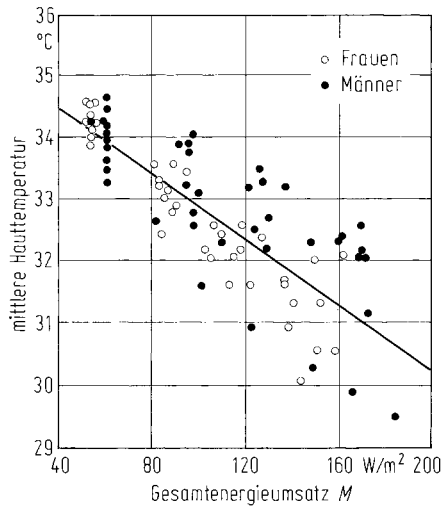


Bild C2-6. Hauttemperatur, die für thermische Behaglichkeit notwendig ist, als Funktion der Aktivität (Gesamtenergieumsatz). Mit zunehmender Aktivität werden niedrigere Hauttemperaturen bevorzugt

Setzt man diese Kriterien in die Wärmebilanzgleichung (C2-5) ein, erhält man die Behaglichkeitsgleichung

$$(M-W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \{5733 - 6,99(M-W) - p_D\} - 0,42 \{(M-W) - 58,15\} - 1,7 \cdot 10^{-5} M(5867 - p_D) - 0,0014 M(34 - \vartheta_L) = 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \{(\vartheta_{cl} + 273)^4 - (\bar{\vartheta}_r + 273)^4\} + f_{cl} \cdot \alpha_k (\vartheta_{cl} - \vartheta_L) \quad (C2-18)$$

$$\vartheta_{cl} = 35,7 - 0,028(M-W) - I_{cl} [(M-W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \{5733 - 6,99(M-W) - p_D\} - 0,42 \{(M-W) - 58,15\} - 1,7 \cdot 10^{-5} M(5867 - p_D) - 0,0014 M(34 - \vartheta_L)]$$

$$\alpha_k = 2,38 (\vartheta_{cl} - \vartheta_L)^{0,25} \quad \text{für } 2,38 (\vartheta_{cl} - \vartheta_L)^{0,25} \geq 12,1 \sqrt{v_{rel}}$$

$$\alpha_k = 12,1 \sqrt{v_{rel}} \quad \text{für } 2,38 (\vartheta_{cl} - \vartheta_L)^{0,25} < 12,1 \sqrt{v_{rel}}$$

$$f_{cl} = 1,00 + 1,290 I_{cl} \quad \text{für } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$f_{cl} = 1,05 + 0,645 I_{cl} \quad \text{für } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Die Behaglichkeitsgleichung gibt für jedes Aktivitätsniveau und jede Bekleidung die Kombination von Lufttemperatur, mittlerer Strahlungstemperatur, Geschwindigkeit und Dampfdruck an, die für die meisten Menschen das Gefühl thermischer Neutralität vermittelt. Bild C2-7 zeigt u. a. den Einfluß der Luftfeuchte bei einer leichten Bekleidung von 0,5 clo. Die Linien gleicher Behaglichkeit sind recht steil, d. h. der Einfluß der Luftfeuchte ist gering, ihr Anstieg um 10% entspricht einer Erhöhung der Raumtemperatur um 0,3 K. Für Bekleidung mit anderen Wärmeleitwiderständen findet sich ein vergleichbarer Einfluß der Feuchte. Bild C2-7 gilt für den stationären Fall; bei plötzlichen Veränderungen der relativen Feuchte, z. B. wenn Personen aus dem Freien in ein Gebäude wechseln, kann die Feuchte durch Kondensation oder Verdunstung innerhalb der Kleidung eine größere thermische Wirkung entfalten. Darüber hinaus kann die Luftfeuchte den Wert der Hautfeuchte (Anteil der Hautoberfläche, der mit Schweiß bedeckt ist) verändern. Ein hohes Aktivitätsniveau, hohe Luftfeuchten und/oder Bekleidung mit großem Diffusionswiderstand für Wasserdampf erhöhen die Hautfeuchte, was an sich zu Unbehagen führen kann. Wahrscheinlich ist dies einer der Gründe dafür, daß die Feuchte so oft als wichtiger thermischer Parameter beschrieben wird. Wie aus Bild C2-7 hervorgeht, ist dies aber unter stationären Bedingungen und bei den für die thermische Behaglichkeit angestrebten Temperaturen nicht der Fall. Die Luftfeuchte hat allerdings eine Reihe anderer Wirkungen auf den Menschen, die weniger thermischer Natur sind und daher in Kap. C3 „Raumluftqualität“ behandelt werden.

Beispiel C2-5.

Der bezogene Wärmeleitwiderstand der Bekleidung von sitzenden Zuschauern in einer Schwimmhalle betrage im Sommer 0,5 clo. Bestimme die als behaglich empfundene Raumtemperatur für eine relative Luftfeuchte von 80% und eine Luftgeschwindigkeit von <0,1 m/s.

Aus Bild C2-7 ergibt sich $\vartheta_R = 25^\circ\text{C}$.

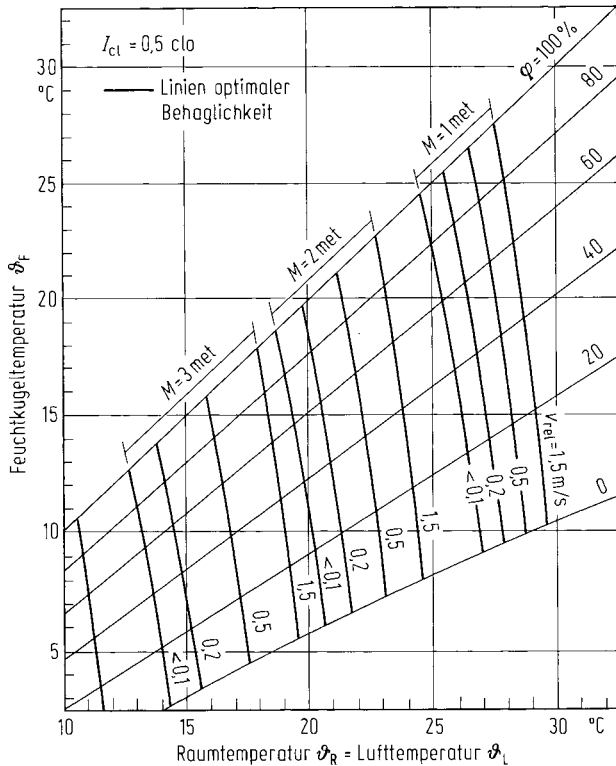


Bild C2-7. Raumzustände optimaler Behaglichkeit als Funktion von Temperatur und Feuchte mit der relativen Luftgeschwindigkeit und dem Gesamtenergieumsatz als Parameter. Bedingungen: Lufttemperatur = Strahlungstemperatur; leichte Kleidung ($I_{cl} = 0,5 \text{ clo}$)

In Bild C2-8 ist der Einfluß der Luftgeschwindigkeit auf die thermische Behaglichkeit bei konstanter Feuchte und für zwei verschiedene Bekleidungen dargestellt. Die Linien gleicher Behaglichkeit zeigen verschiedene Kombinationen von Luftgeschwindigkeit und Raumtemperatur, die von den meisten Menschen als thermisch neutral empfunden werden.

Bild C2-9 zeigt den Einfluß der mittleren Strahlungstemperatur auf eine ruhig sitzende Person. Für $M = 1 \text{ met}$ schneiden sich die Geschwindigkeitskurven in dem Punkt, in dem Luft- und Oberflächentemperatur der Bekleidung gleich sind. Bei geringer Luftgeschwindigkeit hat die mittlere Strahlungstemperatur etwa das gleiche Gewicht wie die Lufttemperatur (s. a. Gl. (C2-4)).

Beispiel C2-6.

Im Winter liegt die mittlere Strahlungstemperatur in einem Reisebus 6 K unter der Lufttemperatur. Bestimme die optimale Lufttemperatur für Passagiere, die im Bus ohne Mantel sitzen ($I_{cl} = 1 \text{ clo}$). Die Luftgeschwindigkeit betrage 0,2 m/s, die Luftfeuchte 50%.

Aus Bild C2-9 ergibt sich $\vartheta_L = 26^\circ\text{C}$ und $\vartheta_r = 20^\circ\text{C}$.

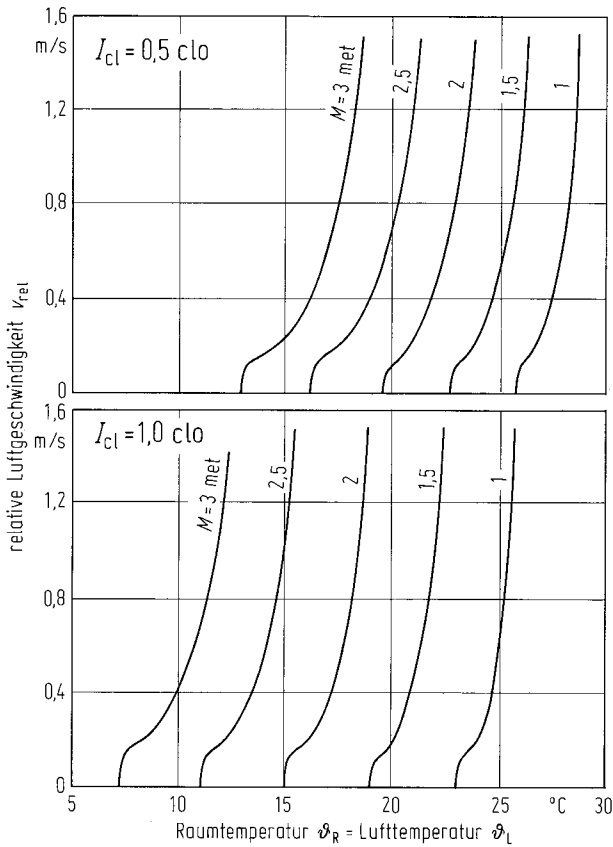


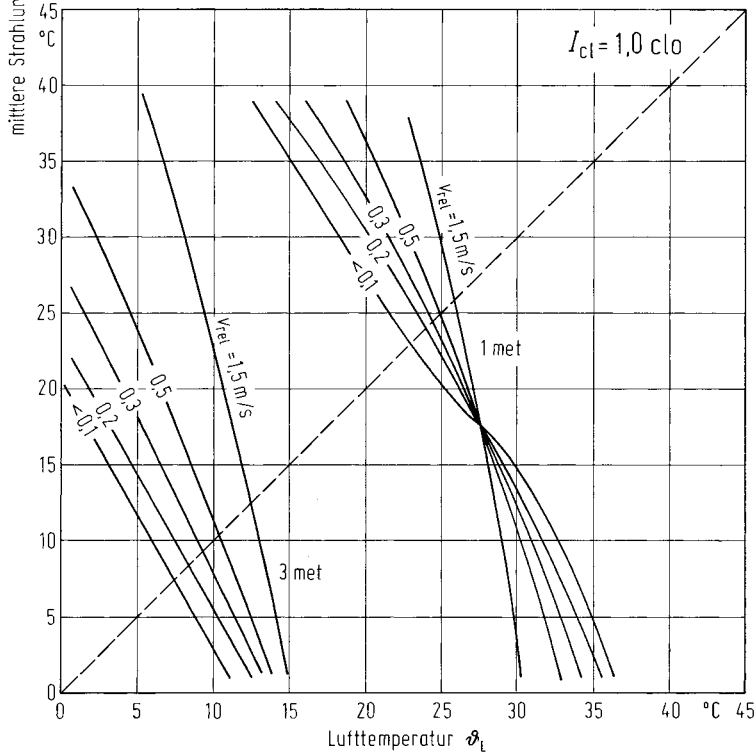
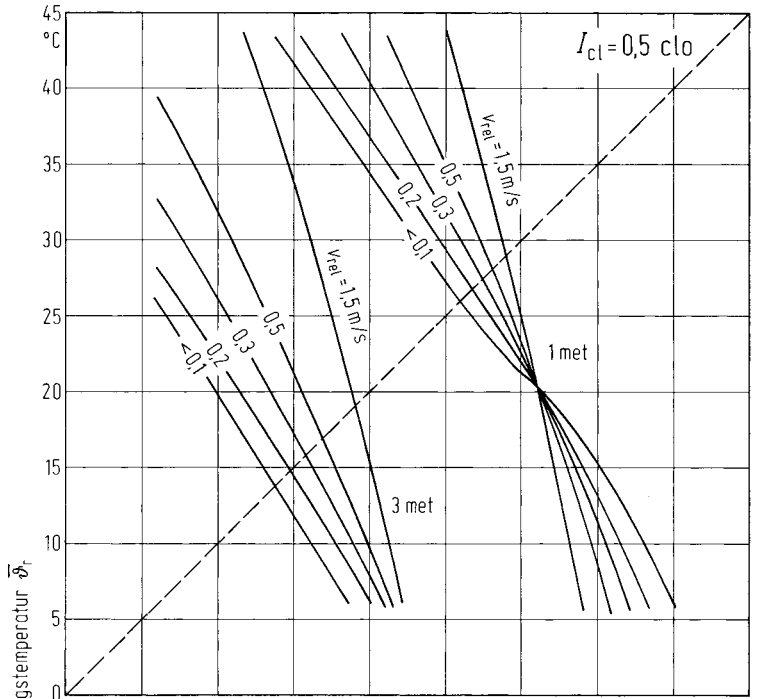
Bild C2-8. Behaglichkeitsdiagramm, das den Einfluß der relativen Geschwindigkeit auf die optimale Raumtemperatur zeigt. Der obere Teil gilt für leichte Sommerkleidung (0,5 *clo*), der untere Teil gilt für normale Innen-Winterbekleidung (1,0 *clo*). Bei stillsitzender Tätigkeit werden die meisten gezeigten Luftgeschwindigkeiten als Zug empfunden

PMV-Index

Die Behaglichkeitsgleichung gibt die Kombinationen von Klimaparametern an, die in der Regel vom Menschen als thermisch neutral empfunden werden. In der Praxis wird das Raumklima jedoch häufig von diesen Idealkombinationen abweichen und damit stellt sich die Frage, wie diese zu beurteilen ist und welche Abweichungen toleriert werden können.

Zur Lösung dieses Problems definierte Fanger [1] den PMV- und den PPD-Index, die 1984 in das internationale Normenwerk (ISO 7730) [2] aufgenommen wur-

Bild C2-9. Behaglichkeitsdiagramm, das den Einfluß der mittleren Strahlungstemperatur auf die optimale Lufttemperatur zeigt. Der obere Teil gilt für leichte Sommerbekleidung (0,5 *clo*), der untere Teil gilt für normale Innen-Winterbekleidung (1,0 *clo*)



den. Zur Quantifizierung der menschlichen Temperaturempfindung findet eine 7-Punkte-Skala Verwendung

+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
heiß	warm	leicht	neutral	leicht	kühl	kalt
		warm		kühl		

PMV ist die Abkürzung für „Predicted Mean Vote“ (erwartete mittlere Beurteilung). Dieser Index gibt die erwartete durchschnittliche Beurteilung des Raumklimas anhand der 7-Punkte-Skala an. Setzt man eine große Zahl von Personen einem definierten Raumklima aus und bittet alle um ihre Meinung zum Klima anhand der genannten Skala, so läßt sich die mittlere Beurteilung mit dem PMV-Index vorhersagen.

Der PMV-Index wurde aus der Behaglichkeitsgleichung abgeleitet. Die subjektive Beurteilung des Menschen bezüglich Wärme und Kälte wurde experimentell mit der Belastung des menschlichen Temperaturregelsystems in Verbindung gebracht. Dabei ist die thermische Belastung als Differenz zwischen der realen inneren Wärmeproduktion und der hypothetischen Wärmeabgabe einer Person definiert, die diese in dem betrachteten Raumklima bei optimalen Behaglichkeitsbedingungen hätte.

Für den PMV-Index ergibt sich die folgende mathematische Beschreibung:

$$\begin{aligned}
 PMV = & (0,303 \cdot e^{-0,036 M} + 0,028)[(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3}\{5733 - 6,99(M - W) \\
 & - p_D\} - 0,42\{(M - W) - 58,15\} - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M(5867 - p_D) - 0,0014 \\
 & \cdot M(34 - \vartheta_L) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl}\{(\vartheta_{cl} + 273)^4 - (\bar{\vartheta}_r + 273)^4\} - f_{cl} \\
 & \cdot \alpha_k(\vartheta_{cl} - \vartheta_L)] \quad (C2-19)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \vartheta_{cl} = & 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl}[3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl}\{(\vartheta_{cl} + 273)^4 - (\bar{\vartheta}_r + 273)^4\} \\
 & + f_{cl} \cdot \alpha_k(\vartheta_{cl} - \vartheta_L)]
 \end{aligned}$$

$$\alpha_k = 2,38(\vartheta_{cl} - \vartheta_L)^{0,25} \text{ für } 2,38(\vartheta_{cl} - \vartheta_L)^{0,25} \geq 12,1\sqrt{v_{rel}}$$

$$\alpha_k = 12,1\sqrt{v_{rel}} \text{ für } 2,38(\vartheta_{cl} - \vartheta_L)^{0,25} < 12,1\sqrt{v_{rel}}$$

$$f_{cl} = 1,00 + 1,290 I_{cl} \text{ für } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$f_{cl} = 1,05 + 0,645 I_{cl} \text{ für } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Symbole und Einheiten entsprechen denen der Behaglichkeitsgleichung (C2-18). Setzt man PMV gleich Null, ergibt sich aus Gl. (C2-19) die Behaglichkeitsgleichung. Mit Gl. (C2-19) läßt sich der PMV-Index für beliebige Kombinationen von Aktivitätsniveau, Bekleidung, Luft- und Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte berechnen. Die Gleichungen für ϑ_{cl} und α_k lassen sich iterativ lösen. Die unmittelbare Ermittlung des PMV-Index ist aus Tabellen (Anlage A) oder über ein Rechnerprogramm (Anlage B) leicht möglich. Auch seine Messung ist mit einem entsprechenden Meßgerät heute möglich.

Obwohl der PMV-Index für stationäre Bedingungen ermittelt wurde, kann er mit guter Genauigkeit auch dann eingesetzt werden, wenn ein oder mehrere Parameter kleineren Schwankungen unterliegen. In diesem Fall ist der zeitlich gewichtete Mittelwert der letzten Stunde für die sich ändernden Parameter einzusetzen.

Es wird empfohlen, den PMV-Index für Werte zwischen -2 und $+2$ anzuwenden und den Bereich der sechs Grundparameter wie folgt zu begrenzen:

$$\begin{aligned} M &= 46 \dots 232 \text{ W/m}^2 \text{ (} 0,8 \dots 4,0 \text{ met)} \\ I_{cl} &= 0 \dots 0,310 \text{ m}^2\text{K/W (} 0 \dots 2, \text{ clo)} \\ \vartheta_L &= 10 \dots 30 \text{ }^\circ\text{C} \\ \vartheta_r &= 10 \dots 40 \text{ }^\circ\text{C} \\ v_{rel} &= 0 \dots 1 \text{ m/s} \\ p_D &= 0 \dots 2700 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Der PMV-Index sagt zwar voraus, wie die mittlere Beurteilung des Raumklimas durch eine größere Personengruppe erfolgen wird, die Beurteilung der Einzelperson wird jedoch um diesen Mittelwert streuen. Es ist daher wichtig, herauszufinden, wie groß die Anzahl der Personen ist, die das Raumklima als zu kalt oder zu warm empfinden.

Die Analyse der subjektiven Beurteilung des Raumklimas durch ca. 1300 Versuchspersonen ermöglichte eine Zuordnung von PMV-Index und der Anzahl der mit den thermischen Bedingungen Unzufriedenen. Dabei wurde Unzufriedenheit immer dann angenommen, wenn die Versuchspersonen mit ± 2 oder ± 3 werteten. Der prozentuale Anteil dieser Unzufriedenen wird als PPD – „Predicted Percentage of Dissatisfied“ (Prozentsatz erwarteter Unzufriedener) bezeichnet. Der PPD-Index ergibt sich direkt aus dem PMV-Index anhand folgender Gleichung:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 PMV^4 - 0,2179 PMV^2) \quad (\text{C2-20})$$

Der Prozentsatz Unzufriedener läßt sich auch aus Bild C2-10 und mit dem Rechnerprogramm (Anhang B) bestimmen. Die Verteilung der Beurteilung eines ge-

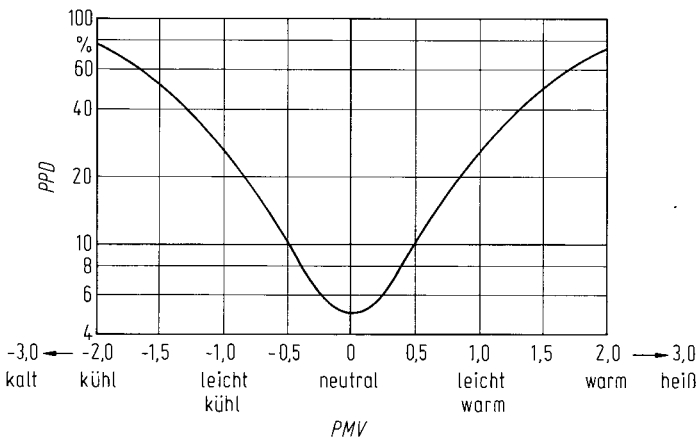


Bild C2-10. Vorhergesagter Prozentsatz an den thermisch unzufriedenen Personen (PPD) als Funktion der vorhergesagten mittleren Beurteilung (PMV)

Tabelle C2-5. Verteilung der individuellen Beurteilung des thermischen Raumklimas von 1300 Probanden in Abhängigkeit von der mittleren Beurteilung

PMV	PPD	Prozentualer Anteil des persönlichen Votums		
		Votum = 0	-1 ≤ Votum ≤ +1	-2 ≤ Votum ≤ +2
+2	75	5	25	70
+1	25	27	75	95
0	5	55	95	100
-1	25	27	75	95
-2	75	5	25	70

benen Raumklimas durch eine größere Gruppe zeigt Tabelle C2-5. Aus dieser und Bild C2-10 geht hervor, daß es keinen Zustand gibt, mit dem alle Personen zufrieden sind. Der minimale PPD-Index liegt bei 5% Unzufriedenen für $PMV = 0$. ISO 7730 [2] empfiehlt einen PPD-Index von ca. 10%. Dies entspricht nach Bild C2-10

$$-0,5 < PMV < +0,5$$

Anhand dieses Indizes ist allerdings auch die Festlegung eines größeren (oder kleineren) Toleranzbereichs mit einer größeren oder kleineren Zahl von Unzufriedenen möglich. Letztlich kann das von ökonomischen Bedingungen abhängen.

Bild C2-11 zeigt die optimale Raumtemperatur ($PMV = 0$) als Funktion des Aktivitätsniveaus und der Bekleidung. Außerdem ist ein Bereich optimaler Temperaturen dargestellt, der einem PMV-Index von $\pm 0,5$ entspricht. Man beachte, daß

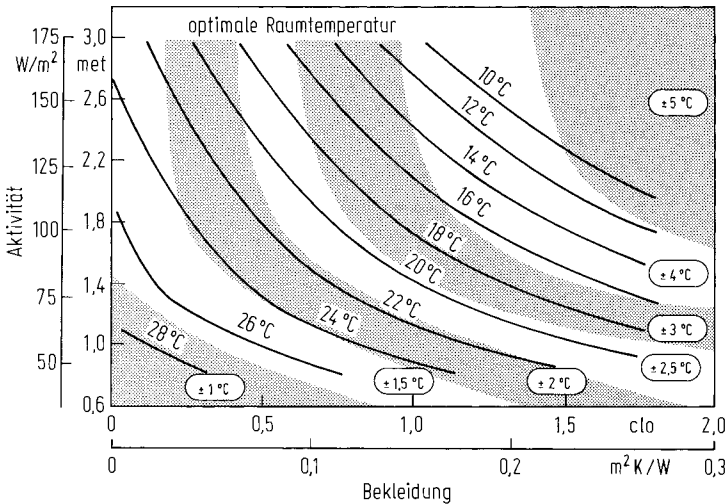


Bild C2-11. Optimale Raumtemperatur (entsprechend $PMV = 0$) als Funktion von Aktivität und Bekleidung. Das Behaglichkeitsgebiet ($-0,5 < PMV < +0,5$) ist gepunktet dargestellt

der akzeptable Temperaturbereich für geringe Aktivität und leichte Bekleidung schmal und der für hohe Aktivität und warme Kleidung breit ist.

Beispiel C2-7.

In einem Büro mit einem typischen Aktivitätsniveau von $M = 1,2 \text{ met}$ möge die Temperatur im Bereich $-0,5 < PMV < +0,5$ geregelt werden. Im Sommer gilt $I_{cl} = 0,5 \text{ clo}$, im Winter $I_{cl} = 1,0 \text{ clo}$.

Es ergibt sich nach Abb. C2-11

Sommer: $23^\circ\text{C} < \vartheta_R < 26^\circ\text{C}$

Winter: $20^\circ\text{C} < \vartheta_R < 24^\circ\text{C}$

Beispiel C2-8.

In einer Industriehalle mit einer Deckenstrahlungsheizung wurden folgende Werte ermittelt:

$$I_{cl} = 1,0 \text{ clo}, M = 1,6 \text{ met}, \vartheta_L = 18^\circ\text{C}, \overline{\vartheta}_r = 26^\circ\text{C}, V_{rel} = 0,2 \text{ m/s}, \varphi = 50\% \text{ r.F.}$$

Bestimme die Indizes PMV und PPD .

Aus den Tabellen, Anlage A bzw. dem Rechnerprogramm, Anlage B ergibt sich:

$$PMV = +0,3, PPD = 7\%$$

C2.6 Lokales thermisches Unbehagen

PMV - und PPD -Index berücksichtigen den Einfluß des Raumklimas auf den Körper als Ganzes. Aber selbst wenn der PMV -Index thermische Neutralität vorher sagt, kann Unbehagen entstehen, wenn ein Teil des Körpers zu warm und ein anderer zu kalt ist (lokales Unbehagen). Dieses Unbehagen kann durch große vertikale Lufttemperaturgradienten, kalte oder warme Fußböden, zu hohe Luftgeschwindigkeiten (Zug) oder zu große Strahlungstemperatur-Asymmetrie hervorgerufen werden. Thermische Neutralität, ausgedrückt als PMV -Grenzwert, ist somit keine hinreichende Forderung, um thermische Behaglichkeit zu garantieren. Es müssen weitere Forderungen zur Vermeidung lokalen Unbehagens gestellt werden, die vor allem für solche Personen von Bedeutung sind, die ruhig sitzen. Aus diesem Grund werden für diesen Personenkreis in ISO 7730 [2] Richtwerte zum lokalen Unbehagen (Diskomfort) vorgegeben. Denn bei erhöhter Aktivität ist der Mensch diesen Einflüssen gegenüber weniger empfindlich.

Vertikaler Lufttemperaturgradient: Temperaturunterschiede zwischen Kopf- und Knöchelhöhe rufen vor allem bei niedrigeren Werten in Knöchelhöhe Unbehagen hervor. Bild C2-12 gibt den Anteil Unzufriedener als Funktion des Temperaturunterschieds zwischen dem Kopf und den Füßen an. Einer Differenz von 3 K entsprechen 5% Unzufriedene, und dieser Wert ist als Maximum zu empfehlen.

Warme und kalte Fußböden: Für Personen mit leichtem Schuhwerk (Hausschuhe o. ä.) ist die Temperatur des Fußbodens in einem Raum, weniger sein Material, von Bedeutung für die thermische Behaglichkeit der Füße. Aus Bild C2-13 geht hervor, daß es keine Fußbodentemperatur gibt, die von allen akzeptiert wird [3]. Für einen Anteil von 10% Unzufriedenen, wie er in ISO 7730 empfohlen wird, erhält man ein Temperaturintervall von 19–29 °C. Für konstant temperierte Räume wird allerdings eine obere Grenztemperatur von 26 °C empfohlen.

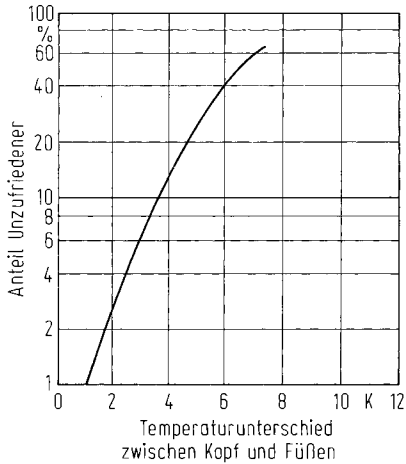


Bild C2-12. Anteil Unzufriedener als Funktion des vertikalen Lufttemperaturunterschieds zwischen Kopf (1,1 m) und Füßen (0,1 m)

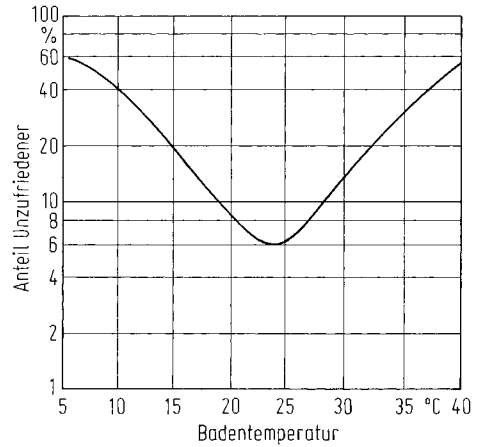


Bild C2-13. Anteil Unzufriedener als Funktion der Fußbodentemperatur für Personen mit leichter Fußbekleidung

In Schlafzimmern, Bädern und Schwimmhallen können Personen direkten Hautkontakt zum Boden haben. Daher spielt hier neben der Bodentemperatur auch das Fußbodenmaterial für das Wärmeempfinden eine Rolle. Unmittelbar nachdem der Fuß auf den Boden gesetzt wird, nimmt die Sohle die Kontakttemperatur an, die von der Bodentemperatur und dem Wärmeeindringkoeffizienten b der Fußbodenoberfläche bestimmt wird

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad (\text{C2-21})$$

λ Wärmeleitkoeffizient

ρ Dichte

c spezifische Wärmekapazität

Die behaglichen Temperaturbereiche diverser Fußbodenmaterialien faßt Tabelle C2-6 zusammen.

Asymmetrische Wärmestrahlung. Differenzen in den Oberflächentemperaturen diametraler Raumumgrenzungsflächen können zu lokalem Unbehagen führen. In

Tabelle C2-6. Behagliche Temperaturbereiche für den unbedeckten Fuß bei verschiedenen Fußbodenmaterialien

Bodenbelag	Behaglichkeitsbereich, [°C]
Stein, Marmor, Beton	27 ... 30
Linoleum, PVC	25 ... 29
Holz, Kork	23 ... 28
Textil (Teppich)	21 ... 28

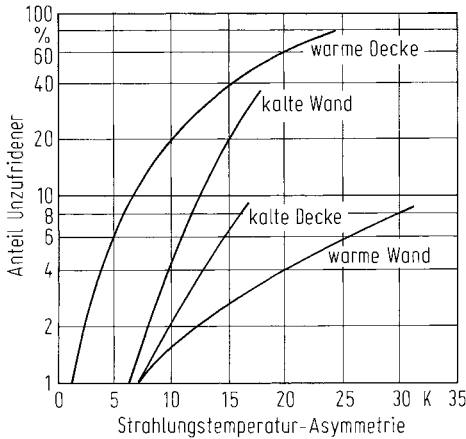


Bild C2-14. Anteil Unzufriedener als Funktion der Strahlungstemperatur-Asymmetrie für Personen nahe kalten oder warmen Wänden bzw. unter kalten oder warmen Decken

Bild C2-14 ist der Zusammenhang zwischen dem Anteil Unzufriedener und der Strahlungstemperatur-Asymmetrie für kalte bzw. warme Deckenflächen und Wände dargestellt. Es zeigt sich, daß warme Decken und kalte Wände (Fenster) bei gleicher Differenz der Halbraumstrahlungstemperaturen am unangenehmsten empfunden werden. ISO 7730 empfiehlt als maximale Differenzen 5 K (warme Decken) und 10 K (kalte Fenster) und geht dabei von ca. 5% Unzufriedenen aus.

Zug-Risiko. Zug ist die unerwünschte lokale Abkühlung des Körpers durch Luftbewegung. Als Zug-Risiko DR (draught risk) wird der prozentuale Anteil der Personen bezeichnet, die sich unbehaglich fühlen. Für die Berechnung des DR -Werts gilt:

$$DR = (34 - \vartheta_L)(\bar{v} - 0,05)^{0,62}(0,37 \cdot \bar{v} \cdot Tu + 3,14) \quad (C2-22)$$

DR [%] . . . Zug-Risiko, d. h. der prozentuale Anteil der Personen, die auf Grund von Zegerscheinungen unzufrieden sind

ϑ_L [°C] . . . lokale Lufttemperatur

\bar{v} [m/s] . . . mittlere lokale Luftgeschwindigkeit

Tu [%] . . . lokaler Turbulenzgrad.

Der Gl. (C2-22) liegen Studien an 150 Versuchspersonen bei Lufttemperaturen von 20–26 °C, mittleren Luftgeschwindigkeiten von 0,05–0,4 m/s und für Turbulenzgrade zwischen 0 und 70% zugrunde [5]. Sie ist anwendbar für Personen, die einer leichten, sitzenden Tätigkeit nachgehen und die sich für den gesamten Körper nahezu thermisch neutral fühlen. Aus den Bildern C2-15, C2-16 und C2-17 lassen sich für $DR = 10\%$, 15% und 25% die entsprechenden mittleren Luftgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Turbulenzgrad und Lufttemperatur ablesen.

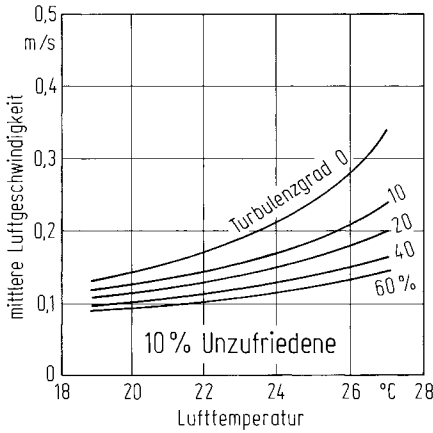


Bild C2-15. Grenzwerte von mittlerer Luftgeschwindigkeit als Funktion von Lufttemperatur und Turbulenzgrad, für die 10% Unzufriedene durch Zug zu erwarten sind

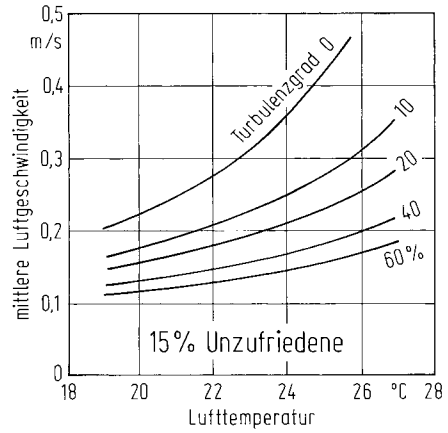


Bild C2-16. Grenzwerte von mittlerer Luftgeschwindigkeit als Funktion von Lufttemperatur und Turbulenzgrad, für die 15% Unzufriedene durch Zug zu erwarten sind

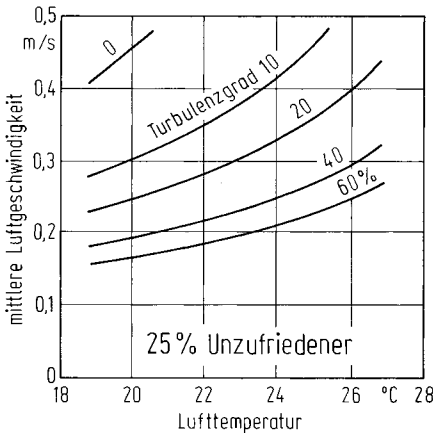


Bild C2-17. Grenzwerte von mittlerer Luftgeschwindigkeit als Funktion von Lufttemperatur und Turbulenzgrad, für die 25% Unzufriedener durch Zug zu erwarten sind

C2.7 Applikationen

Behaglichkeitsforderungen für Büroarbeit

In der folgenden Übersicht sind Behaglichkeitsanforderungen bei leichter Arbeit im Sitzen für den Sommer- und den Winterfall zusammengefasst. Die Angaben, die sich auf Normwerte beziehen, sind für die meisten in der Praxis auftretenden Problemstellungen, so z. B. für Büroräume und Wohnungen, anwendbar. Es gelten folgende Bedingungen für:

Leichte, vorwiegend sitzende Tätigkeit im Winter (Heizbetrieb)

- Raumtemperatur $\vartheta_R = 20 \dots 24^\circ\text{C}$
- vertikaler Lufttemperaturgradient zwischen 0,1 m (Knöchel) und 1,1 m (Kopf): $< 3\text{ K}$
- Oberflächentemperatur des Fußbodens: $19 \dots 26^\circ\text{C}$, bei Fußbodenheizung bis maximal 29°C
- mittlere Luftgeschwindigkeit: s. Bild C2-16
- vertikale Strahlungstemperaturasymmetrie (Fenster, kalte Wände): $< 10\text{ K}$, bezogen auf eine kleine vertikale Fläche 0,6 m über dem Fußboden
- horizontale Strahlungstemperaturasymmetrie (geheizte Decke): $< 5\text{ K}$, bezogen auf eine kleine vertikale Fläche 0,6 m über dem Fußboden

Leichte, vorwiegend sitzende Tätigkeit im Sommer (Kühlbetrieb)

- Raumtemperatur $\vartheta_R = 23 \dots 26^\circ\text{C}$
- vertikaler Lufttemperaturgradient zwischen 0,1 m (Knöchel) und 1,1 m (Kopf): $< 3\text{ K}$
- mittlere Luftgeschwindigkeit: s. Bild C2-16
- horizontale Strahlungstemperatur-Asymmetrie (gekühlte Decke): In der Praxis kein lokales thermisches Unbehagen (Bild C2-14).

Beurteilung des thermischen Raumklimas in der Praxis

Für die Beurteilung des Raumklimas ist es wichtig, den Ort festzulegen, an dem die Behaglichkeitsbedingungen zu erfüllen sind. Dieser Ort, die Aufenthaltszone des Menschen, ist gewöhnlich ein Raumvolumen in 0,6 m Entfernung von den Wänden und mit 1,8 m Höhe.

Dann gilt es, Randbedingungen für eine auch ökonomisch vertretbare Einhaltung der Behaglichkeitsbedingungen zu formulieren. Hierzu gehören vor allem extreme meteorologische Bedingungen, d. h. die Festlegung der kältesten und wärmsten Wetterparameter, für die noch thermische Behaglichkeit garantiert werden soll. In manchen Fällen kann es notwendig sein, eine maximale thermische Raumlast, z. B. durch Geräte und Maschinen, festzulegen.

Zur Beurteilung des thermischen Raumklimas in der Projektierungsphase müssen vorab Aktivitätsniveau und typische Bekleidungsgehnheiten für die Sommer- und Winterperiode unter Berücksichtigung der Raumnutzung ermittelt werden. Danach kann der zulässige Bereich der Raumtemperatur festgelegt und diese für den kältesten und wärmsten Aufenthaltsort einer Person innerhalb der Aufenthaltszone berechnet werden. Darüber hinaus lassen sich Strahlungstemperatur-Asymmetrie, Bodentemperatur und Luftgeschwindigkeit einschließlich des Turbulenzgrads für kritische Bereiche abschätzen.

In vorhandenen Räumen können Aktivität und Bekleidung der Raumnutzer durch Beobachtung und Befragung bestimmt werden. Die Messung der Innenklimaparameter sollte bei typischen Außenbedingungen erfolgen, evtl. zu verschiedenen Jahreszeiten. Wie detailliert die Messungen durchgeführt werden, hängt von den ökonomischen Rahmenbedingungen ab. Oft wird es vorteilhaft sein, die Temperatur an einer Stelle des Raums über den gesamten Tag hinweg zu messen, um einen Eindruck von den Temperaturschwankungen zu erhalten. Darüber hinaus

sind kurzzeitige Messungen der Klimaparameter an charakteristischen und auch kritischen Orten innerhalb der Aufenthaltszone angezeigt. Anforderungen an die zu verwendenden Meßgeräte sind in DIN 1946 Teil 2 [6] und ISO 7726 [7] gegeben.

Einfluß von Alter, Geschlecht, Adaptation und geographischer Herkunft

Die meisten experimentellen Untersuchungen zum Raumklima wurden mit Studentinnen und Studenten durchgeführt. Versuche mit älteren und alten Personen haben jedoch erstaunlich gute Übereinstimmung mit den Resultaten jüngerer Versuchspersonen gezeigt. Die beschriebene Methode zur Beurteilung des Raumklimas ist damit für erwachsene und gesunde Menschen gültig. Bei gleicher Kleidung finden sich nur geringe Differenzen in der thermischen Behaglichkeit von Mann und Frau. Die in der Praxis jedoch meist vorhandenen und oft deutlichen Unterschiede in den Bekleidungsgehnheiten können zu Diskrepanzen in den geschlechtsspezifischen Anforderungen an das thermische Raumklima führen.

Humphreys [8] hat durch vergleichende Betrachtung von Untersuchungen an verschiedenen Orten der Erde nachgewiesen, daß der Mensch überall thermische Behaglichkeit anstrebt, die bevorzugten Umgebungstemperaturen jedoch sehr unterschiedlich sein können. Er folgert daraus, daß eine vom Außenklima geprägte Adaptation zur Bevorzugung kälterer Umgebungsbedingungen durch Personen aus Polargebieten und wärmerer durch solche aus den Tropen führt. Nachgewiesene Differenzen lassen sich jedoch in den meisten Fällen auf Unterschiede in der Bekleidung, im Aktivitätsniveau und in einigen Fällen in typischen Luftgeschwindigkeiten zurückführen.

Es ist bekannt, daß Menschen sich innerhalb von 5–10 Tagen an eine wärmere Umgebung gewöhnen können. Die Anpassung der Schweißsekretion, die Produktion von deutlich mehr Schweiß, ermöglicht eine effektivere Thermoregulation. Dieses scheint jedoch keinen wesentlichen Einfluß auf das bevorzugte Raumklima zu haben.

Die Frage nach ethnogeographisch bedingten Differenzen wurde in einigen Studien [1, 9, 10] umfassend untersucht: Nordamerikanische, europäische und japanische Versuchspersonen wurden in Klimakammern den gleichen, gut definierten Bedingungen ausgesetzt. Signifikante Unterschiede in der bevorzugten Temperatur konnten für die 3 Gruppen nicht nachgewiesen werden. Die Untersuchungen mit der nordamerikanischen Gruppe wurden zudem mit Standardbekleidung im Sommer und im Winter durchgeführt [11]. Ein jahreszeitlich bedingter Unterschied in der behaglichen Temperatur konnte nicht nachgewiesen werden.

Diese Ergebnisse bedeuten natürlich nicht, daß alle Menschen ein gleiches Behaglichkeitsempfinden haben. Man weiß im Gegenteil, daß markante individuelle Unterschiede bestehen. Aber es scheint keine Differenzen im Mittelwert des thermischen Empfindens der drei ethnogeographischen Bevölkerungsgruppen und auch zwischen Sommer- und Winterfall zu geben. Dies berechtigt zu der Annahme, daß die beschriebenen Behaglichkeitsbedingungen allgemein für gesunde, erwachsene Menschen anwendbar sind. Natürlich müssen örtliche Geohnheiten bezüglich Bekleidung und Aktivität berücksichtigt werden.

Instationäre Bedingungen

Die Behaglichkeitsgleichung und der PMV-Index beziehen sich auf stationäre Verhältnisse, was hier bedeutet, daß die betrachtete Person etwa für 2 Stunden den gleichen Bedingungen ausgesetzt war. Für instationäre Verhältnisse ist das derzeitige Wissen noch unvollständig und weitere Forschungsarbeit erforderlich. Mit zufriedenstellender Genauigkeit läßt sich der PMV-Index allerdings dann anwenden, wenn man für den instationären Fall die Mittelwerte der letzten Stunde einsetzt.

C3 Raumluftqualität

C3.1 Einleitung

Die Raumluftqualität umfaßt alle nicht-thermischen Aspekte der Raumluft, die Einfluß auf Wohlbefinden und Gesundheit des Menschen haben. Die Luft wirkt auf den Menschen in erster Linie über die Atmung (Respiration), deren Zweck es ist, dem Körper den für den Stoffwechsel notwendigen Sauerstoff zu- und entstehendes Kohlendioxid abzuführen. Beim Einatmen wird die menschliche Lunge, deren Oberfläche etwa einhundert Quadratmeter beträgt, mit allen in der Atemluft enthaltenen Komponenten konfrontiert. Tabelle C3-1 gibt die Hauptbestandteile trockener Luft an. Viele andere Beimengungen sind in mehr oder weniger geringen Konzentrationen fast immer anwesend.

Die Raumnutzer haben zwei Forderungen an die Raumluft: Erstens soll die Luft als frisch und angenehm und nicht abgestanden und muffig empfunden werden und zum anderen darf das Einatmen der Luft kein Gesundheitsrisiko darstellen. Dabei gibt es Unterschiede in den individuellen Forderungen. Einige Menschen sind außerordentlich sensibel und stellen hohe Anforderungen an ihre Atemluft, andere wiederum sind wenig empfindlich. Die Raumluftqualität kann daher auch durch die Zufriedenheit der Betroffenen beschrieben werden. Diese Qualität ist hoch, wenn nur eine geringe Zahl Unzufriedene ist, aber niedrig, wenn die Zahl der Unzufriedenen groß ist und/oder ein signifikantes Gesundheitsrisiko besteht. Im folgenden sollen empfundene Luftqualität und Gesundheitsrisiko getrennt diskutiert und eine Methode zur Berechnung des zur Lüftung erforderlichen Außenluftstroms angegeben werden.

Tabelle C3-1. Hauptinhaltsstoffe atmosphärischer Luft

Gas	Anteil Vol.-%
Stickstoff	78,1
Sauerstoff	20,9
Argon	0,9
Kohlendioxid	0,035