

# Behaglichkeit und sommerliches Wärmeverhalten

Seminar-Skript  
(Kapitel 1: Thermische Behaglichkeit)

**April 2003**

Der Umdruck ist zum persönlichen, internen Gebrauch bestimmt.

## Inhaltsverzeichnis

1	Thermische Behaglichkeit .....	3
1.1	Regelung des Wärmehaushalts im menschlichen Körper [1] .....	3
1.1.1	Körpertemperatur .....	3
1.1.2	Steuerungsvorgänge .....	3
1.1.3	Wärmetransport im Blut .....	4
1.1.4	Schweißabsonderung .....	4
1.1.5	Wärmetausch .....	4
1.2	Definition der thermischen Behaglichkeit .....	5
1.3	Biophysikalische Daten des Menschen .....	6
1.3.1	Wärmeabgabe bei verschiedenen Tätigkeiten .....	7
1.3.2	Wärme- und Feuchteabgabe bei verschiedenen Temperaturen .....	8
1.4	Beschreibung der Bekleidung .....	9
1.5	Empfohlene Temperaturen je nach Bekleidung und Tätigkeit .....	10
1.6	Mögliche Einflüsse auf die thermische Behaglichkeit in Räumen .....	10
1.7	Auswirkungen einzelner Einflussgrößen .....	11
1.7.1	Raumlufttemperatur [5] .....	11
1.7.2	Raumumschließungsflächentemperatur .....	12
1.7.3	Raumluftfeuchte .....	18
1.7.4	Luftbewegung .....	20
1.8	PMV und PPD Indizes nach EN ISO 7730:1995 .....	22
1.9	Literatur .....	26

## 1 Thermische Behaglichkeit

### 1.1 Regelung des Wärmehaushalts im menschlichen Körper [1]

#### 1.1.1 Körpertemperatur

Die Temperatur des Körpers ist nicht, wie man häufig annimmt, im ganzen Organismus gleichmäßig verteilt. Eine weitgehend konstante Temperatur (Körpertemperatur), die in engen Grenzen um 37 °C schwankt, herrscht lediglich im Innern des Gehirns, im Herzen und in den Abdominalorganen (Organe des Bauches und Unterleibes) vor. Diese konstante Kerntemperatur ist eine Voraussetzung für den normale Ablauf des wichtigsten Lebensprozesse; stärkere und langandauernde Abweichungen sind mit dem Leben des Warmblüters nicht vereinbar.

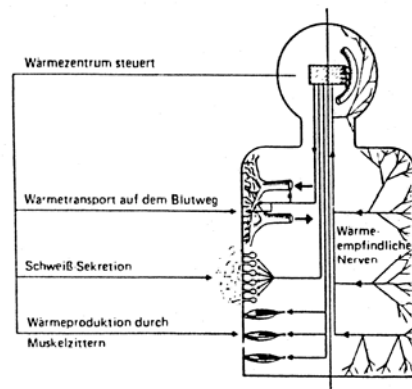


Bild 1.1 Regelung des Wärmehaushalts beim Menschen

#### 1.1.2 Steuerungsvorgänge

Bild 1.1 zeigt schematisch die wesentlichen Steuerungsmechanismen, über die der Organismus zur Aufrechterhaltung der Kerntemperatur verfügt. Im Mittelpunkt der Wärmeregulation steht das sich im Zwischenhirn befindliche Wärmezentrum, welches das übergeordnete Steuer- und Regelorgan für den Wärmehaushalt ist und so mit einem Temperaturregler verglichen werden kann. Die nervösen Wellen des Wärmezentrums werden zum Teil direkt, zu Teil durch die wärme empfindlichen Hautnerven über die Körpertemperaturen orientiert.

Vom Wärmezentrum aus werden auch die zur Erhaltung der konstanten Innentemperatur notwendigen Ausgleichsmechanismen auf nervösem Weg ausgelöst und gesteuert. Daher werden in erster Linie die Verschiebungen der Wärme auf dem Blutweg, die Sekretion des Schweißes sowie die Wärmeproduktion geregelt und den Bedürfnissen des Wärmehaushalts angepasst.

#### 1.1.3 Wärmetransport im Blut

Die Wärmetransportfunktion des Blutes spielt die wichtigste Rolle bei der Regelung des Wärmehaushalts. Die blutdurchströmten Gefäße, insbesondere die Kapillaren, haben im Körper die Funktion von Kühl- oder Heizschlangen. Sie nehmen die Wärme auf und geben sie in Geweben mit niedrigen Temperaturen wieder ab. So kann das Blut die Wärme aus dem Innern des Körpers in die durch die Außentemperatur abgekühlte Haut bringen oder, umgekehrt, bei künstlicher Wärmezufuhr von außen, die Wärme von der Haut ins Innere des Körpers transportieren. Die Regelung der Hautdurchblutung ist der wichtigste Steuermechanismus; sie bildet die Grundlage für den Wärmeaustausch zwischen dem Menschen und seiner Umwelt.

#### 1.1.4 Schweißabsonderung

Das zweite vom Wärmezentrum aus gesteuerte Regulationssystem ist die Schweißabsonderung, die ebenfalls durch nervöse Impulse, die im Wärmezentrum ihren Ursprung haben, reguliert wird.

#### 1.1.5 Wärmetausch

Im Innern des Organismus wird die chemische Energie der Nährstoffe in mechanische Energie und in Wärme umgewandelt. Der Körper verwendet diese innere Wärme zur Erhaltung einer konstanten Körpertemperatur, wobei die überschüssige Wärme nach außen abgegeben wird.

Es besteht somit ein ständiger Wärmeaustausch zwischen dem Körper und seiner Umgebung, der zum Teil von physiologischen Anpassungsmechanismen, zum Teil aber auch von den physikalischen Gesetzen des Wärmeübergangs zwischen Körper und Umgebung abhängig ist. Dieser Wärmeaustausch kann auf vier physikalisch verschiedenen Wegen vor sich gehen:

- durch Konvektion und Leitung der Wärme von den Körperoberflächen an die Luft;
- durch Wärmestrahlung von der Körperoberfläche an die umgebenden Flächen;
- durch die Verdunstung durch Wasser an der Haut;
- durch Atmung;
- durch Ausscheidungen, Einnahmen von Speisen u.a.

### 1.2 Definition der thermischen Behaglichkeit

Grundlegende physikalisch-physiologische Messungen der menschlichen Wärmebilanz und Temperaturen an repräsentativen Körperstellen führten zu folgenden Ergebnissen [2]:

1. Für die Wahrnehmung des thermischen Zustands existieren keine Wärmestromfühler (Rezeptoren), sondern ausschließlich Temperaturfühler, sogenannte Thermorezeptoren. Hierbei unterscheidet man zwischen Kaltrezeptoren – solche, die bei Temperaturen von ca. 37 °C an abwärts verstärkt ansprechen - und Warmrezeptoren – solche, die bei Temperaturen von ca. 35 °C an aufwärts verstärkt ansprechen. Wie Neurophysiologen nachwiesen, erfolgt das Ansprechen der Thermorezeptoren durch elektrische Impulse.
2. Thermische Unbehaglichkeit durch Kälte wird über die Kaltrezeptoren in der Körperoberfläche (Haut) wahrgenommen – und zwar dann, wenn die Hauttemperatur einen bestimmten Schwellenwert (ca. 34 °C) unterschreitet. Bei zunehmender Abkühlung setzt eine Erhöhung des Stoffwechsels ein. Thermische Unbehaglichkeit durch Wärme, verbunden mit Schwitzen, wird über die Warmrezeptoren im etwa stecknadelkopfgroßen Temperaturregelzentrum im Stammhirn wahrgenommen – und zwar dann, wenn dessen Temperatur einen bestimmten Schwellenwert (ca. 37 °C) überschreitet.

Somit kann thermische Behaglichkeit definiert werden als:

„Die Abwesenheit solcher Impulse von beiden Rezeptorarten, welche Anlass geben, die thermische Umgebung zu verändern“.

### 1.3 Biophysikalische Daten des Menschen

Tabelle 1.1 Biophysikalische Daten [3]

Masse	60 ... 70 kg	Grundumsatz	70 ... 80 W
Rauminhalt	60 l	Zahl der Atemzüge	16 /min
Oberfläche *	~1,7 ... 1,9 m <sup>2</sup>	Atemluftmenge	0,5 m <sup>3</sup> /h
Körpertemperatur	37 °C	Mittlere Hauttemperatur	32 ... 33 °C
Pulsschläge	70 ... 80 /min	Dauerleistung	85 W
		CO <sub>2</sub> - Ausatmung (ruhend)	10 ... 20 l/h

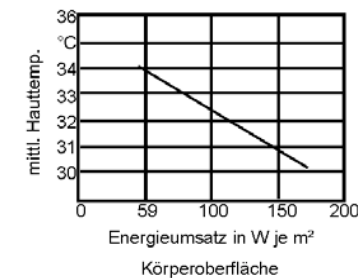


Bild 1.2 Mittlere Hauttemperatur in Abhängigkeit vom Energieumsatz

Die spezifische Wärmeabgabe der verschiedenen Körperteile, die sich durch Wärmestrom- Messfolien ermitteln lässt, ist sehr unterschiedlich. Während der bekleidete Mensch im Durchschnitt 60 W/m<sup>2</sup> abgibt, beträgt die Oberflächenbelastung

- beim Kopf etwa 115 W/m<sup>2</sup> bei 33 °C
- bei den Händen etwa 75 W/m<sup>2</sup> bei 28 °C
- bei den Fußsohlen etwa 145 W/m<sup>2</sup> bei 29 °C.

Die Fußsohlen sind also am höchsten belastet, vorwiegend durch Wärmeleitung.

### 1.3.1 Wärmeabgabe bei verschiedenen Tätigkeiten

Tabelle 1.2 Gesamtwärmeabgabe des Menschen bei verschiedener Tätigkeit.

Tätigkeit	Aktivitätsgrad DIN 1946-2	Wärmeabgabe		
		W/m <sup>2</sup>	met	W
ruhend	I	46	0,8	80
sitzend, entspannt		58	1,0	100
stehend, entspannt		70	1,2	125
sitzend, leichte Tätigkeit (Büro, zu Hause, Schule, Labor)		70	1,2	125
stehend, leichte Tätigkeit (Zeichenbrett)		81	1,4	145
stehend, leichte Tätigkeit (Shopping, Labor)	II	93	1,6	170
mäßige körperliche Tätigkeit (Haus, Maschinen-Arbeit)	III	116	2,0	200
schwere körperliche Tätigkeit (Arbeit an schweren Maschinen)	IV	165	2,8	300

### 1.3.2 Wärme- und Feuchteabgabe bei verschiedenen Temperaturen

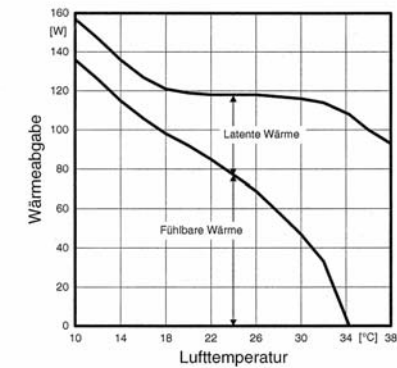


Bild 1.3 Wärmeabgabe des normal bekleideten Menschen ohne körperliche Tätigkeit bei ruhender Luft

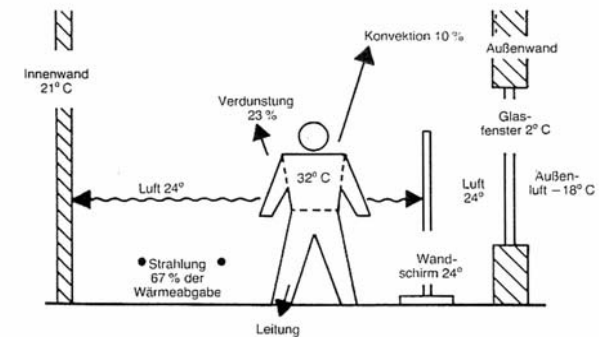


Bild 1.4 Wärmeabgabe des Menschen:

Anteile der notwendigen Wärmeabgabe des menschlichen Körpers über Wärmeleitung an die Umgebung und über Lufttransport (Konvektion), Wasserverdunstung des Organismus sowie über Wärmeabstrahlung beim ruhenden, normalgewichtigen, nackten Menschen (mit einer mittleren Hauttemperatur von ca. 32 °C) unter bestimmten, den üblichen etwa entsprechenden Luft- und Umschließungsflächen-Temperaturbedingungen sowie bei ruhiger Luft und mittlerer Luftfeuchte in einem Raum, bei jedoch sehr niedriger Außenlufttemperatur.

Zum ganz überwiegenden Teil geschieht die Wärmeabgabe des Körpers unter solchen Voraussetzungen über Strahlung in Abhängigkeit von der Umschließungsflächentemperatur. Stünde im gegebenen Falle der Wandschirm nicht vor dem niedrigtemperierten Fenster, so würde die in Raummitte anwesende Person infolge zu großer Wärmeabstrahlung an das Fenster trotz der bestehenden ziemlich hohen Lufttemperatur frieren [4].

Tabelle 1.3 Wärmeabgabe und Wasserdampfabgabe des Menschen (normal bekleideter, sitzender Mann bei leichter Beschäftigung und ruhiger Luft; Luftfeuchte 30 – 70%.

Luft- temperatur °C	Fühlbare Wärme W	Latente Wärme (Wasserdampf) W	Gesamt- wärmeabgabe W	Wasser- dampfabgabe g/h
10	136	21	157	30
12	126	21	147	30
14	115	21	136	30
16	106	21	127	30
18	98	23	121	33
20	92	27	119	38
22	85	33	118	47
24	77	41	118	58
26	69	49	118	70
28	58	59	117	85
30	47	69	116	98
32	33	81	114	116

#### 1.4 Beschreibung der Bekleidung

Die Wärmeschutzwirkung der Bekleidung kann folgendermaßen beschrieben werden:

Tabelle 1.4. Wärmeleitwiderstand der Bekleidung

Bekleidung	Wärmedurchlasswiderstand R in m <sup>2</sup> K/kW
Ohne Kleidung	0
Leichte Sommerkleidung	80
Mittlere Kleidung	160
Warme Kleidung	240
Anmerkung: Gelegentlich wird ein Wärmeleitwiderstand R von 160 m <sup>2</sup> K/kW = 1 clo bezeichnet	

1 clo = 1 clothing = 0,155 m<sup>2</sup>K/W

Tabelle 1.5 Wärmedämmung typischer Bekleidungsarten

Art der Bekleidung	Wärmedurchlasswiderstand der Bekleidung	
	[m <sup>2</sup> K/W]	[clo]
unbekleidet	0	0
kurze Hose	0,015	0,1
typische Tropenbekleidung (Unterhose, kurze Hose, kurzärmeliges Hemd mit offenem Kragen, leichte Socken und Sandalen)	0,045	0,3
leichte Sommerbekleidung (Unterhose, lange leichte Hose, kurzärmeliges Hemd mit offenem Kragen, leichte Socken und Schuhe)	0,08	0,5
leichte Arbeitskleidung (leichte Unterwäsche, langärmeliges Baumwollhemd, lange Arbeitshose, Wollsocken, Schuhe)	0,11	0,7
typische Bekleidung für Aufenthalt in Räumen, im Winter (Unterwäsche, langärmeliges Hemd, lange Hose, Jackett oder langärmeliger Pullover, dickere Socken, Schuhe)	0,16	1,0
schwere, für Europa übliche Arbeitskleidung (lange Baumwollunterwäsche, Hemd, Hose, Weste, Jacke, Wollsocken, schwere Schuhe)	0,23	1,5

#### 1.5 Empfohlene Temperaturen je nach Bekleidung und Tätigkeit

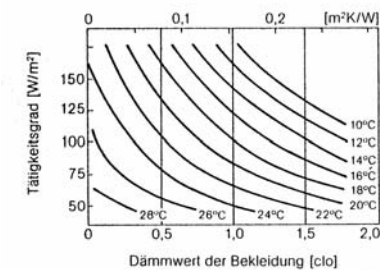


Bild 1.5 Kurven optimaler Temperatur in Abhängigkeit von Bekleidung und Tätigkeitsgrad nach Fanger [1]

#### 1.6 Mögliche Einflüsse auf die thermische Behaglichkeit in Räumen

Nach Frank [5] kommen für die Beeinflussung des thermischen Gleichgewichts des Menschen und damit die thermische Behaglichkeit 21 Einflussgrößen in Frage. Diese sind im folgenden Bild zusammengestellt und in physikalische,

physiologische und intermediäre Größen unterteilt. Letztere umfassen zwischen Mensch und Umwelt wirksame Behaglichkeitsbedingungen, wie Kleidung und Tätigkeitsgrad. Glücklicherweise lassen bisherige Untersuchungen erkennen, dass lediglich sechs Einflussgrößen primär und dominierend sind, acht von geringerer Bedeutung und dass die restlichen sekundäre oder bisher nur vermutete Faktoren darstellen.

Wesentlich für die thermischen Behaglichkeit des Menschen sind vor allem vier rein physikalischen Parameter: Lufttemperatur, Umschließungsflächentemperatur, Luftgeschwindigkeit, Luftfeuchte sowie Tätigkeitsgrad und Bekleidung des Menschen.

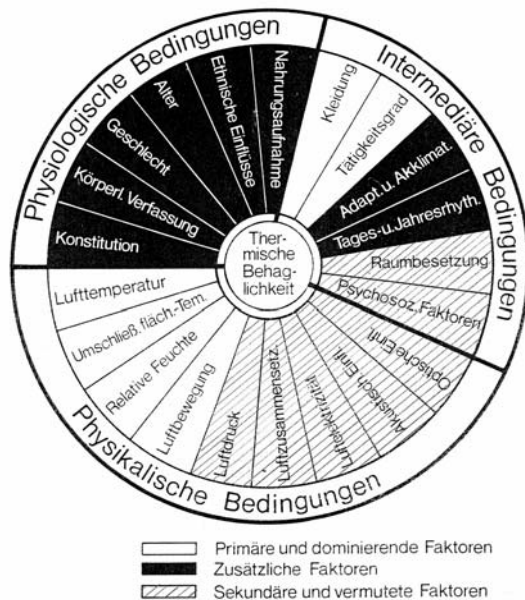


Bild 1.6 Thermische Behaglichkeit in Abhängigkeit von physiologischen, intermediären und physikalischen Einflüssen, nach Frank [5]

## 1.7 Auswirkungen einzelner Einflussgrößen

### 1.7.1 Raumlufttemperatur [3]

Für mitteleuropäisches Klima werden bei normal gekleideten, sitzenden Menschen ohne körperliche Arbeit

- im Winter ca. 22 °C

- im Sommer ca. 22 bis 24 °C (bei mittlerer Außenlufttemperatur)

als behaglich angesehen.

An heißen Tagen mit Außenlufttemperaturen von 28 bis 30 °C werden bei kurzzeitigem Aufenthalt in gekühlten Räumen 21 °C als zu kalt empfunden. Als Richtwert gilt hier:

$$\vartheta_{Li} = \frac{\vartheta_{La} - 20^\circ\text{C}}{2} + 20^\circ\text{C}$$

Räume, in denen sich Frauen aufhalten, sollten Raumlufttemperaturen ca. 1-2 K höher liegen (Kleidung). Dies gilt ebenfalls für Aufenthaltsräume für ältere Leute.

Schlafräume werden meist auf geringerer Temperatur gehalten, etwa 15 bis 18 °C.

Für Arbeitsräume gelten nach Arbeitsstättenrichtlinie (ASR 6, 05.01) folgende Lufttemperaturen

Überwiegende Arbeitshaltung	Arbeitsschwere		
	Leicht	Mittel	Schwer
Sitzen	20 °C	19 °C	-
Stehen und / oder Gehen	19 °C	17 °C	12 °C

Die Temperaturschichtung sollte nach [3] 3 K/m (nach DIN 1946-2:1994-01 2 Km) im Aufenthaltsbereich nicht überschreiten.

### 1.7.2 Raumumschließungsflächentemperatur

Von einer Oberfläche abgestrahlte Energie:

$$q = \varepsilon \cdot C_s \cdot \left( \frac{T_0}{100} \right)^4$$

$\varepsilon$  Emissionsgrad (bei schwarzem Körper  $\varepsilon = 1$ )  
 $C_s$  Strahlungskonstante des schwarzen Körpers (Stefan - Boltzmann - Konstante  $\sigma$ )  
 $C_s = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W / (m}^2\text{K}^4\text{)}$

Strahlungsaustausch zwischen zwei Flächen

$$q_{1 \rightarrow 2} = \varphi_{1 \rightarrow 2} \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot C_s \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

Die Einstrahlzahl  $\varphi_{1 \rightarrow 2}$  hängt von der gegenseitigen Stellung der Flächen zueinander ab.

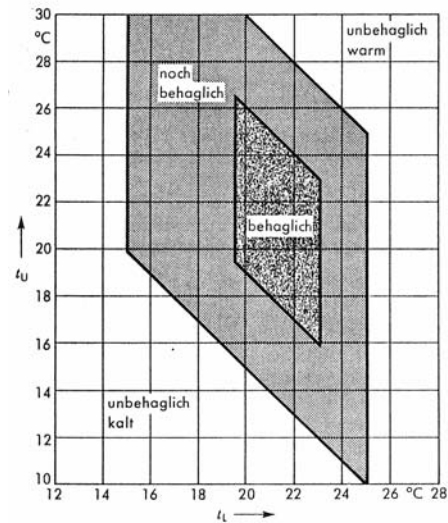


Bild 1.7 Behaglichkeitsfeld für das Wertepaar Raumlufttemperatur  $t_L$  /Raumumschließungsflächentemperatur  $t_U$  (gültig für relative Feuchte  $\phi$  von 30 bis 70% und Luftbewegung  $v$  von 0 bis 20 cm/s)

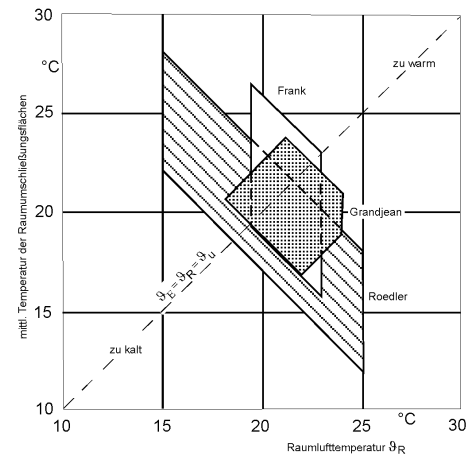


Bild 1.8 Behaglichkeitsfeld für Raumlufttemperatur und Temperatur der Raumumschließungsflächen

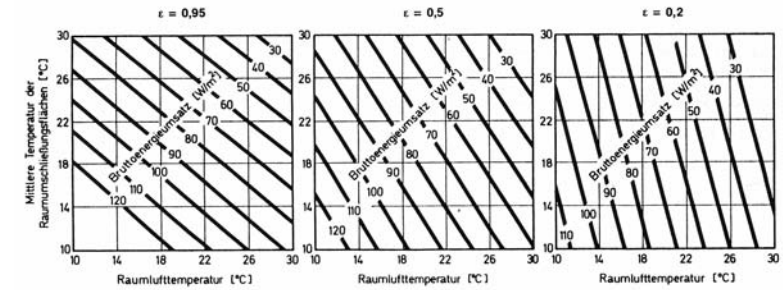


Bild 1.9 Zusammenstellung der zur thermischen Behaglichkeit notwendigen Werte für Raumluft- und mittlere Raumumschließungsflächentemperatur für verschiedene Bruttoenergieumsätze und Strahlungseigenschaften der Umschließungsflächen [6].

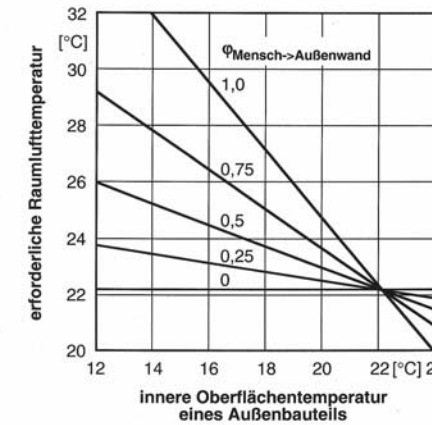


Bild 1.10 Abhängigkeit der zur Behaglichkeit erforderlichen Raumlufttemperatur von der inneren Oberflächentemperatur eines Außenbauteils. (Die Oberflächentemperatur aller Innenbauteile ist vereinfachend der jeweiligen Raumlufttemperatur gleichgesetzt).

Beliebig groß darf die Temperaturdifferenz zwischen Luft- und Raumumschließungsflächen jedoch nicht werden. Bei herkömmlichen Oberflächen (übliches Emissionsverhalten) darf diese Temperaturdifferenz

- nach Schmidt [7] : nicht größer als  $\pm 8$  K
- nach Recknagel, Sprenger, Hönnmann [3] : nicht größer als  $\pm 3$  K sein.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass im allgemeinen keine einheitlichen Raumumschließungsoberflächentemperaturen vorliegen, woraus unterschiedliche Wärmezu- und -abstrahlungen zum Menschen resultieren, wie aus folgendem Beispiel ersichtlich:

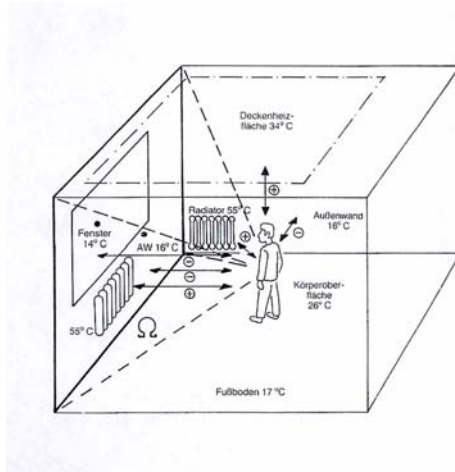


Bild 1.11 Abstrahlung des Menschen im Raum

Die Beeinträchtigung des Behaglichkeitsempfindens kann in Abhängigkeit der Differenz der Wärmestromdichten zu gegenüberliegenden Raumumschließungsflächen folgendermaßen abgeschätzt werden:

Tabelle 1.6 Seitenungleichheit der Wärmeabgabe (Wärmestromdichte) und thermisches Behaglichkeitsempfinden. Die Tafel gilt für Wärmeabgabeasymmetrie in allgemein waagerechter Richtung z gegenüberliegend. Seitlichem Raumumschließungsflächen hin und bei Raumlufttemperaturen von etwa 20 bis 24 °C.

Differenz der Wärmestromdichten zu gegenüberliegenden Raumumschließungsflächen	Unterschieds- Empfindung bei gegebener asymmetrischer Erwärmung
$\leq 25$	nicht
$\sim 25 - 40$	deutlich
$\sim 40 - 65$	unbehaglich
$\geq 65$	sehr unbehaglich

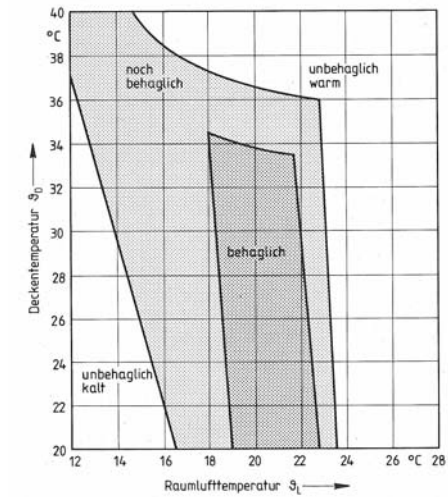


Bild 1.12 Behaglichkeitsfeld für das Wertepaar Raumlufttemperatur  $t_L$  / Deckentemperatur  $t_D$  (gültig für relative Feuchte  $\varphi$  von 30 bis 70% und Luftbewegung  $v$  von 0 bis 20 cm/s).

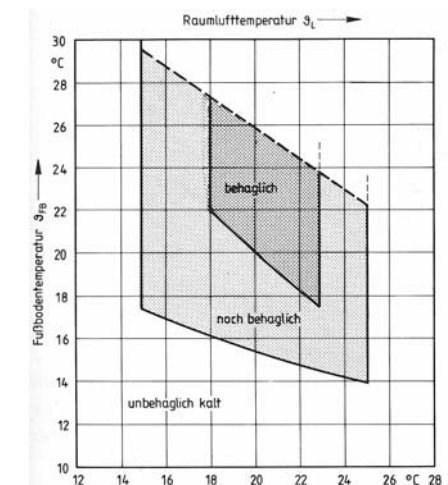


Bild 1.13 Behaglichkeitsfeld für das Wertepaar Raumlufttemperatur  $t_L$  / Fußbodentemperatur  $t_{FB}$  (gültig für relative Feuchte  $\varphi$  von 30 bis 70% und Luftbewegung  $v$  von 0 bis 20 cm/s).



Häufig wird auch eine sogenannte empfundene Raumtemperatur verwendet, welche sich aus dem arithmetischen Mittel der mittleren Raumumschließungs-oberflächentemperatur und der Lufttemperatur ergibt.

$$\vartheta_e = \frac{\vartheta_{Li} + \vartheta_{u,m}}{2}$$

mit

$$\vartheta_{u,m} = \frac{\sum A_i \cdot \vartheta_{oi}}{\sum A_i}$$

In DIN 1946 findet man die operative Temperatur  $\vartheta_o$

$$\vartheta_o = 0,5 (\vartheta_a + \vartheta_r)$$

$\vartheta_o$  örtliche operative Raumtemperatur in °C

$\vartheta_a$  örtliche Lufttemperatur in °C

$$\vartheta_r = \sum \varphi_K \cdot \vartheta_K$$

$\varphi_K$  Einstrahlzahl zwischen Raumpunkt und Fläche K

$\vartheta_K$  Temperatur der Fläche K

Bei Berührungen mit Bauteilen ist für die Empfindung der Bauteiltemperatur der Wärmeeindringkoeffizient maßgebend.

$$b = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} \quad [\text{J/m}^2\text{K s}^{0,5}]$$

Je kleiner b ist, desto wärmer fühlt sich ein Material an.

Tabelle 1.7 Zahlenwerte der Wärmeeindringzahl b.  $1 \text{ kJ/m}^2\text{Kh}^{0,5} = 60 \text{ kJ/m}^2\text{Ks}^{0,5}$

Stoff	Dichte kg/m³	b in kJ /m³ K s <sup>0,5</sup>	Stoff	Dichte kg/m³	b in kJ /m³ K s <sup>0,5</sup>
Glaswolle	100	0,055	menschl. Haut	800	1,0 ... 1,3
Kork	150	0,10	Beton	2200	1,5 ... 1,7
Holz (Fichte)	500	0,14	Glas	2500	1,25
Holzfaserplatten	300	0,18	Estrich	2000	1,50
Holzwohleplatten	350	0,23	Ziegelmauer	1800	1,2 ... 1,4
Gummi	1000	0,41 ... 0,55	Stahl	7800	14
Marmor	2600	2,50	Kupfer	8900	36

Boden fußwarm:  $b < 0,3 \text{ kJ/m}^2\text{K s}^{0,5}$

fußwarm:  $b < 1,4 \text{ kJ/m}^2\text{K s}^{0,5}$

### 1.7.3 Raumlufffeuchte

Die Behaglichkeit in einem Raum wird auch von den hygrischen Verhältnissen bestimmt. Zur Kennzeichnung dient die relative Raumlufffeuchte. Sie sollte aus Gründen

- des Schwülegefühls bei Daueraufenthalt im Temperaturbereich thermischer Behaglichkeit kleiner als ca. 60-70% sein;
- der Schädigung der Schleimhäute der Atmungsorgane und der damit verbundenen Infektionsanfälligkeit (Katarrhen) über 30-40 % liegen;
- der Geruchsbelästigung, die mit steigender Feuchte und Temperatur abnimmt, über ca. 50% betragen;
- der Abwehrfähigkeit der Haut gegenüber Mikroben bei 50% angesiedelt sein;
- des Staubgehalts der Luft einerseits möglichst über 70-80% liegen, weil hierdurch der Staubgehalt gedrückt wird und andererseits unter ca. 70% betragen, weil hierdurch die elektrostatische Aufladung in Räumen und damit die Staubhaftung an Gegenstandsflächen gefördert wird;
- der Vermeidung einer störenden elektrostatischen Aufladung mindestens 50% betragen;
- des für den Menschen und die Baukonstruktion nachteiligen Pilzwachstums möglichst gering sein.

Als hygienischer Kompromiss wird ein Bereich von 40-60 % für die relative Raumlufffeuchte empfohlen.

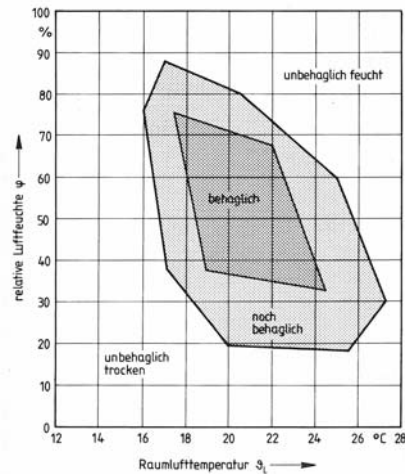


Bild 1.14 Behaglichkeitsfeld für das Wertepaar Raumlufttemperatur  $t_R$  / relative Feuchte  $\phi$  (gültig für Raumschließungsflächen-temperatur  $t_U$  von 19,5 bis 23 °C und Luftbewegung  $v$  von 0 bis 20 cm/s).

Bei raumluftechnischen Anlagen gilt nach DIN 1946-2:1994-01:

„Für die Behaglichkeit liegt die obere Grenze des Feuchtegehaltes der Luft bei 11,5 g Wasser je kg trockene Luft, wobei 65% relative Feuchte nicht überschritten werden sollen.“

Über die untere Grenze der relativen Luftfeuchte liegen keine gesicherten Erkenntnisse vor. Als Behaglichkeitsgrenze können – weitgehend unabhängig von der Lufttemperatur – 30% relative Feuchte gelten, gelegentliche Unterschreitungen bis auf 20% sind noch vertretbar.“

### 1.7.4 Luftbewegung

Die thermische Behaglichkeit der Personen wird im besonderen Maße von der Luftbewegung im Aufenthaltsbereich mitgeprägt. Die Grenzwerte der Luftgeschwindigkeit im Behaglichkeitsbereich sind abhängig von der Lufttemperatur und vom Turbulenzgrad der Strömung und ergeben sich nach DIN 1946-2 aus Bild 15.

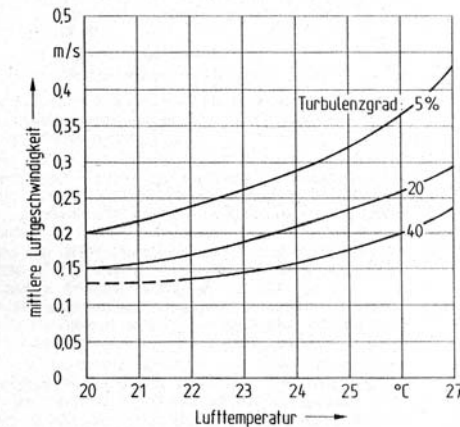


Bild 15: Werte von mittleren Luftgeschwindigkeiten als Funktion von Temperatur und Turbulenzgrad der Luft im Behaglichkeitsbereich (siehe auch ISO/DIS 7730). Die Werte gelten für Aktivitätsstufe I und einen Wärmedurchlasswiderstand der Kleidung von etwa 0,12 m² K/w. Bei höheren Aktivitätsstufen und Wärmedurchlasswiderständen können die Grenzkurven z.B. VDI 2083 Blatt 5 (z.Z. Entwurf) entnommen werden. Die Kurve für 40 % gilt auch für Turbulenzgrade > 40 %.

Bei operativen Raumtemperaturen zwischen 20 und 22 °C ist, außer bei Mischlüftung (siehe Bild 15, gestrichelter Bereich), die thermische Behaglichkeit noch gegeben, wenn die in Bild 15 angegebenen Luftgeschwindigkeiten nicht überschritten werden.

Der Turbulenzgrad  $T$  wird definiert wie folgt:

$$T = \frac{s_v}{v} 100$$

mit

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

und

$$s_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}$$

Hierin bedeuten:

T Turbulenzgrad

$s_v$  Standardabweichung der Momentanwerte der Luftgeschwindigkeit

$\bar{v}$  mittlere Luftgeschwindigkeit (zeitlicher Mittelwert der Luftgeschwindigkeit (siehe auch VDI 2080)

n Anzahl der Messpunkte

$v_i$  Momentanwert der Luftgeschwindigkeit

Die Kurven in Bild 15 stellen die Grenzwerte der zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten für die jeweiligen Turbulenzgradbereiche dar.

Eine minimale Luftbewegung ist für den notwendigen konvektiven Wärme- und Stofftransport erforderlich. Sie stellt sich durch feie Konvektion an einer Wärmequelle ein. Mindestwertekönnen deshalb nicht angegeben werden.

Wird der Wärmedurchlasswiderstand der Kleidung um 0,032 m<sup>2</sup> K/W oder die Aktivität um 10 W erhöht, darf die zulässige Luftgeschwindigkeit auf die um etwa 1 K erhöhte zugeordnete Lufttemperatur angehoben werden. Bei gleichbleibender Luftgeschwindigkeit darf die Lufttemperatur entsprechend vermindert werden.

Für die Geschwindigkeitsmessung ist ein richtungsunabhängiges Messgerät zu verwenden. Die Mittelungszeit beträgt mindestens 100 s (bei digitalen Messgeräten mindestens 100 Einzelmessungen) und die Ansprechzeit der Sonden, zu der 63% der Endwerte angezeigt werden (t<sub>63</sub>) soll kleiner als 0,2 s sein. Je Sekunde ist mindestens 1 Messwert zu erfassen. Die Luftgeschwindigkeit ist in den Höhen 0,1 1,1 und 1,7 m über dem Fußboden zu messen.

Ohne Messung wird der Turbulenzgrad mit 40 % angesetzt (untere Kurve in Bild 15).

Die Luftgeschwindigkeit fließt auch in die sog. Komfortformel nach Fanger ein.

$$PD = (34 - t_L) \cdot (v - 0,05)^{0,6223} (3,143 + 0,369 \cdot v \cdot Tu)$$

PD Unzufriedene in % (auch mit DR – Draft Risk bezeichnet)

$t_L$  Lufttemperatur (ggf. empfundene Temperatur)

$v = v_{50}$  mittlere Luftgeschwindigkeit in m/s

Tu Turbulenzgrad in %

Die Formel mit der Zahl 34 =  $t_s$  = Hauttemperatur gilt für 1 met und 0,8 clo. Für 1 met mit 1,4 clo oder 1,2 met mit 1,2 clo gilt  $t_s = 30$  °C. Für 1,2 met mit 1,4 clo oder 1 met mit 1,7 clo ist  $t_s = 29$  °C.

Das Model zur Voraussage des Grades der Beeinträchtigung durch Zugluft basiert auf Untersuchungen mit 150 Personen, die einer Lufttemperatur von 20 bis 26 °C, einer mittleren Luftgeschwindigkeit von 0,05 bis 0,4 m/s und einem Turbulenzgrad von 0 bis 70 % ausgesetzt waren. Das Model ist anwendbar auf Menschen mit einer leichten, hauptsächlich sitzenden Tätigkeit und einer nahezu neutralen thermischen Empfindlichkeit des ganzen Körpers.

### 1.8 PMV und PPD Indizes nach EN ISO 7730:1995

Das PMV (Predicted Mean Vote) ist eine Zahl, die den Durchschnittswert für die Klimabeurteilung durch eine große Personengruppe anhand folgender Beurteilungsskala vorhersagt:

-3	zu kalt
-2	kühl
-1	etwas kühl
0	neutral
+1	etwas warm
+2	warm
+3	zu warm

Durch Versuche mit ca. 1300 Testpersonen wurde eine Behaglichkeitsgleichung abgeleitet, mit deren Hilfe eine zu erwartende Beurteilung vorausberechnet werden kann. Diese lautet:

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028) \cdot \{(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3}$$

$$\{5733 - 6,99 (M - W) - p_a\} - 0,42$$

$$\cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_a)$$

$$- 0,0014 M (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl}$$

$$\cdot \{[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\}$$



Mit diesem PMV- Wert kann die Behaglichkeit über den „voraussichtlichen Prozentsatz der Unzufriedenen (PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied)“ entweder aus der Gleichung

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)}$$

oder aus folgendem Diagramm bestimmt werden.

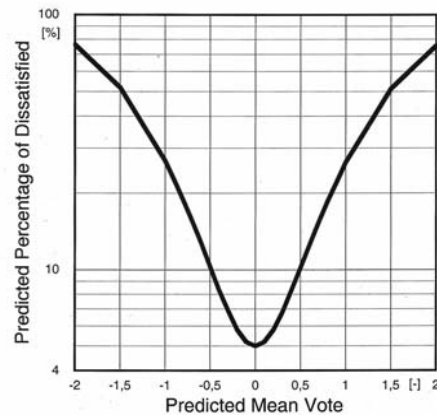


Bild 1.16 Beziehung zwischen PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) und PMV (Predicted Mean Vote)

Beispiel: Welchen Prozentsatz der Unzufriedenen erhält man für die Bedingungen:

Temperatur:  $t_i = t_e = 22 \text{ °C}$ ,

Energieumsatz: 1 met,

Luftgeschwindigkeit:  $v = 0,2 \text{ m/s}$ ,

Bekleidung:  $I = 0,75 \text{ clo}$

$PMV = -1,11$

=>  $PPD = 31 \text{ %}$

## 1.9 Literatur

- [1] Grandjean, E.: Regelung des Wärmehaushalts im menschlichen Körper. Regelungstechnische Praxis (1979), H. 3, S. 59-62.
- [2] Benzinger, T.H. und Meyer, E.: Definition der thermischen Behaglichkeit. IBP- Mitteilung 115, 13 (1986).
- [3] Recknagel, H., Sprenger, E. und Hönmann, W.: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. 63. Auflage. Oldenbourg- Verlag, München (1985).
- [4] Terhaag, L.: Thermische Behaglichkeit – Temperatur der Raumschließungsflächen – Luftfeuchte, Gesundes Wohnen, Tagungsbericht 26.4.1984
- [5] Frank, W.: Die Erfassung des Raumklimas mit Hilfe richtungsempfindlicher Frigometer. Ges.- Ing. 89 (1968), H. 10, S. 301-308.
- [6] Erhorn, H., Szermann, M. und Gertis, K.: Wie beeinflusst die Heizflächenanordnung im Raum die thermische Behaglichkeit und den Wärmeverlust? Bauphysik (1986), H. 5, S. 146-153
- [7] Schmidt, P.: Untersuchungen zum Einfluss des Heizsystems und zum Außenflächenzuschlag bei der Wärmebedarfsrechnung. Dissertation TU Berlin (1980). Forschungsbericht der VDI- Zeitschriften (1981), Reihe 6, Nr. 80.