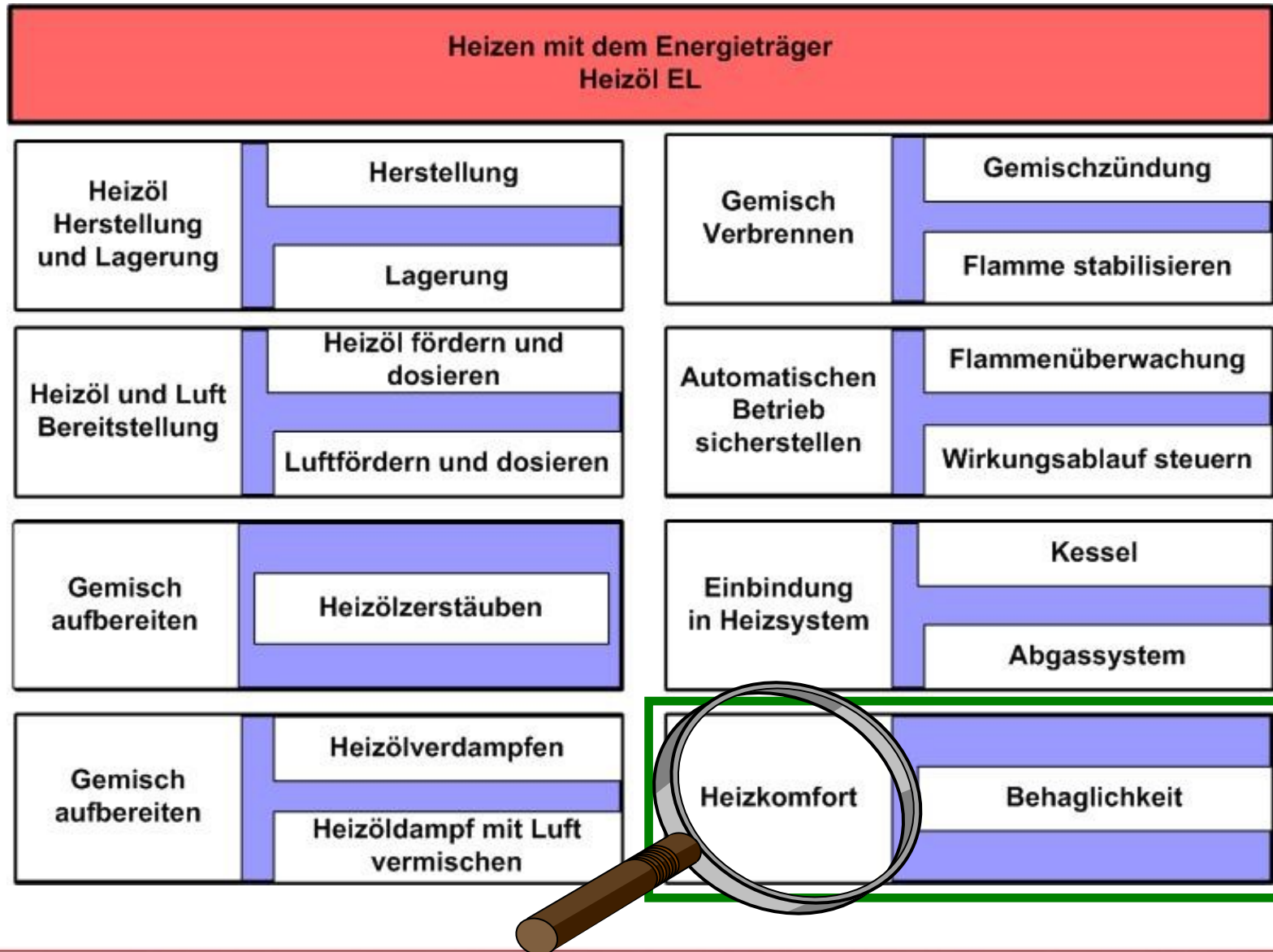


# Angewandte Thermofluiddynamik

Dr.-Ing. F. v. Issendorff

# Inhalte der Vorlesungen



# Aufgabe und Anforderung an die Heizungsanlagen

Aufgabe der Heizungsanlagen ist es, Aufenthalts-, und Arbeitsräumen unabhängig von meteorologischen Einflüssen ein entsprechendes Klima zu schaffen

## Anforderungen:

- Erzeugung von möglichst gleichmäßigen Empfindungstemperatur ca. 20 bis 22 °C mit  $\pm$  K
- Gute und trägheitsarme Regelbarkeit
- Möglichst geringe Schadstoffbelastung von Raumluft und Umwelt.  
infolge von Emission von Staub, schädlichen Gasen und Dämpfen  
Vermeidung von Geräuschen durch Pumpen, Ventilatoren
- Kostengünstige Anschaffung und wirtschaftlicher Betrieb
- Wartungsfreundlichkeit

# Aufgabe und Anforderung an Lüftung und Klimatechnik



Lüftungs- und Klimatechnik hat weitaus das größere Ziel, den Zustand der Raumluft hinsichtlich Reinheit, Temperatur und Feuchte innerhalb bestimmten Grenzen zu halten

grundsätzlich gelten die gleichen Anforderungen wie bei der Heizungstechnik  
Aber sie ergeben sich aus dem jeweiligen Einsatzbereich der Anlagen

- Komfortanlage (Schaffung behaglicher Raumzustände)
- Industrieanlagen (Herstellung des günstigen Raumklimas für die Fertigung oder Lagerung von Produkten)

Unter **Behaglichkeit** versteht man den Zustand des Wohlbefindens eines Menschen, bedingt durch äußere Einflüsse seiner Umgebung.

**Behaglichkeit** ist subjektiv:

Physiologische,

Psychologische

und intermediäre Einflüsse spielen eine Rolle.

**Definition nach Fanger:**

Thermische Behaglichkeit wird als jener 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.

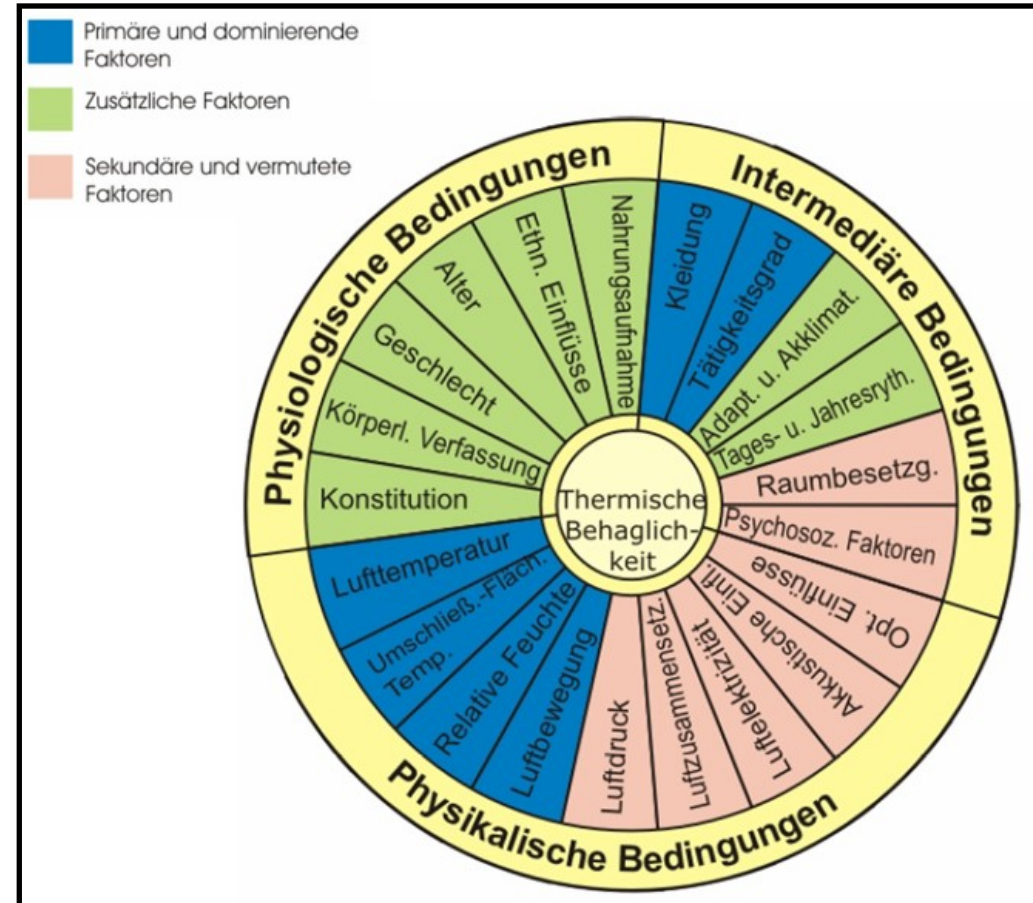
## Einflussfaktoren:

### Physikalisch

- Raumlufttemperatur
- Raumluftqualität (CO<sub>2</sub>-Gehalt)
- Luftfeuchtigkeit
- Luftgeschwindigkeit
- mittlere Wandflächentemperatur
- Luftzusammensetzung
- Akustische Einflüsse
- Optische Einflüsse

### Physiologisch

- Allg. körperliche Verfassung
- Alter
- Geschlecht
- Nahrungsaufnahme



### Behaglichkeitsbedingungen

*Thermische Behaglichkeit in Abhängigkeit von  
physiologischen, intermediären und physikalischen Bedingungen*

# Wärmehaushalt des Menschen

*Mittlere biophys. Daten des Menschen [Recknagel 2000]*

Masse [kg]	60..70	Grundumsatz (ruhend) [W]	70..80
Volumen [l]	60	Atemzüge [1/min]	16
Oberfläche (nackt) [m <sup>2</sup> ]	1,7..1,9	Atemluft [m <sup>3</sup> /h]	0,5
Körpertemperatur [°C]	37	Hauttemperatur [°C]	32..33
Puls [1/min]	70..80	Dauerleistung [W]	85
CO <sub>2</sub> aus Atemluft	10-20 l/h	CO <sub>2</sub> -Ausstoß [l/h]	10..20

## Behaglichkeitsgrenze:

**Zu kalt:** Verengung der Blutgefäße, Blasse und trockene Haut, Hautoberflächentemperatur sinkt unter 33 °C

**Zu Warm:** Weitung der Blutgefäße, Rötliche und feuchte Haut (Schwitzen), Hautoberflächentemperatur steigt (Stammhirntemperatur über 37 °C)

## Mittlere Hauttemperatur nach Fanger:

$$t_m = 35,7 - 0,0275 \dot{Q} / A$$

$\dot{Q}$  Wärmeezeugung in W

$A$  Oberfläche in m<sup>2</sup>

# Wärmeabgabe des Menschen

➤ durch **Festkörperleitung** von der Körperoberfläche an feste Gegenstände

➤ durch **Gasleitung** von der Körperoberfläche an die Luft

➤ durch **Konvektion** von der Körperoberfläche an die umgebende Luft

➤ durch **Wärmestrahlung** von der Körperoberfläche an Raumumschließungsflächen

➤ durch **Verdunstung** von Wasser (Feuchtigkeit) auf der Haut

➤ durch **Atmung**

➤ durch **Ausscheidungen**

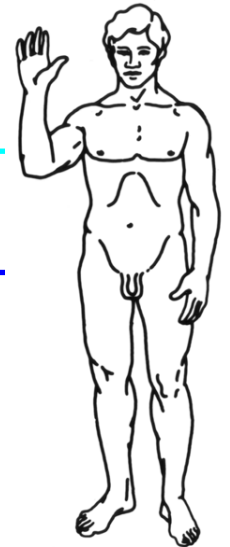
## Spezifische Wärmeabgabe des Menschen

➤ Durchschn. spez. Wärmeabgabe des Menschen (bekleidet):  $60 \text{ W/m}^2$

➤ Durchschn. spez. Wärmeabgabe des Kopfes: ca.  $115 \text{ W/m}^2$

➤ Durchschn. spez. Wärmeabgabe der Hände: ca.  $75 \text{ W/m}^2$

➤ Durchschn. spez. Wärmeabgabe der Fußsohlen: ca.  $145 \text{ W/m}^2$



Im Beharrungszustand gilt folgende Wärmebilanz:

$$P - P_M - (\dot{Q}_V + \dot{Q}_{A,lat}) - (\dot{Q}_{A,sens} + \dot{Q}_K + \dot{Q}_{Str}) - \dot{Q}_S - \dot{Q}_R = 0$$

$P$	Gesamtenergieumsatz aufgrund von Stoffwechselprozessen
$P_M$	Arbeitsleistungen
$\dot{Q}_{A,sens}, \dot{Q}_{A,lat}$	Wärmeabfuhr über die Atemluft durch Lufterwärmung (sens.) und Luftbefeuchtung (Lat.)
$\dot{Q}_V$	Wärmeabgabe des durch die Haut diffundierenden Wasserdampfes
$\dot{Q}_K$	Konvektive Wärmeabgabe
$\dot{Q}_{Str}$	Wärmeabgabe durch Strahlung
$\dot{Q}_S$	Wärmeabgabe infolge Schweißabsonderung
$\dot{Q}_R$	Wärmeabfuhr über Fußsohlen und Ausscheidungen

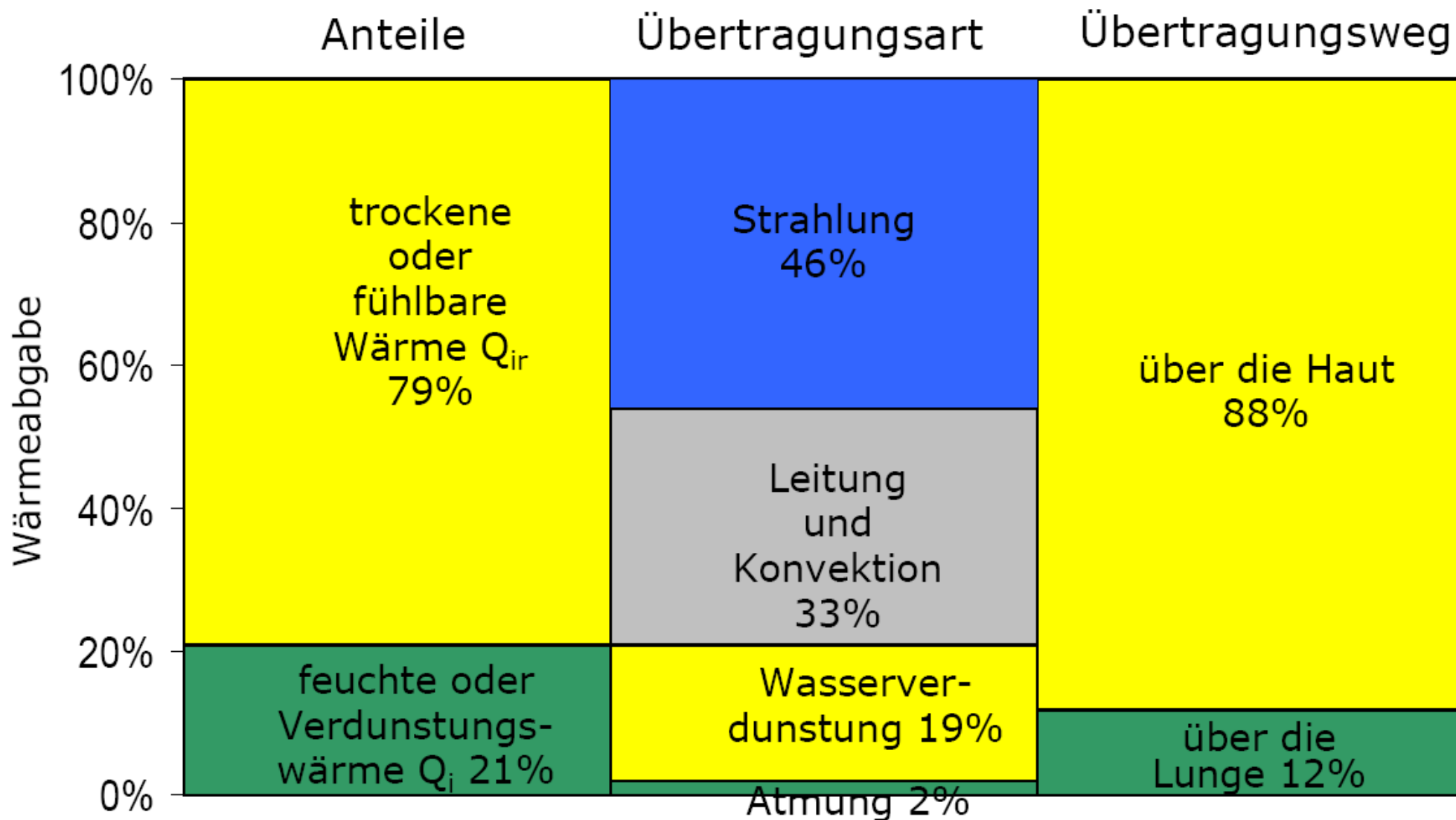
# Gesamtwärmeabgabe bei verschiedener Tätigkeit



Tätigkeit	Wärmeabgabe		Metabolic Rate
	[W/m <sup>2</sup> ]	[W]	[met]
schlafend	40	70	0,69
liegend	46	80	0,80
sitzend	58	100	1,00
stehend	70	125	1,21
leichte Büroarbeit	70	125	1,21
stehend leichte Tätigkeit	80	145	1,38
aktive Büroarbeit	85	150	1,47
langsames Gehen	125	210	2,16
schwere körperliche Tätigkeit	165	300	2,84
schnelles Gehen	235	400	4,05
schnelles Laufen	325	550	5,60
schwerste Arbeit	410	700	7,07

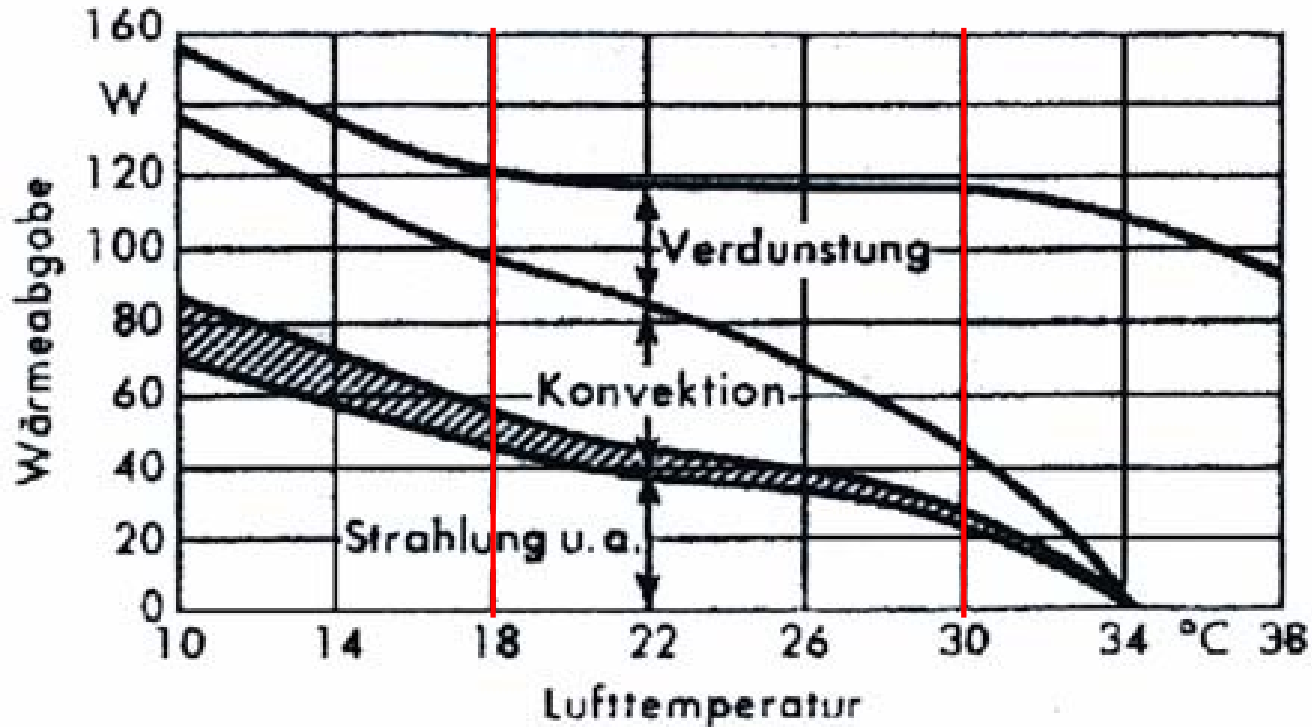
1 met = 58.2 [ W/ m<sup>2</sup>]

# Aufteilung der Wärmeabgabe des Menschen bei einer Raumlufttemperatur von 20°C



# Wärmeabgabe des Menschen

Wärmeabgabe des normal bekleideten Menschen ohne körperliche Tätigkeit bei ruhender Luft



Im Bereich 18-30 °C nahezu konstante Wärmeabgabe (ca. 120 W)

# effektive / empfundene Temperatur

$$\vartheta_{\text{eff}} = \frac{\alpha_K \cdot \vartheta_e + \alpha_S \cdot \vartheta_m}{\alpha_K + \alpha_S}$$

wobei

$\alpha_K$  Wärmeübergangszahl durch Konvektion in  $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

$\alpha_S$  Wärmeübergangszahl durch Strahlung in  $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

$\vartheta_e$  Raumtemperatur in K

$\vartheta_m$  Mittlere Strahlungstemperatur in K  $\vartheta_m = \frac{\sum F_i \cdot \vartheta_i}{\sum F_i}$

$\vartheta_{\text{eff}}$  empfundene effektive Temperatur in K

Für Raumtemperatur 20 °C gilt

$$\alpha_K \approx \alpha_S$$

$$\vartheta_{\text{eff}} = \frac{\vartheta_e + \vartheta_m}{2}$$

Ein passendes Raumklima für Alle ist nicht möglich. Ein Prozentsatz Unzufriedener bleibt.

Ziel: Prozentzahl unzufriedener Personen PPD-Index minimieren. Deswegen wird ein "akzeptables thermisches Raumklima" definiert:

Eine Umgebung wird als thermisch annehmbar empfunden wenn mindestens 80% der Personen, dies empfinden



DIN ISO 7730

Als Kriterien für die Erfüllung gelten:

- Tätigkeit
- Bekleidung
- Raumklima

# Der PMV-Index (PMV)

Zur Quantifizierung der menschlichen Temperaturrempfindung wird

eine 7 Punkte Skala verwendet:

<b>+3</b>	<b>+2</b>	<b>+1</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>	<b>-2</b>	<b>-3</b>
heiß	warm	leicht warm	neutral	leicht kühl	kühl	kalt

**PMV= predicted mean vote.** = Vorhergesagte mittlere Beurteilung  
**Der PMV -Index** gibt die, bei einer großen Zahl von Personen erwartete durchschnittliche Beurteilung eines Raumklimas anhand der 7-Punkte Skala wieder.

**Der PMV-Index wurde als Funktion:**

**der Raumklima Parameter**

(Luft- und Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte)

**des Aktivitätsniveau und**

**der Bekleidung bestimmt.**

# PPD: Predicted Percentage of Dissatisfied

## PPD = Predicted Percentage of Dissatisfied.

Vorhergesagter Prozentsatz der thermisch unzufriedenen Personen, d.h. derjenigen Personen, die ihre Unzufriedenheit durch die Werte  $\pm 2$  oder  $\pm 3$  auf der 7 -Punkte Skala dokumentiert haben.

### 7 Punkte Skala für PMV und die sich dabei ergebende PPD:

PMV:

<b>+3</b>	<b>+2</b>	<b>+1</b>	<b>0,5</b>	<b>0</b>	<b>-0,5</b>	<b>-1</b>	<b>-2</b>	<b>-3</b>
heiß	warm	leicht warm		neutral		leicht kühl	kühl	kalt

PPD:

<b>&gt;90%</b>	<b>75%</b>	<b>25%</b>	<b>10%</b>	<b>5%</b>	<b>10%</b>	<b>25%</b>	<b>75%</b>	<b>&gt;90%</b>
----------------	------------	------------	------------	-----------	------------	------------	------------	----------------

*Beispiel: Wenn eine Population die Behaglichkeit im Mittel als „leicht kühl“, also PMV = -1 beurteilt, so bleiben etwa PPD = 25% unzufrieden, d.h. sie haben mit  $\pm 2$  oder  $\pm 3$  abgestimmt.*

# Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)

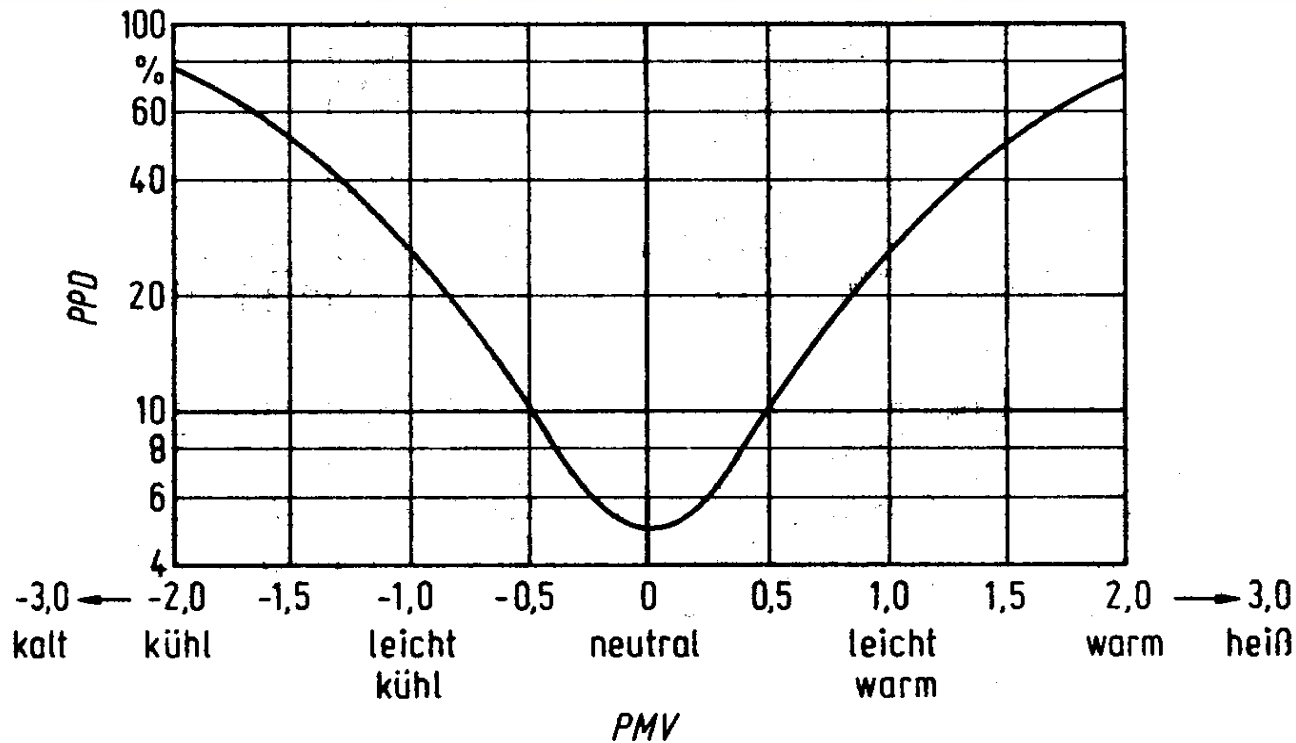


Tabelle C2-5. Verteilung der individuellen Beurteilung des thermischen Raumklimas von 1300 Probanden in Abhängigkeit von der mittleren Beurteilung

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

## Das Raumklima ist eine komplexe Größe

Die Einflussparameter stehen in Wechselwirkung

Begrenzter Komfortbereich

**Mensch:** Aktivitätsgrad

Bekleidung

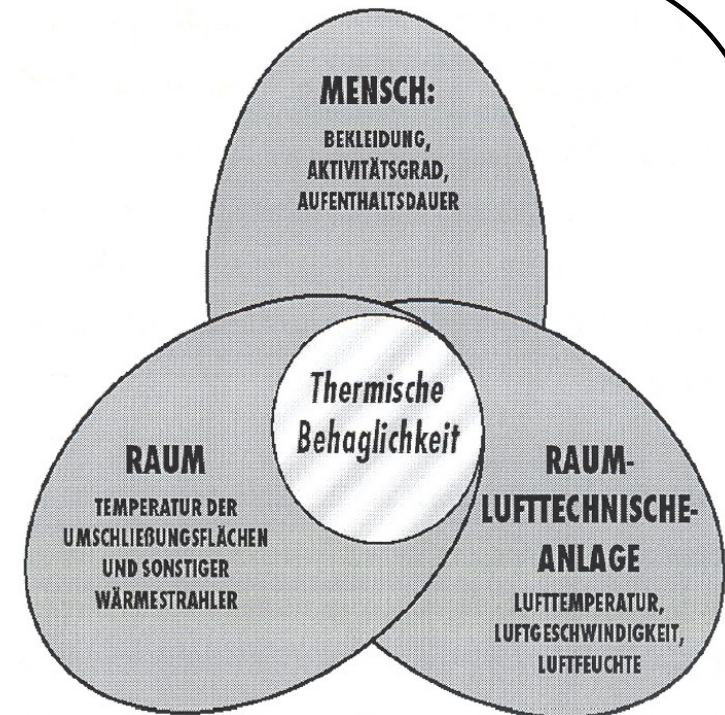
Geschlecht

Alter,

Gewöhnung und psychischer Zustand

**Raum:** (Temperatur der Raumumschließungsflächen, Akustik, Beleuchtung, ..)

**Raumlufttechnische (RLT) Anlage:** (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftbewegung, Geräuschpegel, Gleichmäßigkeit der Strömung und Temperaturfeldes)



## Wandeeinfluss auf Behaglichkeit ist hoch

Wärmeabgabe des Menschen:

Mittlere Strahlungstemperatur  $t_r$

$$\dot{Q} = (\alpha_k + \alpha_s) \cdot A \cdot (\vartheta_{Mensch} - \vartheta_{Raumluft})$$

$$t_r = \frac{\sum (A \cdot \vartheta)}{\sum A}$$

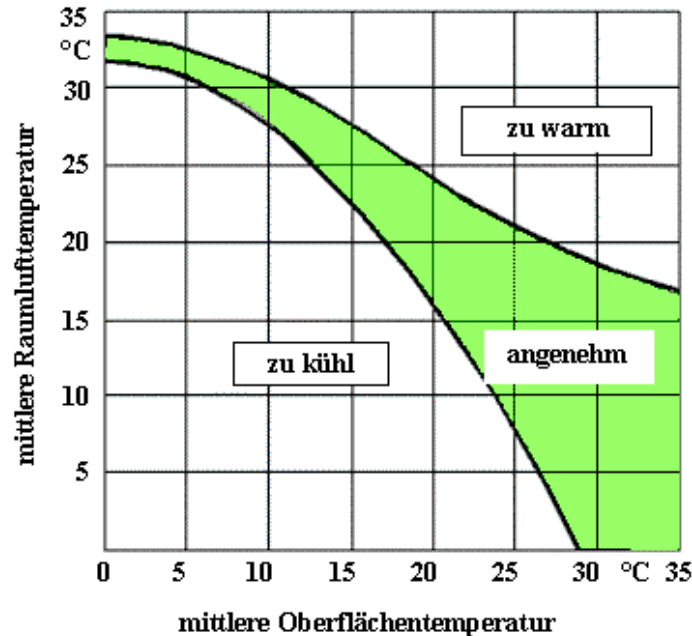
In Ruhe: Wandtemp. = Raumtemp., d.h.  $\alpha_k = \alpha_s$   
In Bewegung:  $\alpha_k > \alpha_s \rightarrow$  Wärmeabgabe steigt



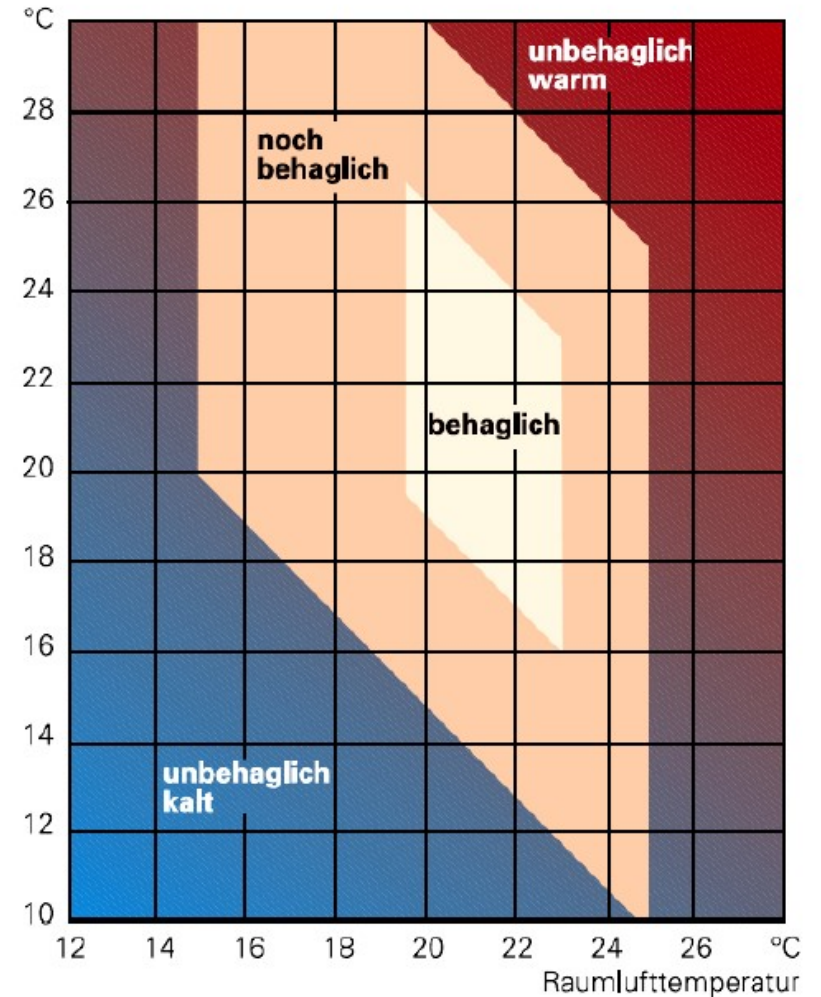
**Senkung der Wandtemperatur um 1 K  
entspricht Absenkung der Raumtemperatur um 1 K !**

# Temperatur der Umschließungsflächen

Je größer der Abstand von raumumschließenden Flächen, desto geringer ist der Einfluss ihrer berflächentemperaturen auf die thermische Behaglichkeit.



mittlere Oberflächentemperatur der raumschließenden Flächen



*sitzender Beschäftigung und mittlerer Aktivität und entsprechend angepasster Bekleidung  
(nach W. Frank: „Raumklima und thermische Behaglichkeit“, Berichte aus der Bauforschung, Heft 104, Berlin 1975)*

## *Luftbewegung bei niedrigen Temperaturen wird als Zug bezeichnet*

- ✓ Zugluft: häufiges Problem bei Lüftungs- und Klimaanlage
- ✓ Luftbewegung jedoch notwendig für Wärme- und Stofftransport
- ✓ Keine stabile Luftströmung in Räumen, aufgrund von Bewegungen oder Thermik über Personen
- ✓ Die Grenzwerte für die Raumluftgeschwindigkeit sind nach DIN 1946-2 festgelegt in Abhängigkeit von Temperatur und Turbulenzgrad

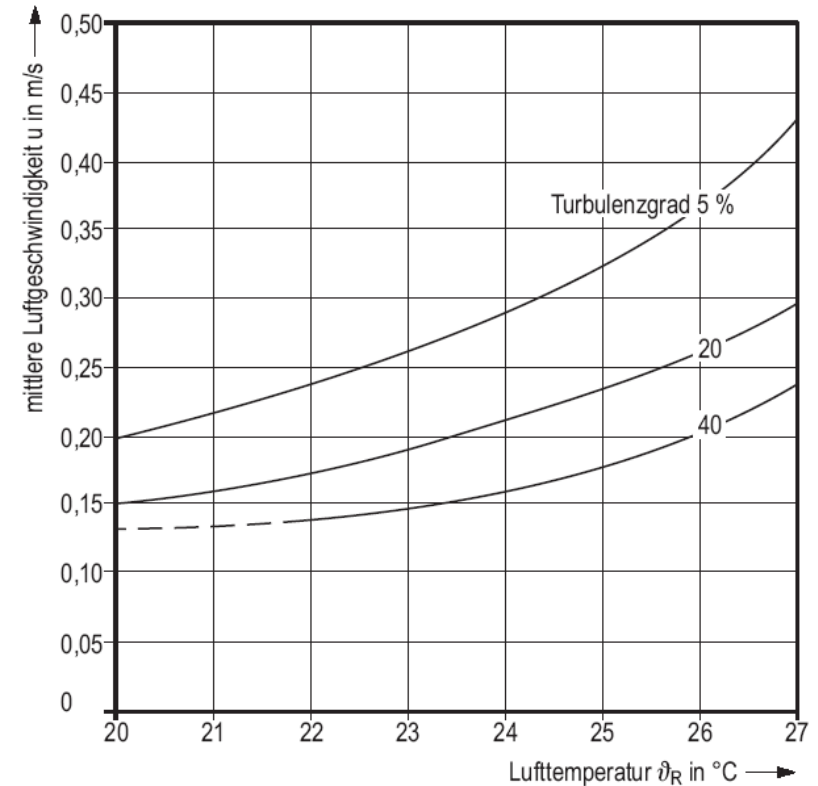
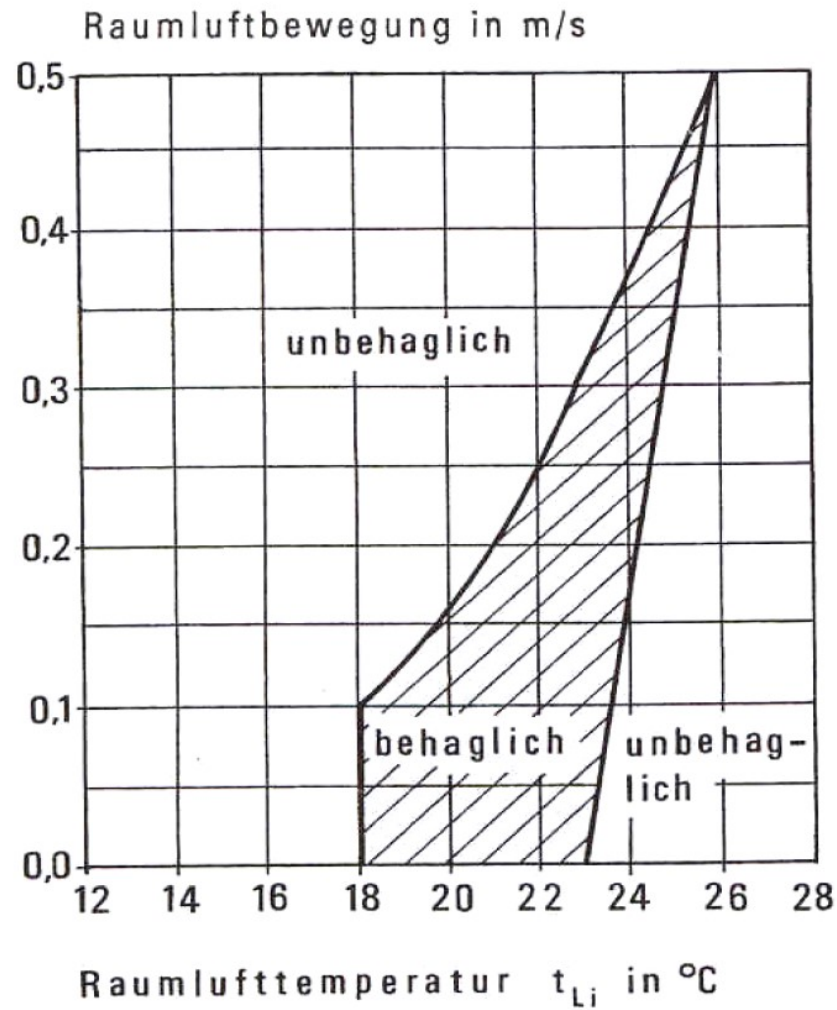


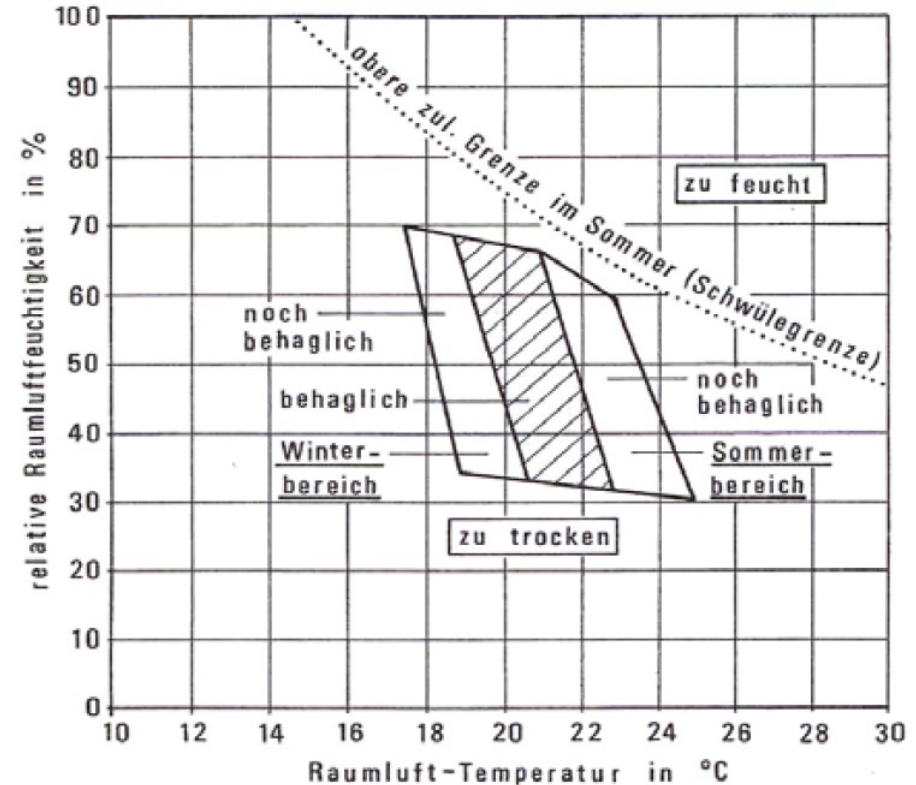
Bild 1: Luftgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Temperatur und Turbulenzgrad der Luft im Behaglichkeitsbereich nach DIN 1946, Teil 2

# Luftgeschwindigkeit



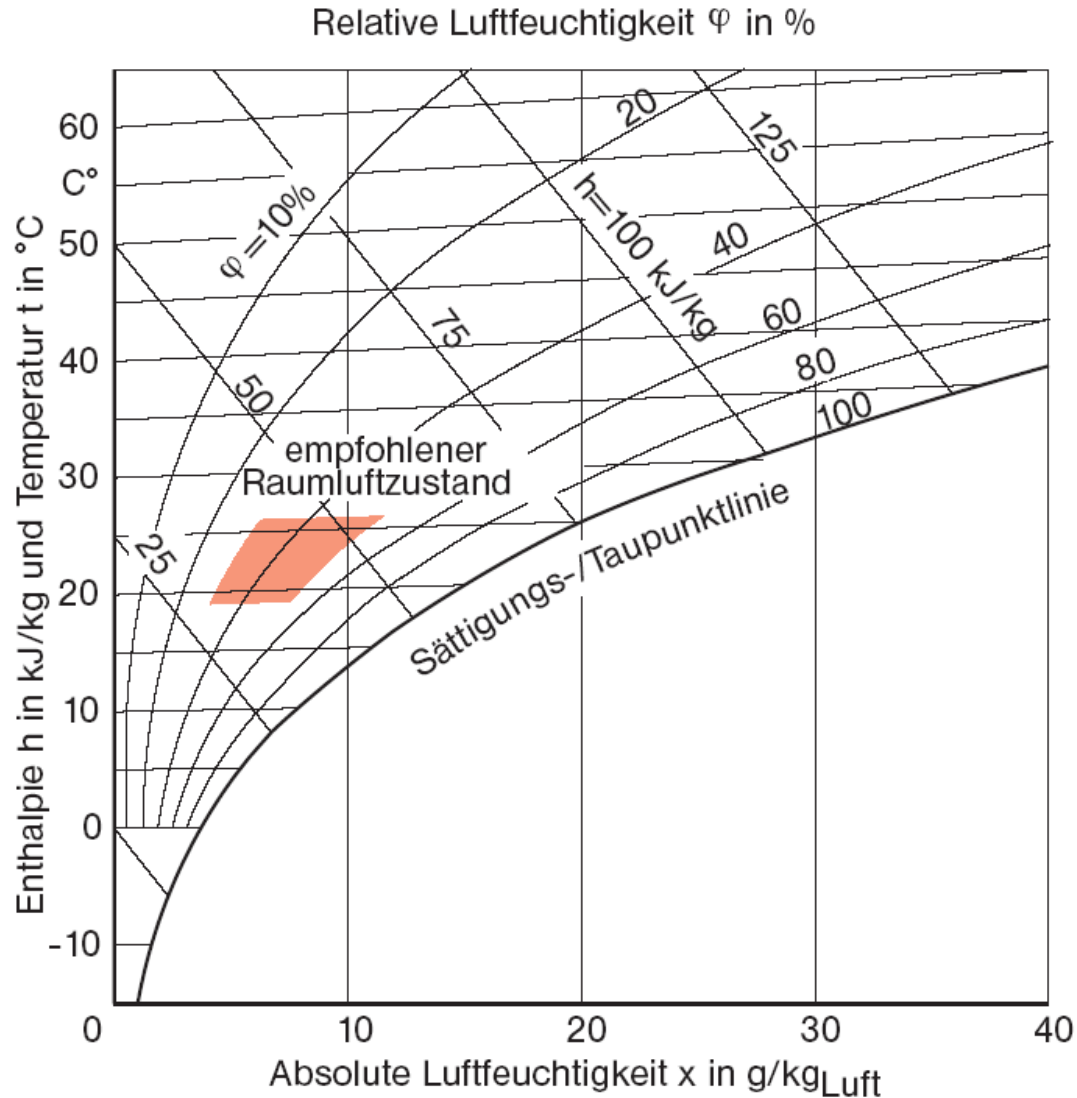
# Luftfeuchte

- ✓ Um 20°C spielt die Wärmeabgabe durch Verdunstung eine untergeordnete Rolle
- ✓ Feuchtigkeit <35 % führt zu Austrocknung und Staubbildung
- ✓ Bei höheren Temperaturen steigt die Wärmeabgabe durch Verdunstung
- ✓ Schwitzen setzt bei niedriger Luftfeuchtigkeit später ein
- ✓ Zu hohe Luftfeuchtigkeit kann zu Schimmelpilzbildung und Gerüchen führen



**Tabellenhandbuch zum Wärme- und Feuchteschutz von Harald Buss, Mai 2002**

# Relative Feuchte



*Zusammenhang zwischen Raumluftfeuchtigkeit und Raumtemperatur*

**Bekleidung als Wärmewiderstand** zwischen Haut und Umgebung :

In die Berechnung geht die gesamte bekleidete und unbedeckte Körperoberfläche ein. Flächenbezogener Wärmewiderstand wird gemessen in **[m<sup>2</sup>K / W]**

Die **Bezugsgröße** :

unbedeckte Person: 0 clo

typische Innenraumbekleidung:

im Sommer: 0,5 clo

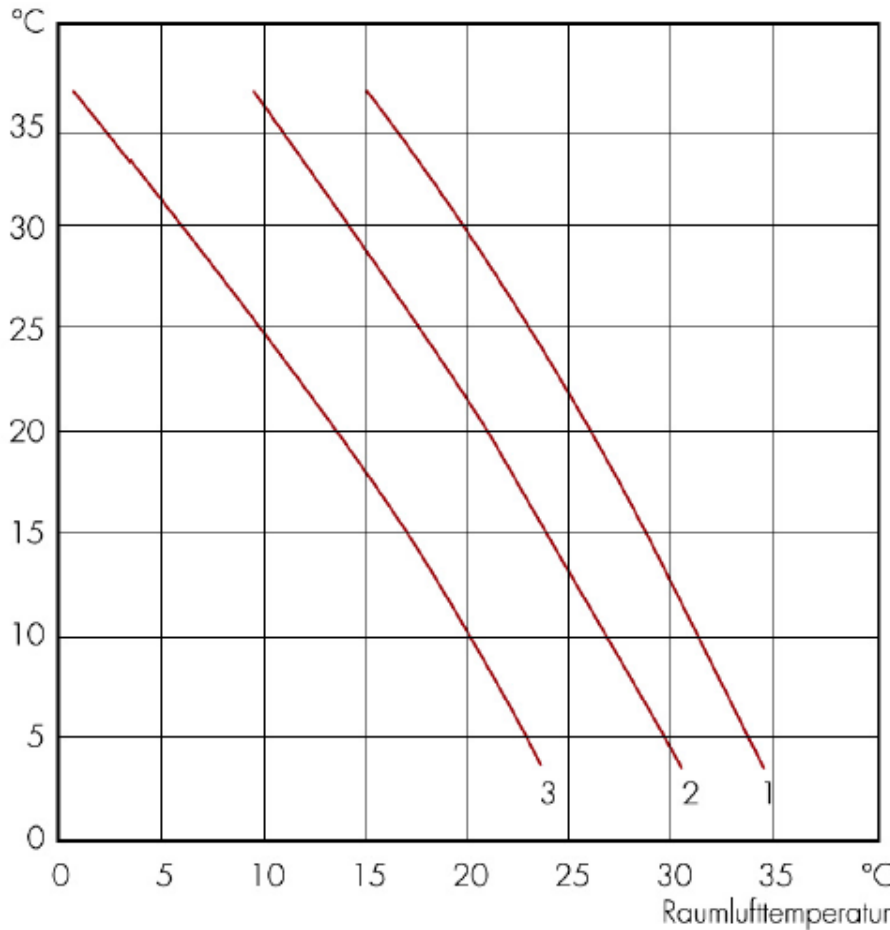
im Winter: 1,0 clo

$$1 \text{ clo} = 0.155 \text{ [m}^2\text{K / W]}$$

$$1/(1 \text{ clo}) = \text{ca. } 6.5 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

# Einfluss der Aktivität und Bekleidung

mittlere Oberflächentemperatur  
der raumumschließenden Flächen



mit mittlerer Bekleidung, Hemd und Anzug (Kurve 1), benötigt man bei einer mittleren Oberflächentemperatur der Raumumschließenden Flächen von 20 °C eine Raumlufttemperatur von 26 °C, um sich behaglich zu fühlen.

Bei mittlerer Aktivität und leichter Bekleidung, z. B. kurzärmligem Hemd (Kurve 2), genügt eine Raumlufttemperatur von 21 °C.

Bei mittlerer Aktivität und mittlerer Bekleidung (Kurve 3) reicht sogar eine Raumlufttemperatur von nur 13 °C aus.

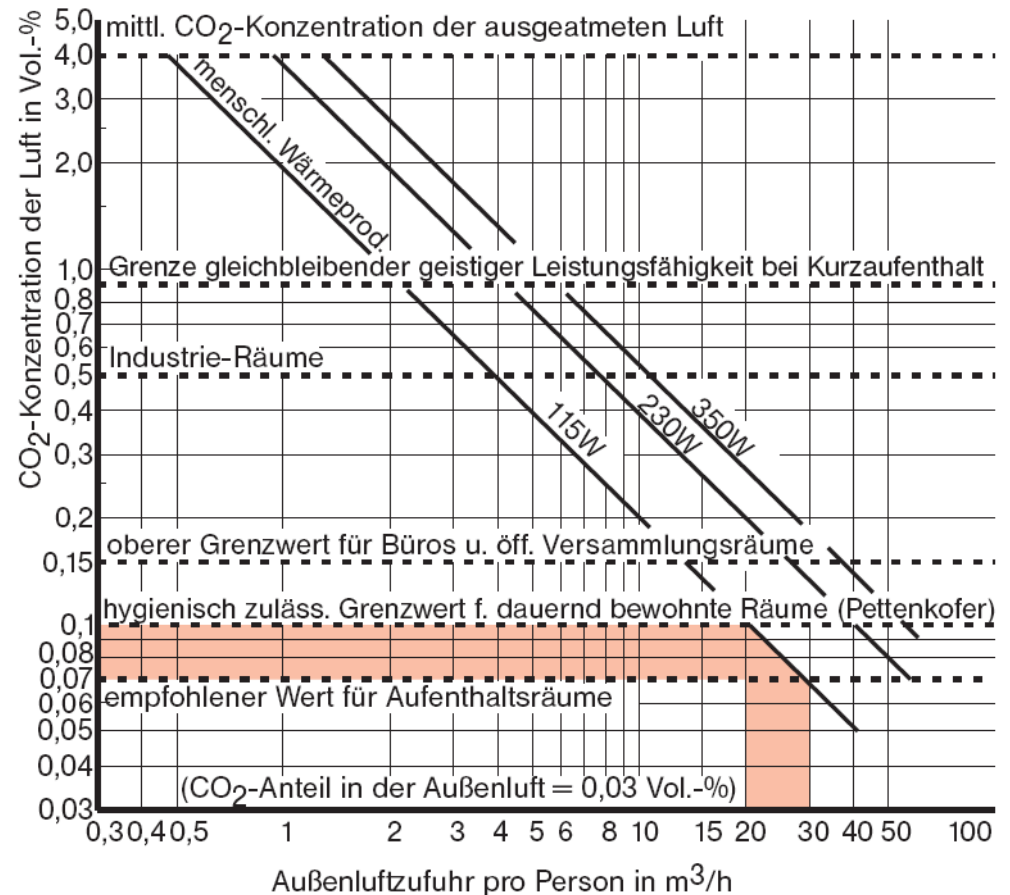
**Einfluss von Aktivität und Bekleidung auf die Behaglichkeit (nach P. O. Fanger: *Thermal Comfort*, New York 1973)**

# Luftreinheit

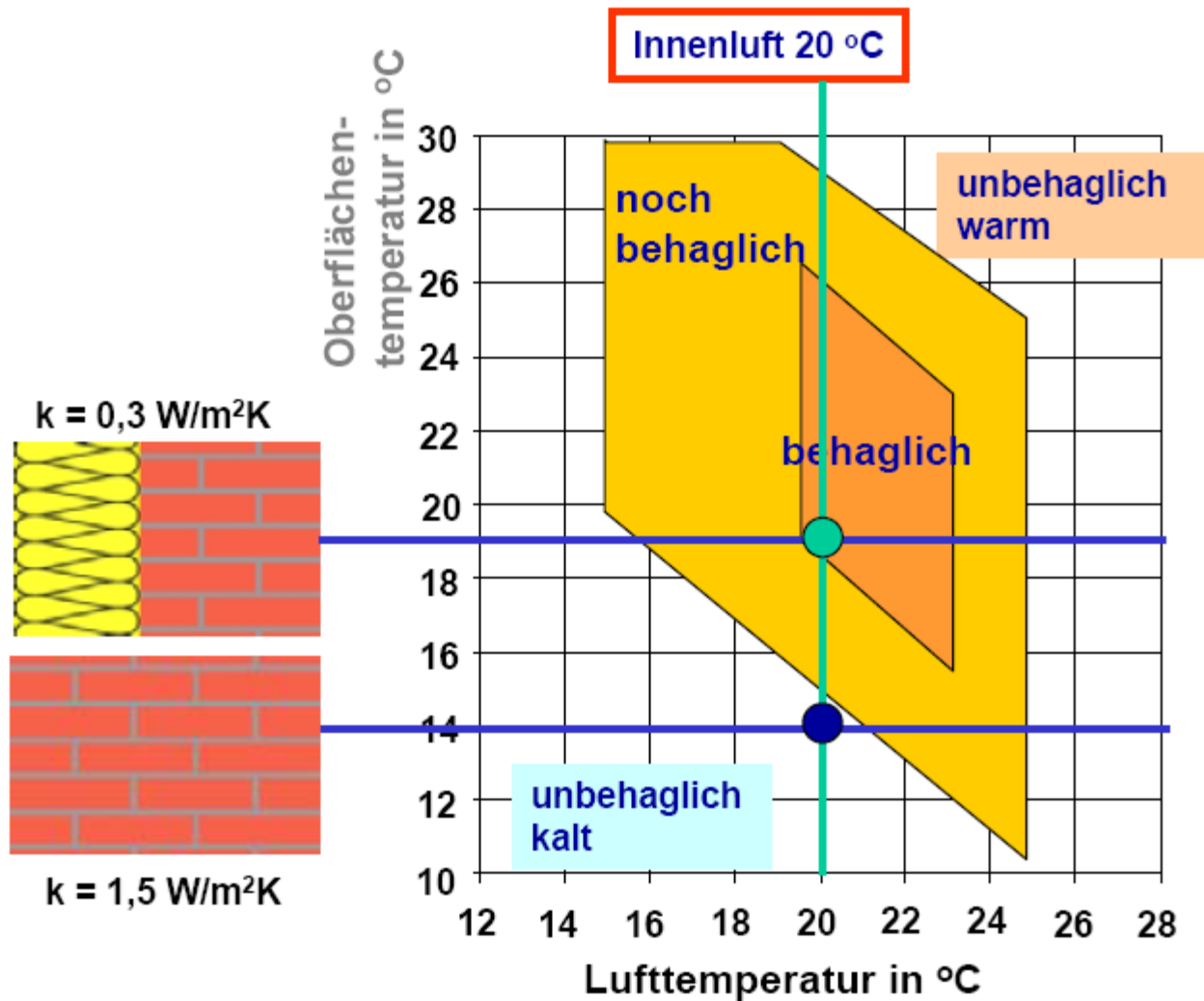
CO<sub>2</sub>-Gehalt kann Maßstab für gasförmige Luftverunreinigungen (Gerüche)

➔ Pettenkofer-Zahl: CO<sub>2</sub>-Konzentration < 1000 ppm in Raumluft

Sogenannte "schlechte Luft" wird nicht durch einen Mangel an Sauerstoff hervorgerufen, sondern in erster Linie durch eine überhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration. Diese Erkenntnis geht schon auf **Max von Pettenkofer im Jahre 1858 zurück.**

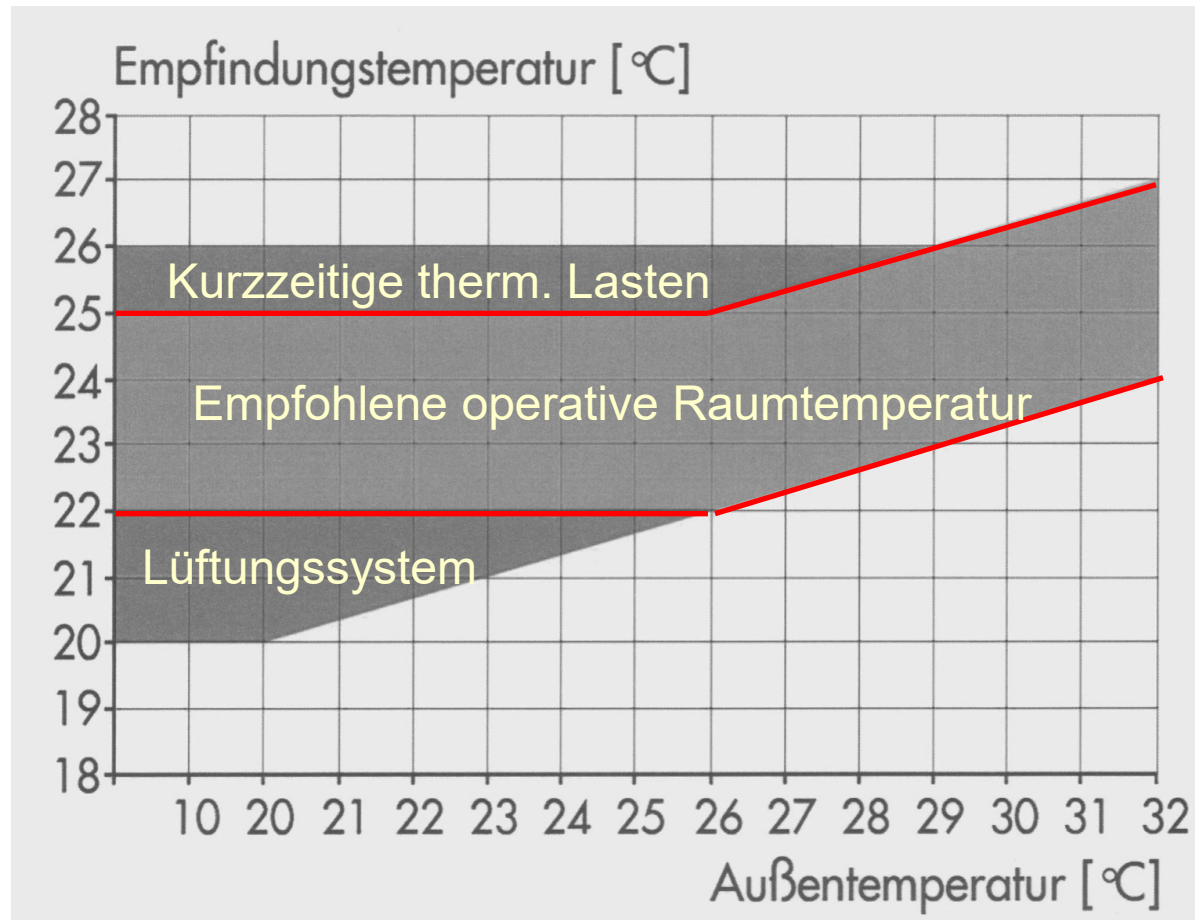


# Einfluss der Wärmedämmung auf der Behaglichkeit



# Raumlufttemperatur

Zulässigkeitsbereich der Raumtemperatur nach DIN 1946 für die Auslegung von raumluftechnischen Anlagen. Leichte Tätigkeit im sitzen oder stehen, leichte bis mittlere Bekleidung



- Raumlufttemperatur in Kopfhöhe und 1m Wandabstand 20-22°C, örtlich und zeitlich möglichst konstant
- Mittlere Wandtemperatur möglichst ähnlich
- Bei Verringerung der Wandtemperatur muss die Raumtemperatur angehoben werden und umgekehrt
- Luftfeuchtigkeit zw. 35 und 70% (20-22°C Raumtemperatur)
- mit steigender Raumtemperatur sollte die Luftfeuchtigkeit sinken
- Unsymmetrische Wärmezufuhr durch Strahlung der Wände (Strahlungszug), bereits 20..30 W/m<sup>2</sup> sind deutlich spürbar

Unter den Bedingungen kann mit einer Zufriedenheitsrate von 80% gerechnet werden