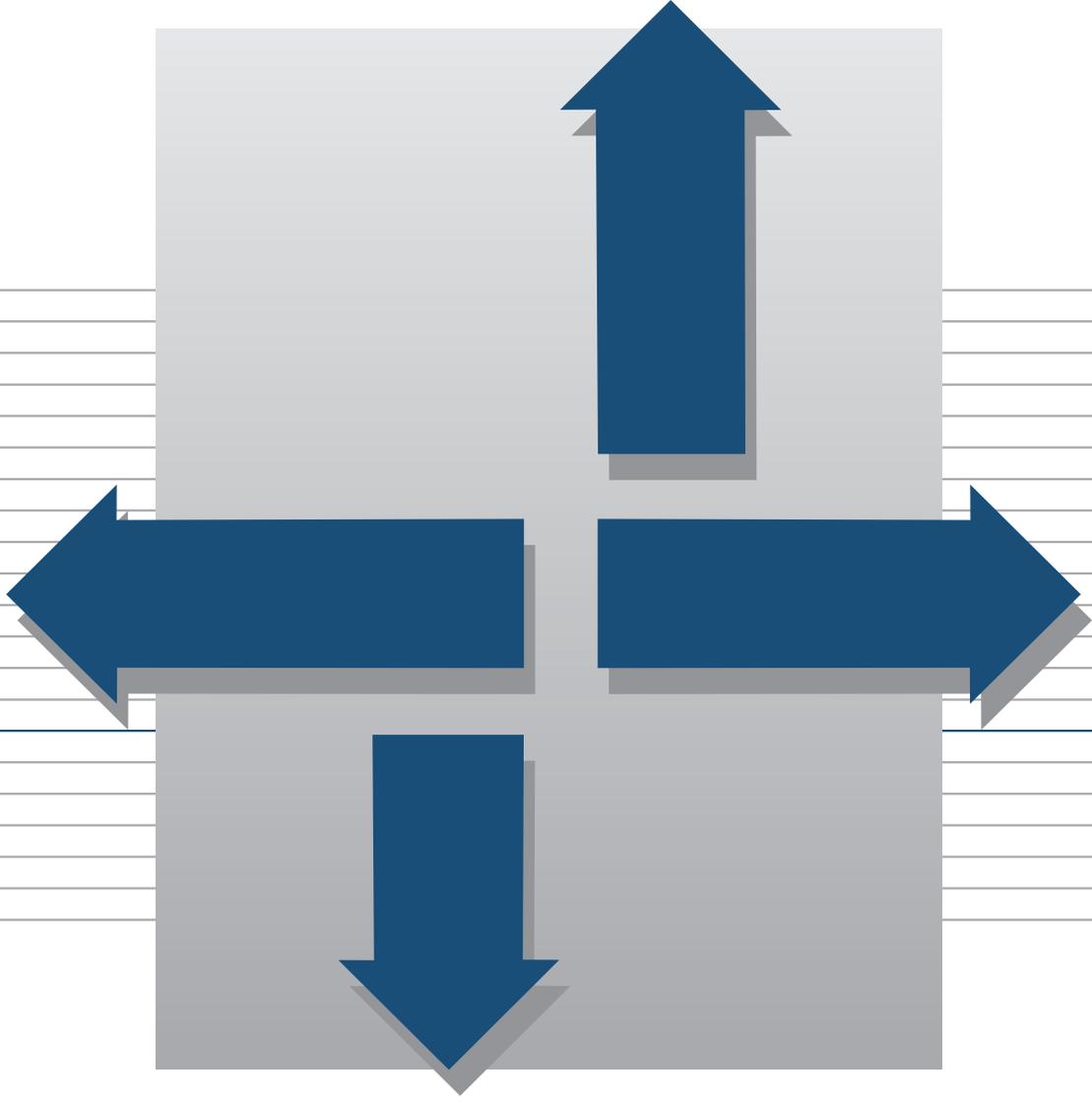


## Technischer Bericht



**Auslegungskriterien  
für thermische Behaglichkeit**

## Kategorien der thermischen Behaglichkeit

Hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit in **Komfortanlagen** definiert die europäische Norm EN ISO 7730 drei Kategorien des Raumklimas, bei denen ein bestimmter Prozentsatz der Unzufriedenen (PPD) erwartungsgemäß unterschritten wird. Dabei wird berücksichtigt, dass die Unzufriedenheit sowohl wegen zu hoher Raumluftgeschwindigkeiten (Zugluftrisiko DR in %) als auch wegen zu hohem vertikalen Temperaturunterschied, zu hoher Strahlungstemperatur-Asymmetrie und unangenehmer Fußbodentemperaturen auftreten kann. Die drei Kategorien sind in **Tabelle 1** dargestellt.

Kategorie	PPD %	DR %	% Unzufriedener mit		
			vertikalem Lufttemperaturunterschied	Strahlungstemperatur-Asymmetrie	Bodentemperatur
A	< 6	< 10	< 3	< 5	< 10
B	< 10	< 20	< 5	< 5	< 10
C	< 15	< 30	< 10	< 10	< 15

Tabelle 1: Drei Kategorien des Raumklimas

So ist in der Kategorie A zu erwarten, dass weniger als 6% der Personen mit der thermischen Behaglichkeit unzufrieden sind. Das wird dann erfüllt, wenn das Zugluftrisiko DR bei < 10% liegt, die Unzufriedenheit mit dem vertikalen Lufttemperaturunterschied < 3%, mit der Strahlungstemperatur-Asymmetrie < 5% und mit der Bodentemperatur < 10% beträgt. Alle vier Kriterien sollten für jede Kategorie zugleich erfüllt werden. Welche Kategorie einzuhalten ist, wird zwischen dem Planer und dem Auftraggeber vereinbart.

## Zugluftrisiko bzw. zulässige Raumluftgeschwindigkeiten

Das Zugluftrisiko hängt von der Raumluftgeschwindigkeit, dem Turbulenzgrad und der Raumtemperatur ab. Der Zusammenhang ist in der EN ISO 7730 für Raumtemperaturen 20 bis 26 °C und für die Aktivitätsstufe I mathematisch beschrieben und im **Bild 1** graphisch dargestellt. Für höhere Raumtemperaturen und Aktivitätsstufe II wurde der Zusammenhang anhand weiterer Vorgaben der EN ISO 7730 und eigener Erfahrungen, die sie sich in der Praxis gut bewährt haben, extrapoliert.

Im **Bild 1** sind folgende Turbulenzgrade zugrunde gelegt worden:

Turbulente Mischlüftung  $T_u = 40\%$   
 Quell-Lüftung  $T_u = 25\%$

Beispiele für einzelne Aktivitätsstufen sind:

- Aktivitätsstufe I: Büros, Schulen, Theater, (1,2 met) Tagungsräume
- Aktivitätsstufe II: Labors, Messehallen, Verkaufsräume, Museen, Sporthallen (1,6 met)

Ist z.B. die Kategorie A mit dem DR-Wert < 10% festgelegt, so darf bei einer Raumlufttemperatur von 26°C und Aktivitätsstufe I die Raumluftgeschwindigkeit bei der turbulenten Mischlüftung max. 0,15 m/s, bei der Quell-Lüftung max. 0,17 m/s betragen. Ist dagegen die Kategorie B einzuhalten (mit DR < 20%), so darf unter gleichen Bedingungen die Raumluftgeschwindigkeit bei der turbulenten Mischlüftung 0,25 m/s, bei der Quell-Lüftung max. 0,30 m/s betragen. Handelt es sich um die Aktivitätsstufe II, so betragen die Grenzwerte für 26°C und Kategorie A 0,21 m/s bei der turbulenten Mischlüftung und 0,24 m/s bei der Quell-Lüftung.

Maximale Raumluftgeschwindigkeiten für die Kategorie C (DR < 30%) werden hier nicht angegeben, da diese Kategorie in Komfortanlagen selten anzutreffen sein wird.

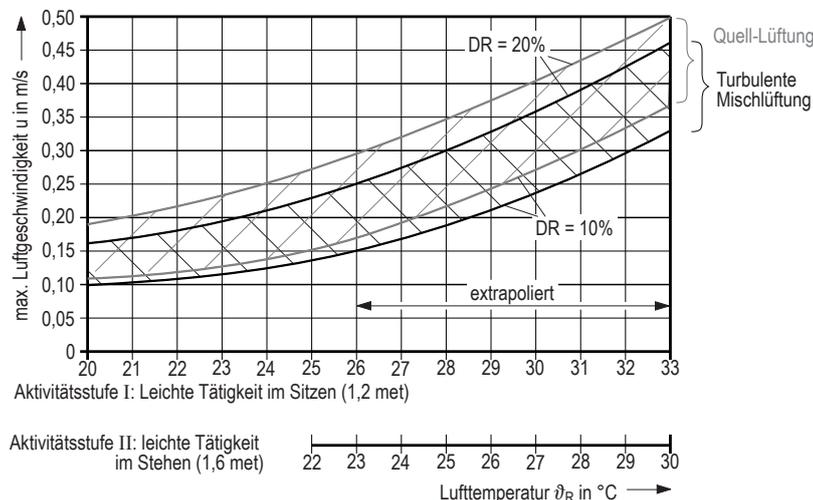


Bild 1: Zulässiger Bereich der maximalen Raumluftgeschwindigkeiten nach EN ISO 7730

Für **Industrieanlagen** sind die zulässigen Raumluftgeschwindigkeiten in VDI 3802, Dezember 1998 (Raumlufttechnische Anlagen für Fertigungsstätten) vorgegeben. Hier sind nach **Bild 2** die zulässigen mittleren Raumluftgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Aktivitätsstufe und der Bekleidung, jedoch unabhängig vom Turbulenzgrad definiert. Die Art der Bekleidung bzw. deren Wärmeleitwiderstand wird in **clo** ausgedrückt.

Es bedeuten:

0,6 clo: leichte Arbeitskleidung (Hemd)

0,9 clo: normale Arbeitskleidung

1,3 clo: schwere Arbeitskleidung (Schutzjacke)

In Industriehallen kommen noch die Aktivitätsstufen III und IV hinzu:

Aktivitätsstufe III: 2 met (mäßig schwere Tätigkeit im Stehen).

Aktivitätsstufe IV: 2,5 met (schwere Tätigkeit im Stehen).

Beispielsweise sind in einer Industriehalle bei

– Raumlufttemperatur 26°C

– Aktivitätsstufe III (2 met)

– Bekleidung 0,9 clo

Raumluftgeschwindigkeiten bis max. 0,41 m/s zulässig.

Bei einer Raumtemperatur von 28 °C – und sonst gleichen Bedingungen – dürfen die Raumluftgeschwindigkeiten max. 0,45 m/s betragen.

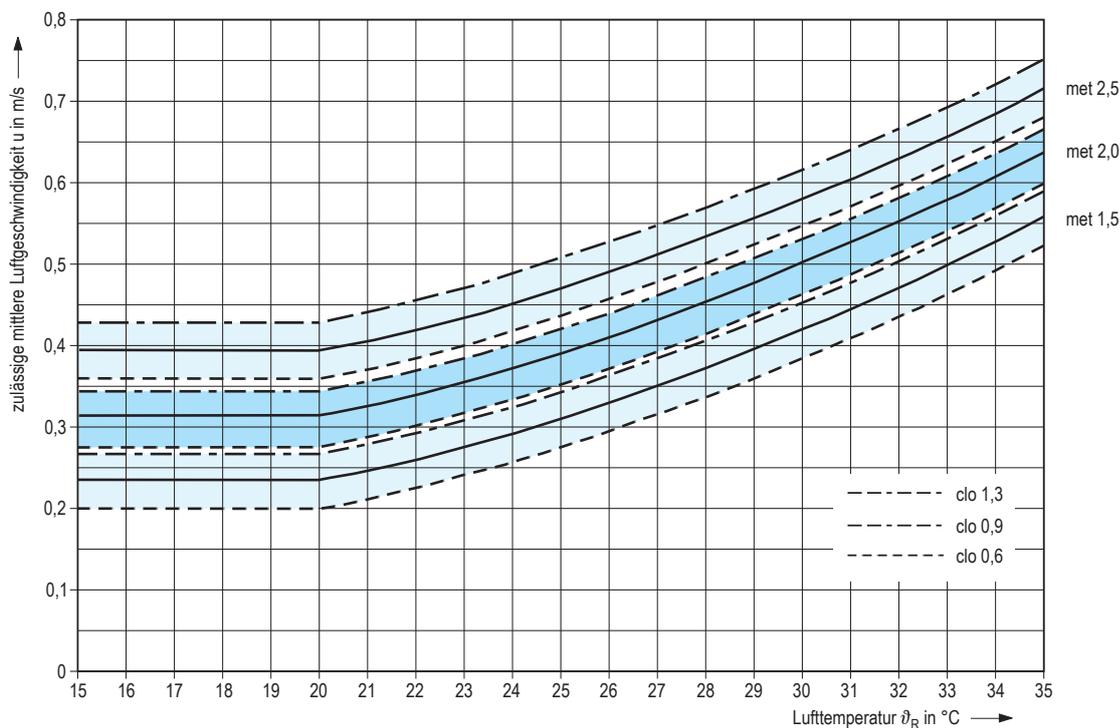


Bild 2: Zulässige mittlere Raumluftgeschwindigkeiten in Fertigungsstätten nach VDI 3802, Dezember 1998

## Einhaltung der zulässigen Raumluftgeschwindigkeiten

### Turbulente Mischlüftung

Die Einhaltung der zulässigen Raumluftgeschwindigkeiten gemäß Bild 1 und 2 richtet sich im Wesentlichen nach folgenden physikalischen Größen:

1. Maximale Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Raumluft  $\Delta\vartheta$  im Kühlfall.
2. Spezifischer Luft-Volumenstrom pro  $m^2$  Bodenfläche.

Für Luftdurchlässe der turbulenten Mischlüftung von KRANTZ KOMponenten gelten folgende Grenzkriterien:

#### 1. Maximale Temperaturdifferenz

für Luftdurchlässe, die eine **dreidimensionale** diffuse Raumluftströmung ohne Raumluftwalzen erzeugen:

Deckendrallauslass Radialauslass Radialer Lamellenauslass Fächerauslass	$\Delta\vartheta_{\max} = - 12 \text{ K}$
Induktivauslass Opticlean Schwenkbarer Weitstrahlauslass	$\Delta\vartheta_{\max} = - 10 \text{ K}$

für Luftdurchlässe, die eine **zweidimensionale** diffuse Raumluftströmung mit Raumluftwalzen erzeugen:

Linearer Wirbelauslass Wandschlitzauslass Weitwurfdüse	$\Delta\vartheta_{\max} = - 8 \text{ K}$
Breitfächerauslass Brüstungsauslass	$\Delta\vartheta_{\max} = - 10 \text{ K}$

#### 2. Maximaler spezifischer Luft-Volumenstrom

Nach Bild 3 für Luftdurchlässe, die eine **dreidimensionale** diffuse Raumluftströmung erzeugen.

Nach Bild 4 für Luftdurchlässe, die eine **zweidimensionale** diffuse Raumluftströmung erzeugen.

Der maximale spezifische Luft-Volumenstrom ist abhängig von der maximal zulässigen Raumluftgeschwindigkeit und der Ausblashöhe abzulesen. Die zulässige Raumluftgeschwindigkeit wird dabei

- entweder dem Bild 1,
- oder den landesspezifischen Richtlinien in außereuropäischen Ländern,
- oder der besonderen Vereinbarung zwischen Planer und Auftraggeber,
- oder dem Bild 2 für Industrieanlagen entnommen.

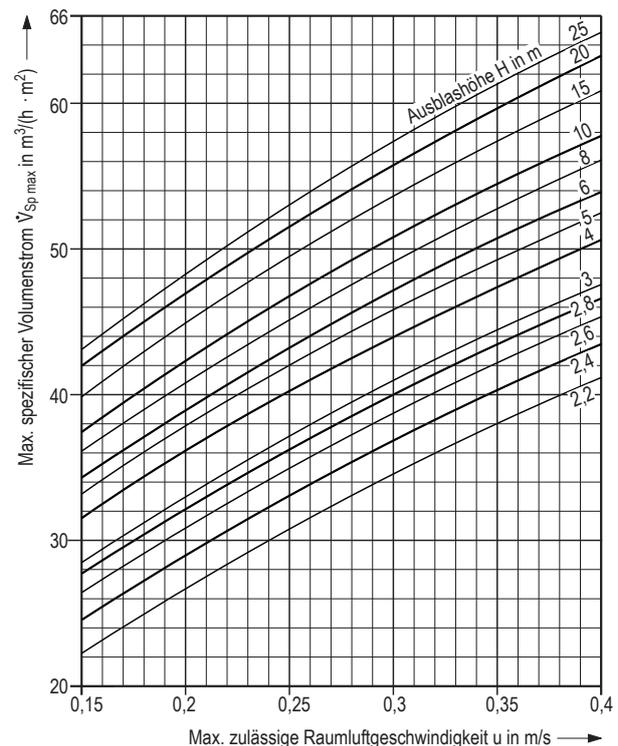


Bild 3: Dreidimensionale diffuse Raumluftströmung, z.B. Deckendrallauslass, Radialauslass, Radialer Lamellenauslass, Fächerauslass, Induktivauslass, Opticlean und Schwenkbarer Weitstrahlauslass

Das Auslegungskriterium basiert auf

$$\Delta\vartheta_{\max} = -10 \text{ bis } -12 \text{ K}$$

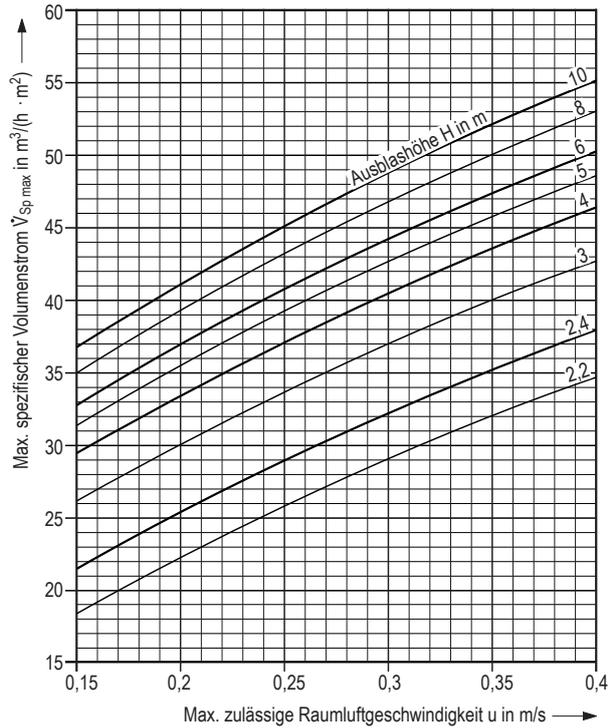
Ist die maximale Temperaturdifferenz kleiner, so kann

$V_{Sp\max}$  um folgenden Betrag erhöht werden:

$$\Delta\vartheta_{\max} = -8 \text{ K} \Rightarrow V_{Sp\max} \text{ 15 \% höher}$$

$$\Delta\vartheta_{\max} = -6 \text{ K} \Rightarrow V_{Sp\max} \text{ 35 \% höher}$$

$$\Delta\vartheta_{\max} = -4 \text{ K} \Rightarrow V_{Sp\max} \text{ 70 \% höher}$$



**Bild 4:** Zweidimensionale diffuse Raumluftrömung für Wand-Luftdurchlässe, z.B. Linearer Wirbelauslass, Wandschlitzauslass, Breitflächerauslass, Weitwurfdüse und Brüstungsauslass

Das Auslegungskriterium basiert auf

$$\Delta\vartheta_{\max} = -8 \text{ bis } -10 \text{ K}$$

Ist die maximale Temperaturdifferenz kleiner, so kann

$\dot{V}_{Sp \max}$  um folgenden Betrag erhöht werden:

$$\Delta\vartheta_{\max} = -6 \text{ K} \Rightarrow \dot{V}_{Sp \max} \text{ 35 \% höher}$$

$$\Delta\vartheta_{\max} = -4 \text{ K} \Rightarrow \dot{V}_{Sp \max} \text{ 70 \% höher}$$

Ist z.B. bei dreidimensionaler diffuser Raumluftrömung eine max. Raumluftrgeschwindigkeit von 0,25 m/s zugelassen, so darf bei einer Ausblashöhe von 3 m der spezifische Luft-Volumenstrom max.  $37 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$  betragen. Ist die maximale Temperaturdifferenz im Kühlfall auf  $-8 \text{ K}$  begrenzt, so darf der Betrag um 15% höher, d.h. bei  $43 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$  liegen.

## Turbulenzarme Verdrängungsströmung

Für die turbulenzarme Verdrängungsströmung (erzeugt durch Quell-Luftdurchlässe und Verdrängungs-Luftdurchlässe) gelten andere Auslegungskriterien, die bei den einzelnen Bauarten dieser Luftdurchlässe von KRANTZ KOMPONENTEN beschrieben sind. Vor allem wird der Nahbereich definiert, in dem – physikalisch bedingt – höhere Luftgeschwindigkeiten auftreten.

Ausnahme ist der runde Verdrängungsauslass, Typ VA-ZD bei Anordnung oberhalb des Aufenthaltsbereiches. In diesem Fall können bei horizontaler Ausblasrichtung annähernd die Auslegungskriterien nach Bild 3 zugrunde gelegt werden.

## Temperaturen

### Raumtemperatur

Im Aufenthaltsbereich ist das Zusammenwirken von Lufttemperatur und Strahlungstemperatur der Umgebungsflächen zu berücksichtigen. Dies ist insbesondere beim Einsatz von Kühldecken und bei großflächigen Glasfassaden der Fall. Die örtliche Temperatur  $\vartheta_o$  wird als operative oder empfundene Raumtemperatur bezeichnet und nach der folgenden Näherungsgleichung ermittelt:

$$\vartheta_o = \frac{1}{2} (\vartheta_a + \vartheta_r)$$

$\vartheta_o$  = Operative Temperatur

$\vartheta_a$  = Lufttemperatur im Raum

$\vartheta_r$  = Mittlere Strahlungstemperatur

$\vartheta_r$  wird aus den Oberflächentemperaturen der Raumschließungsflächen und den Einstrahlwinkeln zum betrachteten Raumpunkt (in der Regel der Arbeitsplatz) errechnet. Je näher beispielsweise der Arbeitsplatz an der Fassade liegt, desto größer wird auch der Einfluss deren Temperatur auf die operative bzw. empfundene Raumtemperatur.

In Anlehnung an EN 15251 werden folgende Auslegungswerte der operativen Raumtemperatur empfohlen:

Kategorie	Operative Temperatur in °C	
	Mindestwert für Heizperiode (Winter), ≈ 1 clo	Höchstwert für Kühlperiode (Sommer), ≈ 0,5 clo
A	21	25,5
B	20	26
C	19	27

Tabelle 2: Empfohlene Auslegungswerte für die operative Raumtemperatur bei 1,2 met

Sofern nichts anderes vereinbart wurde, gilt die festgelegte operative Raumtemperatur für einen Bereich in der Mitte des Raumes bei einer Höhe von 0,6 m über dem Boden.

### Strahlungstemperatur-Asymmetrie

Auch die Strahlungstemperatur-Asymmetrie beeinflusst die Behaglichkeit. Unbehagen tritt auf, wenn die Raumschließungsflächen in ihren Oberflächentemperaturen zu stark voneinander abweichen. Aktive Kühl- oder Heizflächen beeinflussen diese und können zur Kompensation zu großer Unterschiede genutzt werden. Zu beachten ist auch, dass der Mensch gleiche Werte der Strahlungstemperatur-Asymmetrie in verschiedenen Situationen unterschiedlich empfindet. Eine warme Decke wird z.B. als wesentlich unangenehmer empfunden als eine kalte.

Aus diesen Erkenntnissen folgen in EN ISO 7730 die zulässigen Grenzwerte für die Strahlungstemperatur-Asymmetrie (Tabelle 3).

Kategorie	Strahlungstemperatur-Asymmetrie in K			
	warme Decke	kühle Wand	kühle Decke	warme Wand
A	< 5	< 10	< 14	< 23
B	< 5	< 10	< 14	< 23
C	< 7	< 13	< 18	< 35

Tabelle 3: Grenzwerte der Strahlungstemperatur-Asymmetrie nach EN ISO 7730

Werden diese Werte nicht überschritten, so wird der zulässige Prozentsatz der Unzufriedenen mit der Strahlungstemperatur-Asymmetrie nach Tabelle 1 eingehalten.

Beim Einsatz von Kühldecken wird im Kühlfall der Grenzwert von 14 bzw. 18 K in der Praxis niemals erreicht, da bereits viel früher Kondensat entstehen würde. Der Grenzwert von 5 K im Heizfall kann jedoch bei falscher Auslegung erreicht werden.

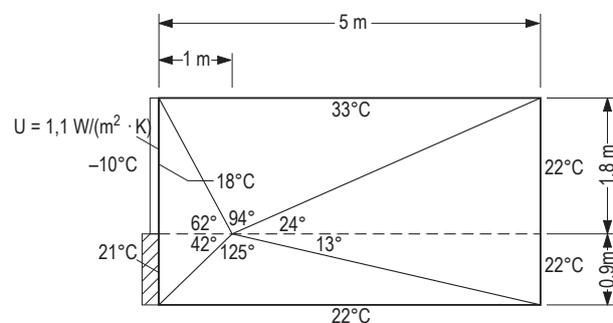


Bild 5: Beispiel einer Berechnung der Strahlungstemperatur-Asymmetrie

Das folgende Beispiel zeigt die Berechnungsmethodik.

Oberer Halbraum:

$$\vartheta_{rH1} = \frac{62}{180} \cdot 18^\circ\text{C} + \frac{94}{180} \cdot 33^\circ\text{C} + \frac{24}{180} \cdot 22^\circ\text{C} = 26,4^\circ\text{C}$$

Unterer Halbraum:

$$\vartheta_{rH2} = \frac{42}{180} \cdot 21^\circ\text{C} + \frac{125}{180} \cdot 22^\circ\text{C} + \frac{13}{180} \cdot 22^\circ\text{C} = 21,8^\circ\text{C}$$

Die Strahlungstemperatur-Asymmetrie beträgt  $\Delta\vartheta_{rH} = 4,6\text{ K}$  und ist somit für alle Kategorien zulässig. Für den Einsatz von Kühldecken zu Heizzwecken lässt sich auf diese Art eine maximale Heizleistung für Kategorien A und B von ca.  $55 - 65\text{ W/m}^2$  Fußboden ableiten (**Bild 6**).

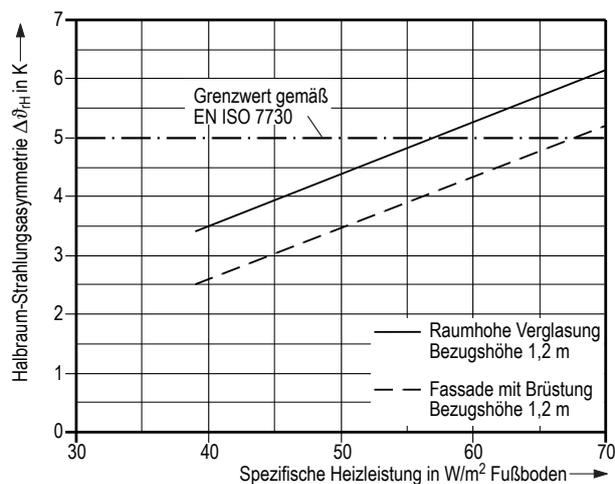


Bild 6: Halbraum-Strahlungstemperatur-Asymmetrie  $\Delta\vartheta_{rH}$  (Decke/Boden) im Abstand von 1 m von der Fassade

## Vertikaler Lufttemperaturunterschied

EN ISO 7730 lässt je nach Kategorie der thermischen Behaglichkeit folgenden maximalen vertikalen Lufttemperaturunterschied zwischen 1,1 m und 0,1 m über dem Boden zu (**Tabelle 4**).

Kategorie	vertikaler Lufttemperaturunterschied
A	< 2 K
B	< 3 K
C	< 4 K

Tabelle 4: Zulässiger vertikaler Lufttemperaturunterschied nach EN ISO 7730

Wird diese Bedingung erfüllt, wird der zulässige Prozentsatz der Unzufriedenen mit dem vertikalen Temperaturunterschied nach **Tabelle 1** eingehalten.

Die Grenzwerte für den vertikalen Lufttemperaturunterschied sind bei der turbulenten Mischlüftung und bei der Kühldecke im Kühlbetrieb ohne Bedeutung, da sie stets weit unterschritten werden. Bei der Quell-Lüftung und der Kühldecke im Heizbetrieb ist jedoch auf eine mögliche Überschreitung zu achten. Hierzu gelten folgende Erfahrungswerte: Bei der Quell-Lüftung sollte die spezifische Kühllast für die Kategorie A nicht über  $45\text{ W/m}^2$ , für die Kategorie B nicht über  $55\text{ W/m}^2$  betragen. Für Kühldecken im Heizbetrieb sollte die spezifische Heizleistung pro  $\text{m}^2$ -Bodenfläche in der Kategorie A nicht über  $50\text{ W/m}^2$ , in der Kategorie B nicht über  $70\text{ W/m}^2$  liegen. Ist gleichzeitig mit der Kühldecke ein Lüftungssystem mit turbulenter Mischlüftung von der Decke oder mit Bodendrallaussäßen in Betrieb, erhöht sich die zulässige Heizleistung auf  $100\text{ W/m}^2$  Bodenfläche.

## Fußbodentemperatur

**Tabelle 5** zeigt die zulässigen Werte für die Oberflächentemperatur des Bodens, abhängig von der Kategorie der thermischen Behaglichkeit.

Kategorie	zulässige Oberflächentemperatur des Fußbodens in °C
A	19 – 29
B	19 – 29
C	17 – 31

Tabelle 5: Zulässige Oberflächentemperatur des Fußbodens nach EN ISO 7730

Mit RLT-Anlagen lässt sich die Oberflächentemperatur des Bodens nur wenig beeinflussen.

## Kaltluftabfall an Fassaden

An Glasfassaden mit zu großen Wärmedurchgangskoeffizienten  $U > 1,6 \dots 2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  oder großer Höhe ist Unbehaglichkeit durch Kaltluftabfall zu befürchten. Der Kaltluftstrom wird am Boden umgelenkt und dringt in den Aufenthaltsbereich ein. **Bild 7** zeigt dazu die Raumluftgeschwindigkeiten  $u$  in Abhängigkeit der Fenster-/Fassadenhöhe.

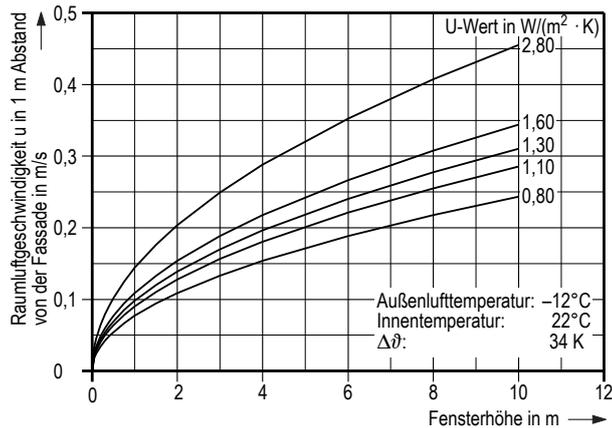


Bild 7: Raumluftgeschwindigkeiten  $u$  über dem Boden aufgrund von Kaltluftabfall an Glasfassaden

Der Kaltluftabfall kann an hohen Fassaden durch Fensterblasanlagen oder Fassadenheizsysteme wirkungsvoll verhindert werden, bei raumhohen Verglasungen auch durch Heizkörper und Brüstungs-Klimageräte.

Aachen, April 2008

Dr. Franc Sodec