



Auslegungskriterien für thermische Behaglichkeit

Auslegungskriterien für thermische Behaglichkeit

Kategorien der thermischen Behaglichkeit

Hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit in **Komfortanlagen** definiert die europäische Norm EN ISO 7730 (in Deutschland DIN 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, also dem Umgebungsklima, 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 sollen für jede Kategorie zugleich erfüllt werden. Welche Kategorie einzuhalten ist, wird zwischen dem Planer und dem Auftraggeber vereinbart. Die Einzelkriterien lassen sich weiter wie folgt bewerten:

Raumluftgeschwindigkeiten bzw. Zugluftrisiko

Die maximal zulässigen Raumluftgeschwindigkeiten zur Einhaltung der entsprechenden Kategorie A, B oder C sind in den Bildern 1 bis 3 dargestellt. Dabei entspricht die Kategorie A einem DR-Wert von 10 % (DR = Draught Rating = Zugluftrisiko), Kategorie B einem DR-Wert von 20 % und Kategorie C einem DR-Wert von 30 %.

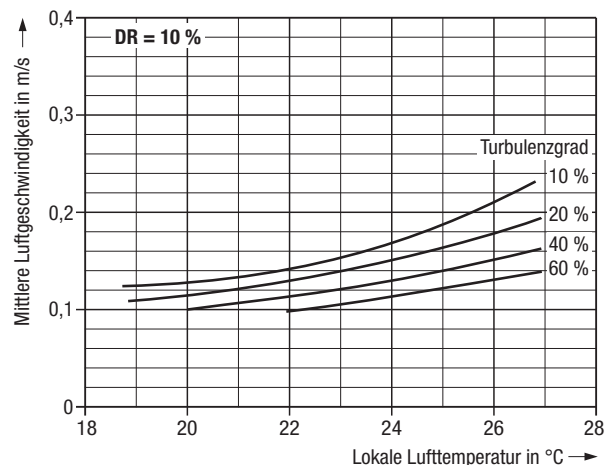


Bild 1: Zulässige mittlere Raumluftgeschwindigkeiten nach DIN EN ISO 7730 für Kategorie A, entsprechend Zugluftrisiko 10 %

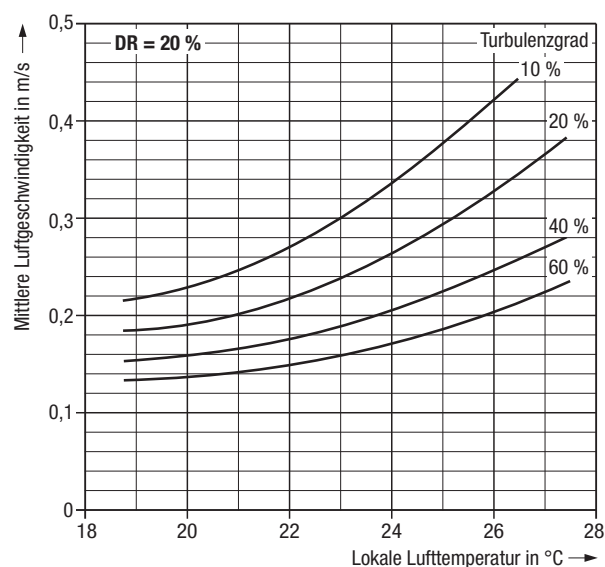


Bild 2: Zulässige mittlere Raumluftgeschwindigkeiten nach DIN EN ISO 7730 für Kategorie B, entsprechend Zugluftrisiko 20 %

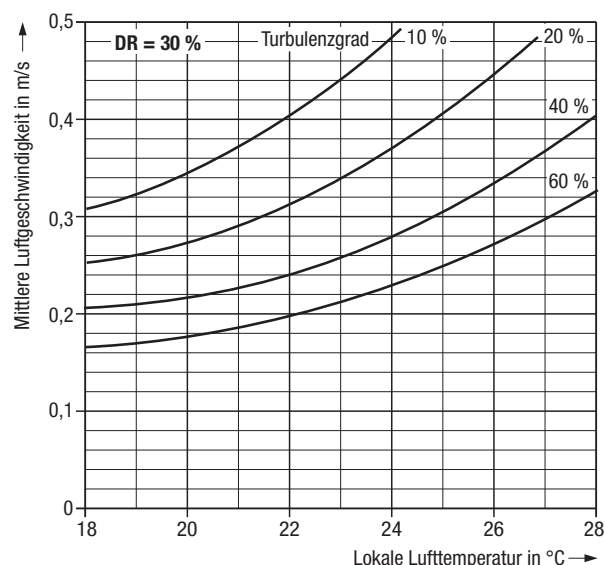


Bild 3: Zulässige mittlere Raumluftgeschwindigkeiten nach DIN EN ISO 7730 für Kategorie C, entsprechend Zugluftrisiko 30 %

Auslegungskriterien für thermische Behaglichkeit

Die Kategorie A ist bei Kühllasten von $> 50 \text{ W/m}^2$ in der Regel nur mit Kühldeckensystemen vom Typ Strahlungskühldecke in Verbindung mit einem Luftführungssystem, welches den hygienisch erforderlichen Außenluftwechsel sicherstellt, erreichbar.

Bei der Wahl des Turbulenzgrades können erfahrungsgemäß Quell-Luftsysteme mit 20 % und turbulente Mischluftsysteme mit 40 % angesetzt werden. Es ergeben sich dann die in [Tabelle 2](#) dargestellten maximalen Raumluftgeschwindigkeiten bei der üblichen Auslegungs-Raumtemperatur von 26°C (nach DIN EN 15251).

Kategorie	Turbulente Mischlüftung m/s	Quell-Lüftung m/s
A	0,15	0,18
B	0,25	0,32
C	0,33	0,45

Tabelle 2: Maximal zulässige Raumluftgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Lüftungssystem und Anlagenkategorie

Sowohl die DIN EN ISO 7730 als auch die DIN EN 15251 sagt aus, dass bei höheren Raumtemperaturen über 26°C zum Ausgleich eine erhöhte Raumluftgeschwindigkeit zulässig ist. Dies gilt aber nur unter der Bedingung, dass der Nutzer die erhöhte Luftbewegung selbst anpassen kann (z. B. bei Fan Coils oder dezentralen Fassadengeräten).

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 ϑ_o wird als operative oder empfundene Raumtemperatur bezeichnet und nach der folgenden Näherungsgleichung ermittelt:

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

ϑ_o = Operative Raumtemperatur

ϑ_a = Lufttemperatur im Raum

ϑ_r = Mittlere Strahlungstemperatur

ϑ_r wird aus den Oberflächentemperaturen der Raumumschließungsflächen 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.

Die operative Raumtemperatur ist ebenfalls in Abhängigkeit der Anlagenkategorie gestaffelt. Die [Tabelle 3](#) gilt für Bürogebäude, Konferenzräume sowie Auditorien, Restaurants und Klassenräume.

Kategorie	Operative Temperatur in $^\circ\text{C}$	
	Sommer (Kühlperiode)	Winter (Heizperiode)
A	$24,5 \pm 1,0$	$22,0 \pm 1,0$
B	$24,5 \pm 1,5$	$22,0 \pm 2,0$
C	$24,5 \pm 2,5$	$22,0 \pm 3,0$

Tabelle 3: Zulässige Bereiche operativer Raumtemperatur

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 Raumumschließungsflächen in ihren Oberflächentemperaturen zu stark voneinander abweichen. Aktive Kühl- oder Heizflächen beeinflussen diese und können zur Kompensation zu großer Unterschiede, z. B. gegenüber Fassaden, 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 DIN EN ISO 7730 die zulässigen Grenzwerte für die Strahlungstemperatur-Asymmetrie ([Tabelle 4](#)).

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 4: Grenzwerte der Strahlungstemperatur-Asymmetrie nach DIN 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.

Werden Kühldecken zu Heizzwecken eingesetzt, entstehen in der Regel bis zu einer Heizleistung von $55 - 65 \text{ W/m}^2$ keine Behaglichkeitseinschränkungen ([Bild 4](#)). Näheres hierzu enthält TB 87.

Zu beachten ist, dass die Asymmetrie der Strahlungstemperatur mit den entsprechenden Oberflächentemperaturen von Wänden, Decke und Boden und den Einstrahlwinkeln berechnet wird. Letzterer ist von der betrachteten Sitzposition abhängig. In der Regel wird geprüft, ob der fassadennächste Arbeitsplatz die Kriterien erfüllt.

Auslegungskriterien

für thermische Behaglichkeit

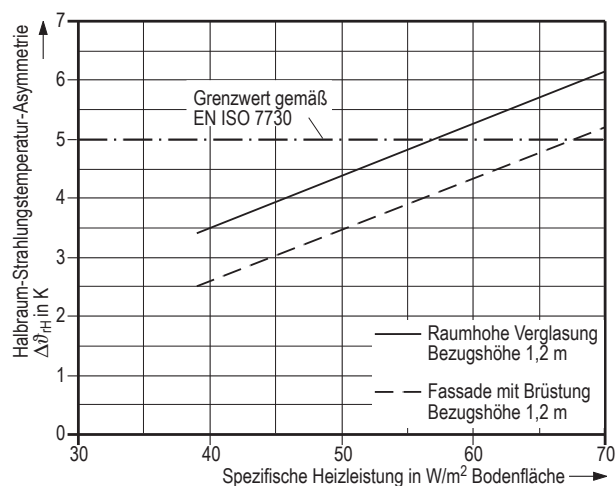


Bild 4: Halbraum-Strahlungstemperatur-Asymmetrie $\Delta\theta_{rH}$ (Decke/ Boden) im Abstand von 1 m von der Fassade beim Einsatz von Kühldecken zum Heizen

Vertikaler Lufttemperaturunterschied

Die DIN 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 5). Dies entspricht in etwa dem Bereich zwischen Kopf und Fuß einer sitzenden Person.

Kategorie	Vertikaler Lufttemperaturunterschied in K
A	< 2
B	< 3
C	< 4

Tabelle 5: Zulässiger vertikaler Lufttemperaturunterschied nach DIN 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 W/m^2 , für die Kategorie B nicht über 55 W/m^2 betragen.

Für Kühldecken im Heizbetrieb sollte die spezifische Heizleistung pro m^2 -Bodenfläche in der Kategorie A nicht über 50 W/m^2 , in der Kategorie B nicht über 70 W/m^2 liegen. Ist gleichzeitig mit der Kühldecke ein Lüftungssystem mit turbulenter Mischlüftung von der Decke oder mit Bodendrallausslässen in Betrieb, erhöht sich die zulässige Heizleistung auf 100 W/m^2 Bodenfläche.

Fußbodentemperatur

Tabelle 6 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 6: Zulässige Oberflächentemperatur des Fußbodens nach DIN EN ISO 7730

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

Kaltluftabfall an Fassaden

An Glasfassaden mit zu großen Wärmedurchgangskoeffizienten $U > 1,6 \dots 2 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ oder großer Höhe ist Unbehaglichkeit durch Kaltluftabfall zu befürchten. Der Kaltluftstrom wird am Boden umgelenkt und dringt in den Aufenthaltsbereich ein. Bild 5 zeigt dazu die Raumluftgeschwindigkeiten u in Abhängigkeit der Fenster-/Fassadenhöhe.

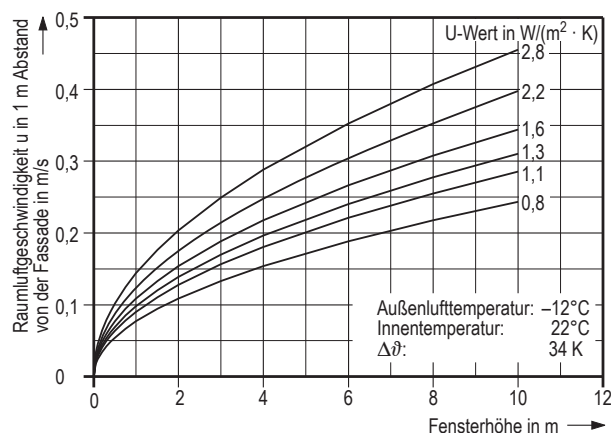


Bild 5: Raumluftgeschwindigkeiten u über dem Boden aufgrund von Kaltluftabfall an Glasfassaden

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

Auslegungskriterien für thermische Behaglichkeit

Einhaltung der zulässigen Raumluftgeschwindigkeiten

Turbulente Mischlüftung

Die Einhaltung der zulässigen Raumluftgeschwindigkeiten gemäß Bild 1 bis 3 richtet sich im Wesentlichen nach folgenden physikalischen Größen:

1. Maximale Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Raumluf $\Delta\vartheta_{\max}$ im Kühlfall.
2. Spezifische Kühllast pro m^2 Bodenfläche.

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

1. Maximale Temperaturdifferenz

Deckendrallausslass	$\Delta\vartheta_{\max} = -12 \text{ K}$
Radialausslass	
Radialer Lamellenausslass	
Fächerausslass	
Induktivausslass	$\Delta\vartheta_{\max} = -10 \text{ K}$
Opticlean	
Schwenkbarer Weitstrahlausslass	
Bodendrallausslass	

Tabelle 7: Luftdurchlässe, die eine dreidimensionale diffuse Raumluftströmung ohne Raumlufthalzen erzeugen

Breitfächerausslass	$\Delta\vartheta_{\max} = -10 \text{ K}$
Brüstungsausslass	
Wandschlitzauslass	
Linearer Wirbelausslass	$\Delta\vartheta_{\max} = -8 \text{ K}$
Weitwurfdüse	

Tabelle 8: Luftdurchlässe, die eine zweidimensionale diffuse Raumluftströmung mit Raumlufthalzen erzeugen

Aktive Deckenkühlkonvektoren erzeugen ebenfalls eine zweidimensionale Raumlufthalzen und können wie unter $\Delta\vartheta_{\max} = -8 \text{ K}$ angegeben betrachtet werden.

In Bild 6 ist die Umrechnung der spezifischen Kühllast in den spezifischen Luft-Volumenstrom in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Abluft dargestellt.



Bild 6: Zusammenhang zwischen spezifischer Kühllast, Temperaturdifferenz und spezifischem Luft-Volumenstrom

2. Maximale spezifische Kühllast

Die maximale spezifische Kühllast ist abhängig vom gewählten Lüftungssystem (zwei- bzw. dreidimensionale Raumlufthalzen, siehe vorheriges Kapitel), der maximal zulässigen Raumlufthalzen und der Ausblashöhe. Die zulässige Raumlufthalzen wird dabei

- entweder dem Bild 1 bis 3 bei Komfortanlagen,
- oder dem Bild 9 für Industrieanlagen,
- oder der besonderen Vereinbarung zwischen Planer und Auftraggeber entnommen.

Die Abhängigkeiten der Raumlufthalzen sind für eine dreidimensionale Raumlufthalzen in Bild 7 und für eine zweidimensionale Raumlufthalzen in Bild 8 dargestellt.

Auslegungskriterien

für thermische Behaglichkeit

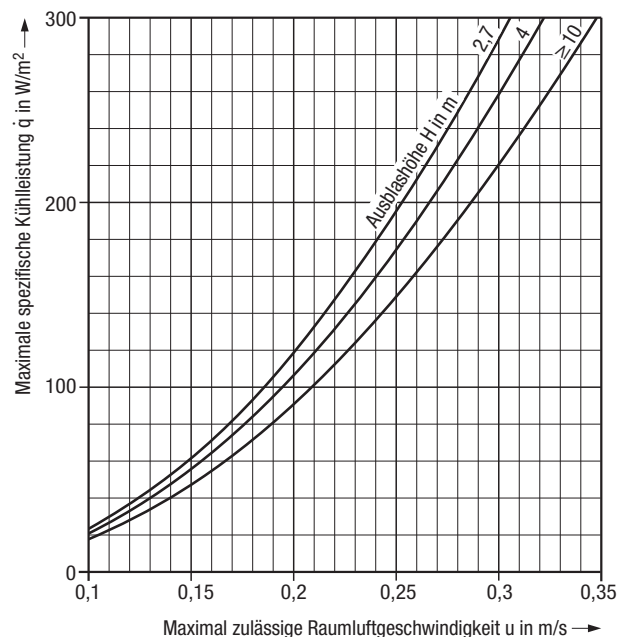


Bild 7: Dreidimensionale diffuse Raumluftströmung, z. B. Deckendrallauslass, Radialauslass, Radialer Lamellenauslass, Fächerauslass, Induktivauslass, Opticlean und Schwenkbarer Weitstrahlauslass

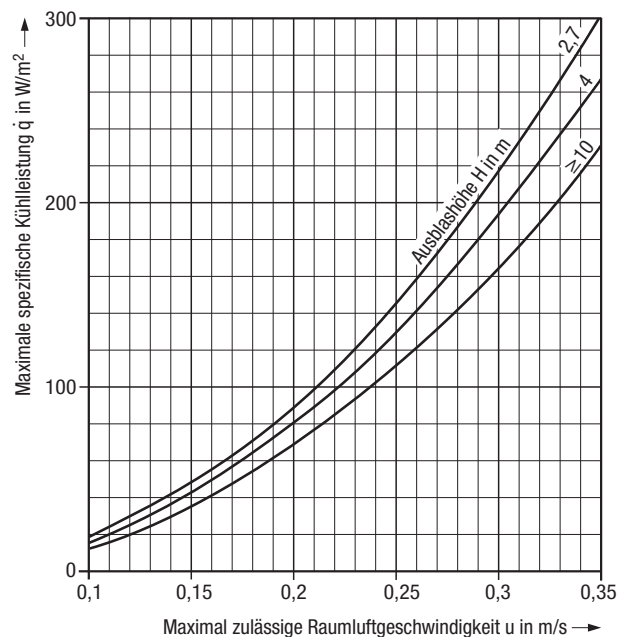


Bild 8: Zweidimensionale diffuse Raumluftströmung für Wand-Luftdurchlässe, z. B. Linearer Wirbelauslass, Wandschlitzauslass, Breitflächerauslass, Weitwurfdüse, Brüstungsauslass, sowie für aktiven Deckenkühlkonvektor

Berechnungsbeispiel:

Für ein Bürogebäude mit 2,7 m Raumhöhe ist eine spezifische Kühlleistung von 90 W/m² Bodenfläche erforderlich. Es sollen Luftdurchlässe vom Typ linearer Wirbelauslass eingesetzt werden. Dabei soll die Kategorie B gemäß DIN EN ISO 7730 eingehalten werden. Für die Auslegungsraumtemperatur von 24 °C und den Turbulenzgrad 40 % ergibt sich eine maximal zulässige Raumluftgeschwindigkeit von 0,21 m/s (Bild 2). Gemäß Bild 8 für die zweidimensionale Raumluftströmung liegt die Grenze bei 100 W/m², damit die erforderliche Kategorie B bezüglich der Raumluftgeschwindigkeiten eingehalten wird.

Gemäß Tabelle 8 ergibt sich für den linearen Wirbelauslass eine maximale Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Raumluft von –8 K. Dies führt gemäß Bild 6 bei der geforderten Kühlleistung von 90 W/m² Bodenfläche zu einem spezifischen Zuluft-Volumenstrom von 34 m³/(h·m²) Bodenfläche.

Wenn statt des linearen Wirbelauslasses ein Breitflächerauslass eingesetzt wird, erhöht sich die mögliche Temperaturdifferenz von –8 K auf –10 K (Tabelle 8). Infolgedessen sinkt der erforderliche spezifische Zuluft-Volumenstrom von 34 m³/(h·m²) auf 27 m³/(h·m²) Bodenfläche.

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 VA-ZD bei Anordnung oberhalb des Aufenthaltsbereiches. In diesem Fall können bei horizontaler Ausblasrichtung annähernd die Auslegungskriterien nach Bild 7 zugrunde gelegt werden.

Auslegungskriterien für thermische Behaglichkeit

Für **Industrieanlagen** sind die zulässigen Raumlufthgeschwindigkeiten in VDI 3802 (Raumlufthtechnische Anlagen für Fertigungsstätten) vorgegeben. Hier sind nach Bild 9 die zulässigen mittleren Raumlufthgeschwindigkeiten 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 gelten die folgenden Aktivitätsstufen:

Aktivitätsstufe II: 1,5 met $\triangleq$ 150 W
(leichte Arbeiten im Stehen, Labortätigkeit)

Aktivitätsstufe III: 2 met $\triangleq$ 200 W
(mäßig schwere Tätigkeit im Stehen)

Aktivitätsstufe IV: 2,5 met $\triangleq$ 250 W
(schwere Tätigkeit im Stehen)

Beispielsweise sind in einer Industriehalle bei

- Raumlufthtemperatur 26 °C
- Aktivitätsstufe III (2 met)
- Bekleidung 0,9 clo

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

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

Insbesondere in Hallen mit freier Kühlung (also ohne Kältemaschinen) können im Sommer Raumtemperaturen über 30 °C auftreten, so dass über eine erhöhte Raumlufthgeschwindigkeit die Wärmeabgabe des Körpers erleichtert wird.

Da ferner die Aktivitätsstufe der Mitarbeiter in Industriebereichen auch in derselben Produktionshalle unterschiedlich sein kann, sollten deshalb möglichst individuell verstellbare Verdrängungsauslässe eingesetzt werden.

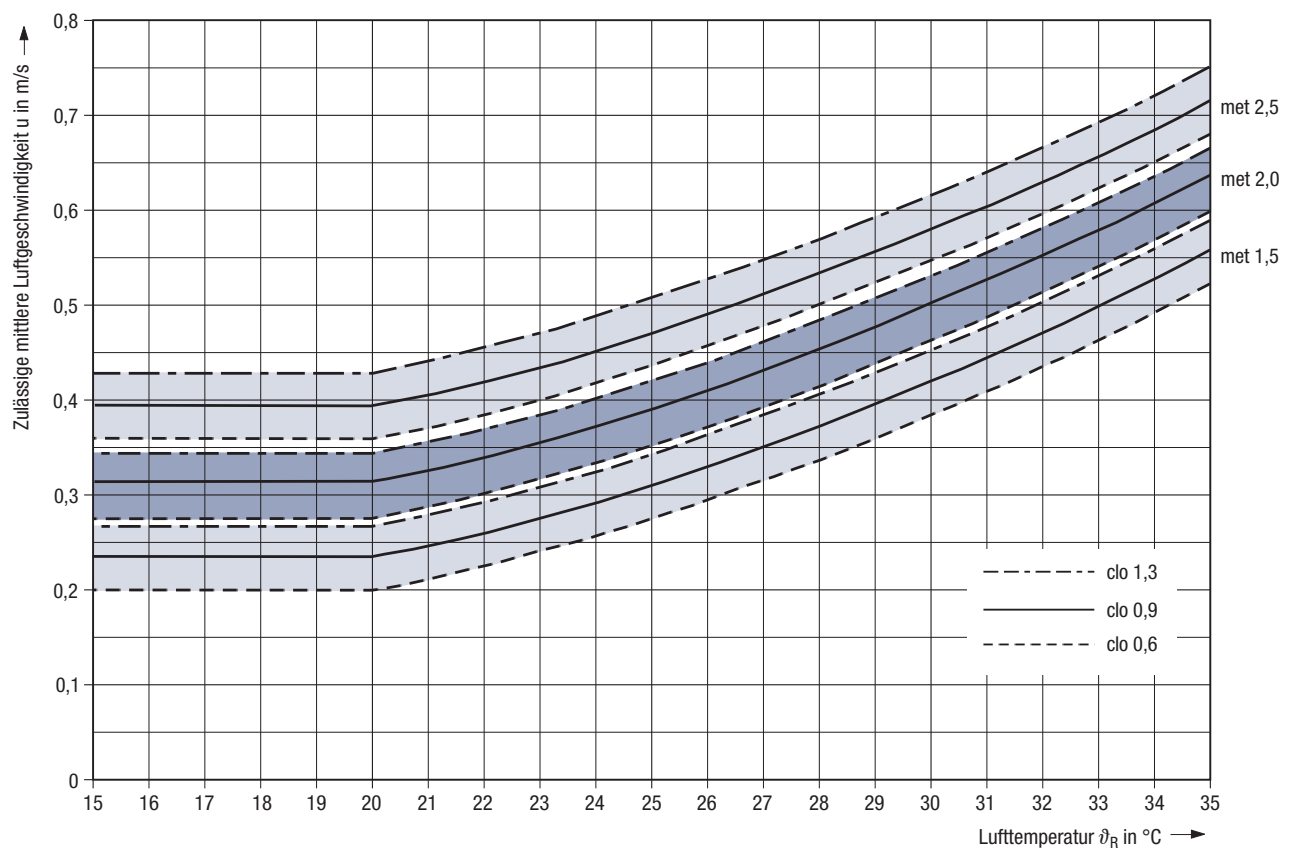


Bild 9: Zulässige mittlere Raumlufthgeschwindigkeiten in Fertigungsstätten nach VDI 3802

April 2013

Detlef Makulla

Dietmar Rossbruch

