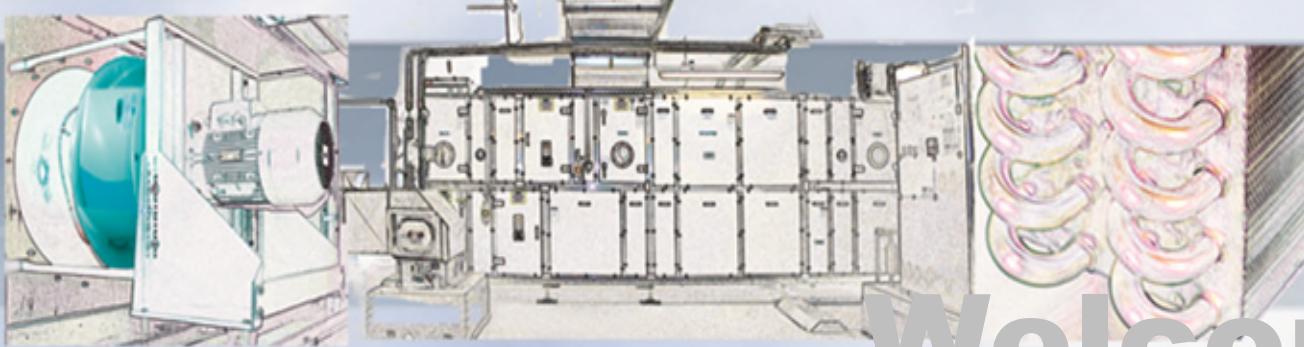


Willkommen



Welcome

Bienvenue

Raumluftechnik Wärmebedarf

Energierückgewinnung und Energieeffizienz-
technologien in der Lüftungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Dr. Christoph Kaup

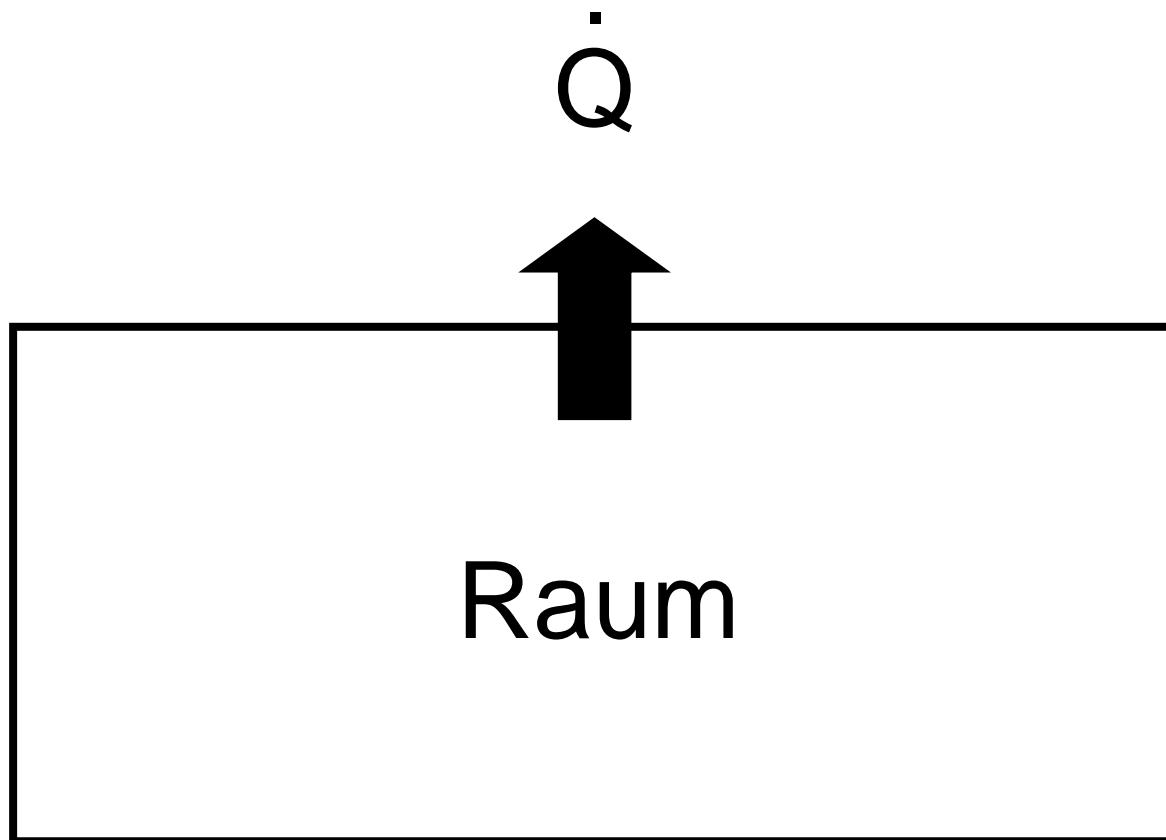
c.kaup@umwelt-campus.de

Transmissionswärme (Dämmen der Gebäudehülle)

Lüftungswärme (35 bis 38 %)
(Dichten der Gebäudehülle)



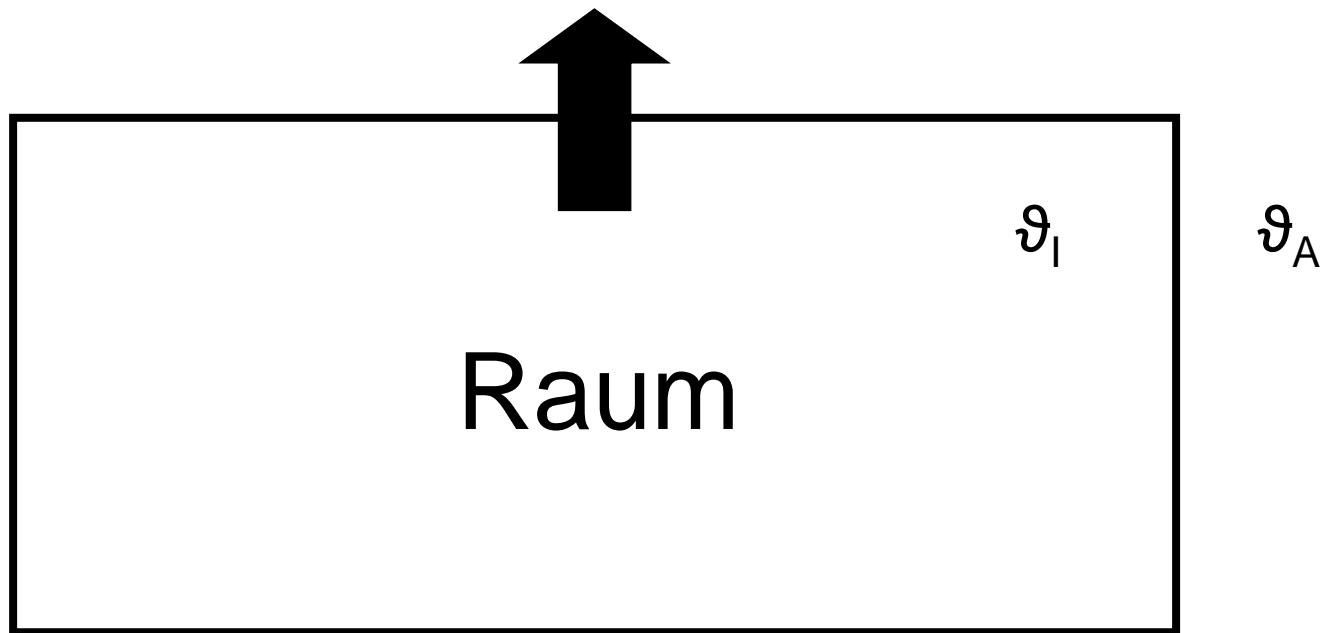
Transmissionswärme



Transmissionswärme

$$\dot{Q}$$

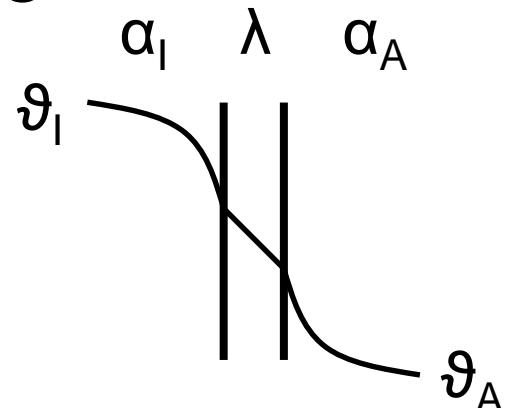
$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta \vartheta$$



Konvektiver Wärmeübergang

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta$$

$$1 / k = 1 / \alpha_I + d / \lambda + 1 / \alpha_A$$



k Wärmedurchgangskoeffizient [W / m² / K]

A Wärmeübertragungsfläche [m²]

α Wärmeübergangskoeffizient [W / m² / K]

λ Wärmeleitfähigkeit [W / m / K]

Konvektiver Wärmeübergang

$$\alpha = \dot{q} / (\vartheta_l - \vartheta_w) = Nu \cdot \lambda / l$$

$Nu = f (Pr, Re, Gr, Ra)$ Nußelt-Zahl

Pr Prandl-Zahl

Re Reynold-Zahl

Gr Grashof-Zahl

(Ra Rayleigh-Zahl)

Konvektion

$$Pr = \rho \cdot v \cdot c_p / \lambda \quad (\text{temp.abh. Stoffgröße})$$

$$Re = \rho \cdot w \cdot l / \eta = w \cdot l / v \quad (\text{Strömungskennzahl})$$

ρ Dichte des Medium [kg / m³]

v kinematische Viskosität [m² / s]

c_p spezifische Wärmekapazität [KJ / kg / K]

w Strömungsgeschwindigkeit [m / s]

l charakteristische WÜ Länge [m]

Freie Konvektion

$$Gr = g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (\vartheta_w - \vartheta_f) / \nu^2 \quad (\text{Auftrieb zur Viskosität})$$

$$\beta = 1 / T_f$$

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

g Erdbeschleunigung [m / s²]

ϑ_w Wandtemperatur [°C]

ϑ_f Fluidtemperatur [°C]

T_f absolute Fluidtemperatur [K]

l = $L \cdot B / 2 / (L + B)$ (ebene Platte)

Konvektiver Wärmeübergang Oberseite einer Platte

$$Nu = 0,766 \cdot [Ra \cdot f_2(Pr)]^{0.2}$$

Für laminare Strömung $Ra \cdot f_2(Pr) < 7 \cdot 10^4$

$$Nu = 0,15 \cdot [Ra \cdot f_2(Pr)]^{1/3}$$

Für turbulente Strömung $Ra \cdot f_2(Pr) > 7 \cdot 10^4$

$$f_2(Pr) = [1 + (0,322 / Pr)^{11/20}]^{-20/11}$$

Konvektiver Wärmeübergang Unterseite einer Platte

$$Nu = 0,6 \cdot [Ra \cdot f_1(Pr)]^{0.2}$$

Für laminare Strömung $10^3 < Ra \cdot f_1(Pr) < 10^{10}$

$$f_1(Pr) = [1 + (0,492 / Pr)^{9/16}]^{-16/9}$$

Konvektiver Wärmeübergang Vertikale Platte

$$Nu = (0.825 + 0,387 \cdot [Ra \cdot f_1(Pr)]^{1/6})^2$$

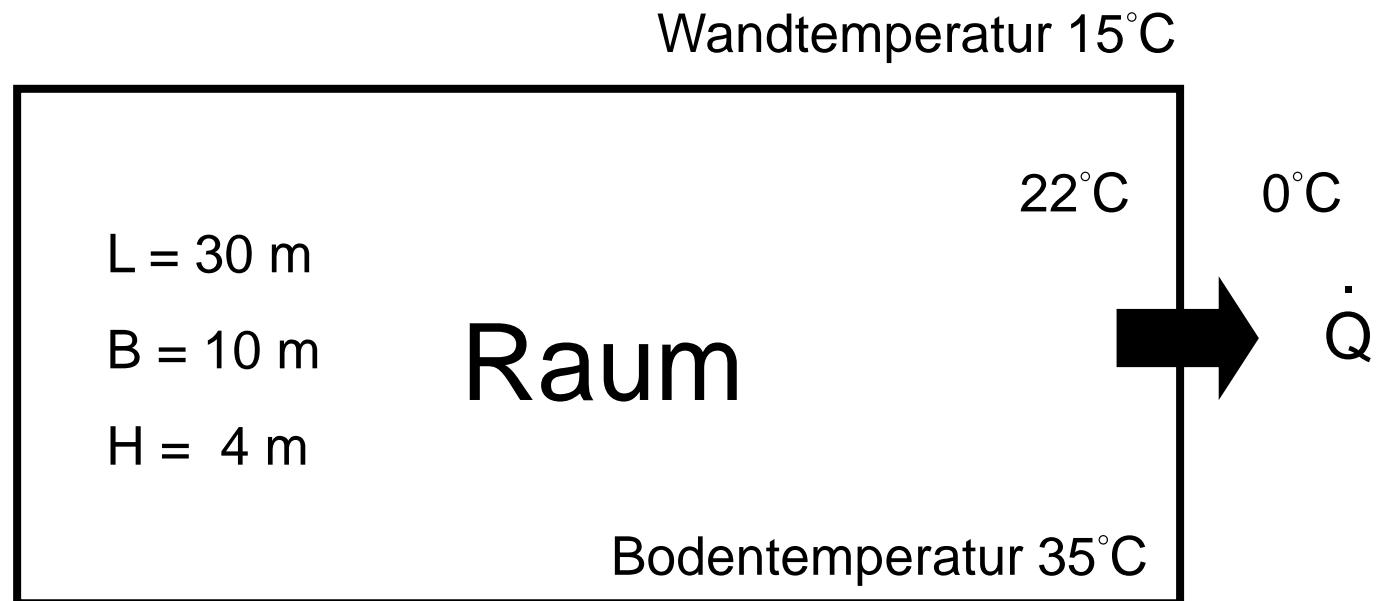
$$10^{-1} < Ra < 10^{12}$$

$l = h$ (Höhe der Wand)

$$f_1(Pr) = [1 + (0,492 / Pr)^{9/16}]^{-16/9}$$

Berechnungsbeispiel

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta \vartheta$$



Konvektiver Wärmeübergang Wand

$$Nu = (0,825 + 0,387 \cdot [Ra \cdot f_1(Pr)]^{1/6})^2$$

$$10^{-1} < Ra < 10^{12}$$

$$Pr = \rho \cdot \nu \cdot c_p / \lambda$$

$$Pr = 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 13,41 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \cdot 1,004 \text{ KJ/kg/K} / 0,02454 \text{ W/m/K}$$

$$Pr = 0,658$$

$$f_1(Pr) = [1 + (0,492 / Pr) ^{9/16}] ^{-16/9}$$

$$f_1(Pr) = [1 + (0,492 / 0,658) ^{9/16}] ^{-16/9} = 0,3354$$

Konvektiver Wärmeübergang Wand (senkrecht)

$$Gr = g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (\vartheta_f - \vartheta_w) / \nu^2$$

$$\beta = 1 / T_f$$

$$\beta = 1 / 295,15 = 0,00338811 \text{ 1/K}$$

$$l = 4 \text{ m}$$

$$Gr = 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 4^3 \text{ m}^3 \cdot 0,00338811 \text{ 1/K} \cdot (22 - 15) \text{ K} \\ / (13,41 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2$$

$$Gr = 82.803.170.788$$

Konvektiver Wärmeübergang Wand (senkrecht)

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

$$Ra = 82.803.170.788 \cdot 0,658 = 54,484 \cdot 10^9$$

$$Nu = (0,825 + 0,387 \cdot [Ra \cdot f_1(Pr)]^{1/6})^2$$

$$10^{-1} < Ra < 10^{12}$$

$$Nu = (0,825 + 0,387 \cdot [54,484 \cdot 10^9 \cdot 0,3354]^{1/6})^2$$

$$Nu = 427,9$$

Konvektiver Wärmeübergang Wand (senkrecht)

$$\text{Nu} = 427,9$$

$$\alpha = \text{Nu} \cdot \lambda / l$$

$$\alpha = 427,9 \cdot 0,02454 \text{ W/m/K} / 4 \text{ m}$$

$$\alpha = 2,62 \text{ W/m}^2\text{/K}$$

Erzwungene Strömung Platte

$$Nu_{lam} = 0,664 \cdot \sqrt{Re} \cdot Pr^{1/3}$$

laminare Grenzschicht $Re < 5 \cdot 10^5$ und $0.6 < Pr < 2000$

$$Nu_{turb} = 0,037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr / [1 + 2,443 \cdot Re^{-0.1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)]$$

turbulente Grenzschicht $5 \cdot 10^5 < Re < 10^7$ und $0.6 < Pr < 2000$

$$Nu = \sqrt{(Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2)}$$

Erzwungene Strömung

Wand $w = 5 \text{ m/s}$

$$Re = w \cdot l / v = 5 \text{ m/s} \cdot 4 \text{ m} / (13,41 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$$

$$Re = 1.491.424$$

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr / [1 + 2,443 \cdot Re^{-0.1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)]$$

turbulente Grenzschicht $5 \cdot 10^5 < Re < 10^7$ und $0,6 < Pr < 2000$

$$Nu = 0,037 \cdot 14,91 \cdot 10^{5 \cdot 0.8} \cdot 0,658 / [1 + 2,443 \cdot 14,91 \cdot 10^{5 \cdot -0.1} \cdot (0,658^{2/3} - 1)]$$

$$Nu = 2.469,5$$

Erzwungene Strömung

Wand $w = 5 \text{ m/s}$

$$Nu = 2.469,5$$

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / l$$

$$\alpha = 2.469,5 \cdot 0,02454 \text{ W/m/K} / 4 \text{ m}$$

$$\alpha = 15,15 \text{ W/m}^2\text{/K}$$

Konvektiver Wärmeübergang

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta \vartheta$$

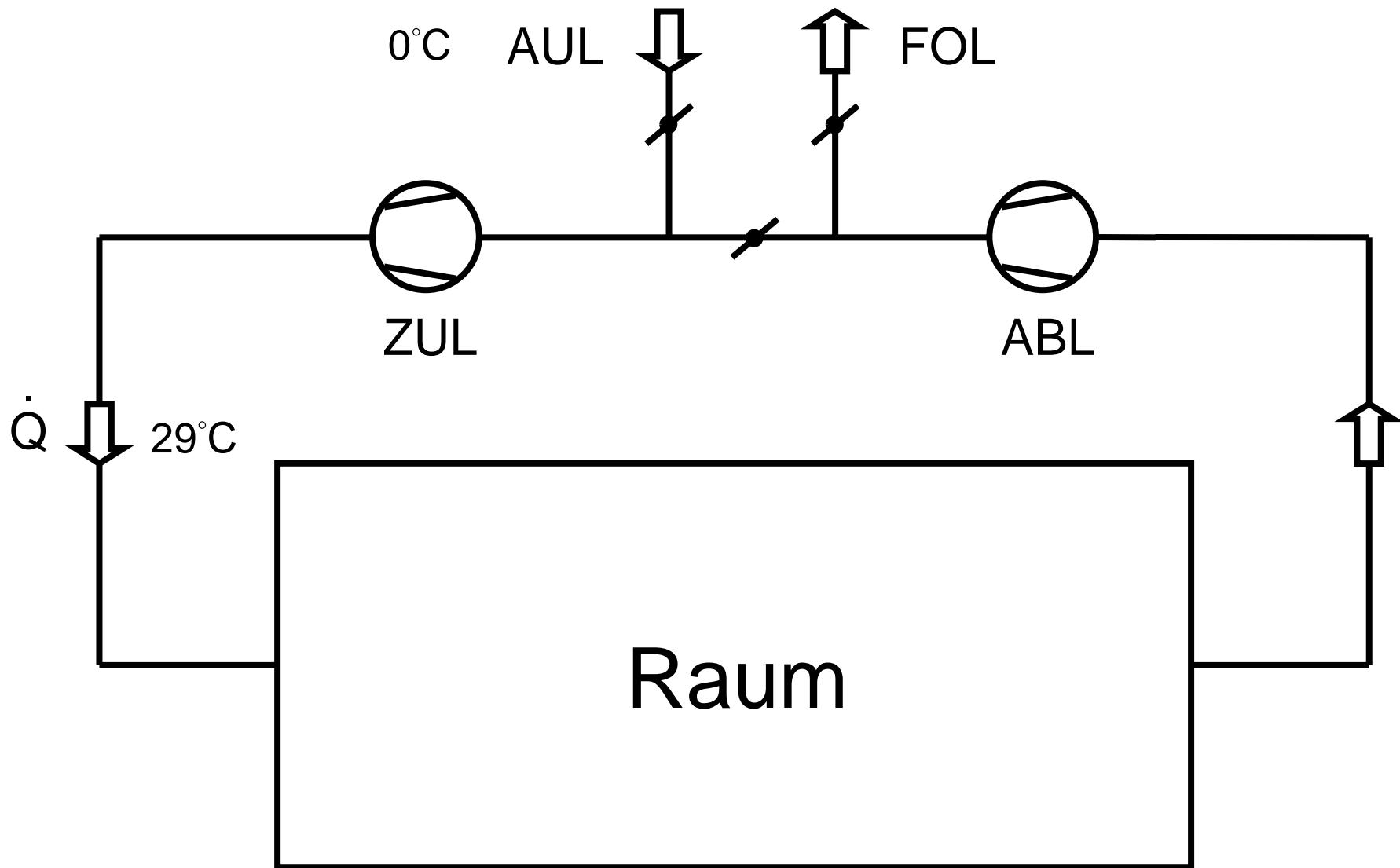
$$1/k = 1/\alpha_l + d/\lambda + 1/\alpha_A$$

$$k = 1 / (1/\alpha_l + d/\lambda + 1/\alpha_A)$$

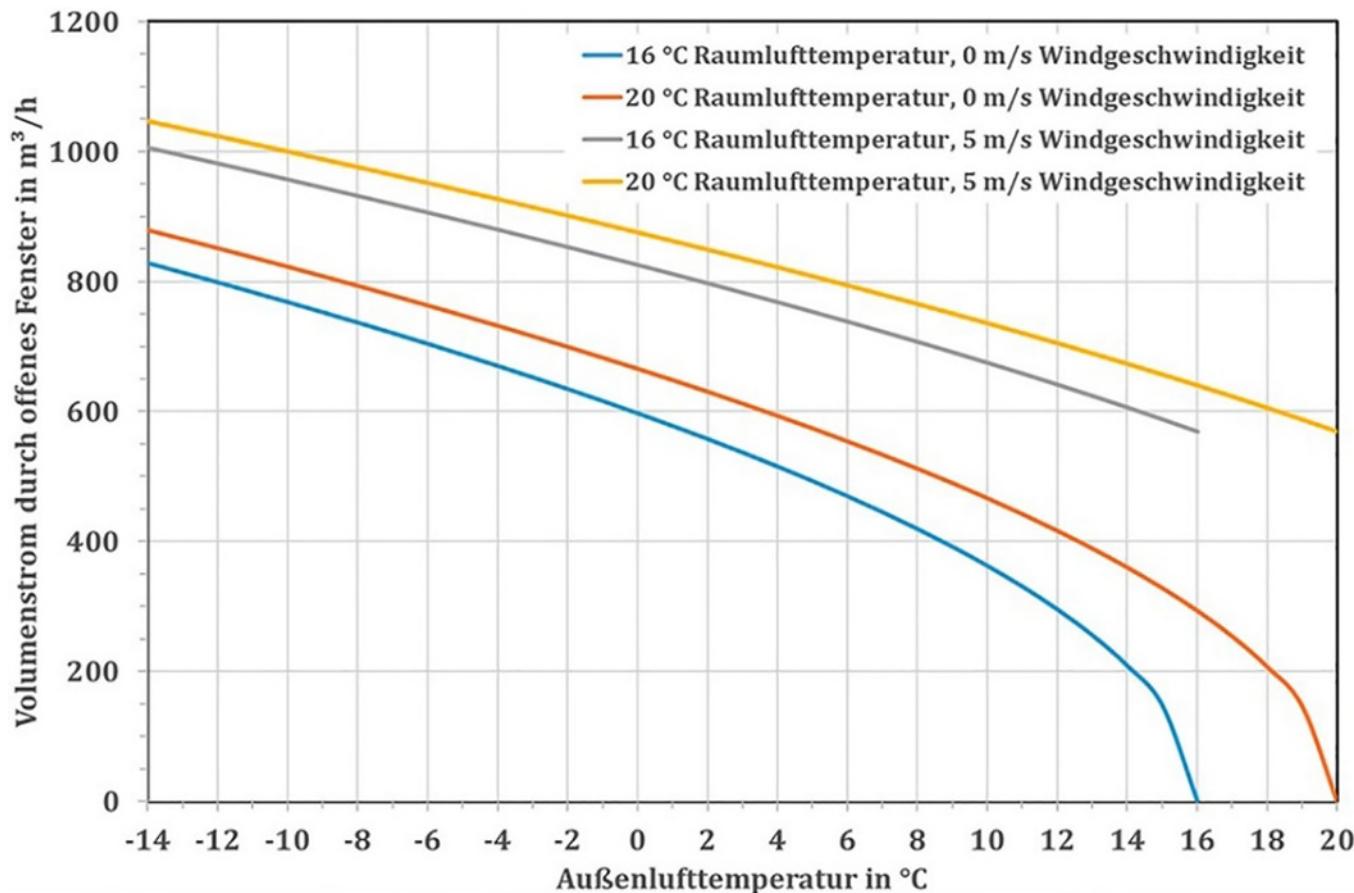
$$k = 1 / (1 / 2,62 \text{ W/m}^2\text{/K} + 0,2 \text{ m} / 0,4 \text{ W/m/K} + 1 / 15,15 \text{ W/m}^2\text{/K})$$

$$k = 1,06 \text{ W/m}^2\text{/K}$$

$$\dot{Q} = 1,06 \text{ W/m}^2\text{/K} \cdot (10 \cdot 4) \text{ m}^2 \cdot (22 - 0) \text{ K} = 929 \text{ W}$$



Beispiel einer Fensterlüftung (voll geöffnet) nach DIN SPEC 4108-8 für ein Fenster mit 1,12 m² (2,74 m Höhe Lüftungszone, 0,25 m Rauheitsparameter)



Lüftungswärmebedarf

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta \vartheta$$

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho$$

\dot{m} Massenstrom Luft [kg/s]

\dot{V} Volumenstrom [m^3/s]

ρ Dichte des Medium [kg/m^3]

c_p spezifische Wärmekapazität [kJ/kG/K]

$\Delta \vartheta$ Temperaturdifferenz Zuluft zum Raum [K]

Lüftungsbedarf

- Versorgung mit Außenluft
- Abführen von Lasten
 - Wärmelasten (Heiz- und Kühllast)
 - Stofflasten
- Abhängig von z. B. Personenbelegung (auch CO₂)
- Abhängig von der Außenluftqualität
- Abhängig von der geforderten Zuluft- / Raumluftqualität
- Abhängig von Schadstoffen (Konzentrationen)

Auslegungsbedingungen

Die wichtigsten **Auslegungsbedingungen** in Bezug auf das **thermische Raumklima** betreffen die **Bekleidung** und die **Aktivität** der sich im Raum aufhaltenden **Personen**. Thermische Behaglichkeit bei bestimmter Bekleidung und bestimmter **Aktivität** wird deshalb hauptsächlich von der **operativen Temperatur** und der **Luftgeschwindigkeit** beeinflusst. Weitere Einflüsse, wie der **vertikale Lufttemperaturgradient**, warme und kalte **Fußböden** sowie **Strahlungsasymmetrie** sind zu beachten.

Die Auslegungsbedingungen für Bekleidung und Aktivitäten in Bürogebäuden oder an ähnlichen Arbeitsplätzen für sitzende Tätigkeiten sind in EN 16798-1 enthalten.

Lufttemperatur und operative Temperatur

In den meisten Fällen kann die **mittlere Raumlufttemperatur** als **Auslegungstemperatur** verwendet werden; aber insbesondere dann, wenn die Temperaturen großer Raumoberflächen sich wesentlich von den Lufttemperaturen unterscheiden, sollte die **operative Temperatur** verwendet werden.

Bei den meisten Anwendungen innerhalb des Anwendungsbereiches dieser Norm sind die **Luftgeschwindigkeiten** gering ($< 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), und es bestehen ebenfalls nur geringe **Unterschiede** zwischen der **Lufttemperatur** und der mittleren **Strahlungstemperatur** im Raum ($< 2 \text{ K}$).

Tabelle B.5 EN 16798-1 (Winter 14 bis 25 °C / Sommer 21 bis 28 °C)

Daher ist in dieser Norm die **operative Temperatur** für einen bestimmten Ort im Raum wie folgt definiert:

$$\vartheta_o = (\vartheta_a + \vartheta_r) / 2$$

- ϑ_o die operative Temperatur am betrachteten Ort im Raum;
 ϑ_a die **Raumlufstemperatur**;
 ϑ_r die **mittlere Strahlungstemperatur** aller Oberflächen (Wände, Fußboden, Decke, Fenster, Heizkörper usw.) bezogen auf den betrachteten Ort im Raum.

Weitere Angaben zur operativen Temperatur sind in EN ISO 7726 und EN ISO 7730 enthalten. Die Auslegungswerte für die operative Temperatur in Bürogebäuden sind in EN 16798-1 angegeben.

Wenn nicht anders vereinbart, muss die festgelegte operative Temperatur für einen Bereich in der Mitte des Raumes bei einer Höhe von 0,6 m über dem Boden gelten.

Tabelle B.2 — Beispiele für empfohlene Auslegungswerte der operativen Innenraumtemperatur von Gebäuden und RLT-Anlagen

Gebäude- bzw. Raumtyp	Kategorie	Operative Temperatur °C	
		Mindestwert Heizperiode (Winter), ~ 1,0 clo	Höchstwert Kühlperiode (Sommer), ~ 0,5 clo
Wohngebäude:	I	21,0	25,5
Wohnräume	II	20,0	26,0
Sitzend ~1,2 met	III	18,0	27,0
Wohngebäude:	I	18,0	
Stehend, gehend ~1,5 met	II	16,0	
	III	14,0	

Tabelle B.2 — Beispiele für empfohlene Auslegungswerte der Innenraumtemperatur von Gebäuden und RLT-Anlagen

Gebäude- bzw. Raumtyp	Kategorie	Operative Temperatur °C	
		Mindestwert	Höchstwert
		Heizperiode	Kühlperiode
		(Winter), ~ 1,0 clo	(Sommer), ~ 0,5 clo
Büro:	I	21,0	25,5
Sitzend ~1,2 met	II	20,0	26,0
	III	19,0	27,0

Tabelle NA.2 — Standardkategorien für die Auslegung maschinell geheizter und gekühlter Gebäude

Kategorie	Erwarteter Prozentsatz Unzufriedener	mittleres Votum PMV
I	< 6	-0,2 < PMV < 0,2
II	< 10	-0,5 < PMV < 0,5
III	< 15	-0,7 < PMV < 0,7
IV	< 25	-1,0 < PMV < 1,0

Raumluftfeuchte

Bei Gebäuden, die keinen anderen Anforderungen als denen der menschlichen Nutzung unterliegen (z. B. Büros, Schulen und Wohngebäude), ist eine Be- oder Entfeuchtung gewöhnlich nicht erforderlich. Nur in speziellen Gebäuden, wie z. B. in Museen usw. ist sie erforderlich. Für den Einsatz von Be- oder Entfeuchtung werden die in Tabelle B.16 angegebenen Werte empfohlen.

Tabelle B.16 — Beispiel für empfohlene Auslegungskriterien für die Luftfeuchte in genutzten Räumen, wenn Be- oder Entfeuchtungsanlagen eingebaut sind

Gebäude-/Raumtyp	Kategorie	Auslegungswert der relativen Luftfeuchte für Entfeuchtung %	Auslegungswert der relativen Luftfeuchte für Befeuchtung %
Räume, deren Feuchtekriterien durch menschliche Nutzung bestimmt werden. Spezielle Räume (Museen, Kirchen usw.) können andere Grenzwerte erfordern.	I	50	30
	II	60	25
	III	70	20

erforderliche Lüftungsrate bei Verdünnung (Verunreinigung)

$$Q_h = G_h / (C_{h,i} - C_{h,o}) / \varepsilon_v$$

Q_h durch Verdünnung erforderliche **Lüftungsrate** [m^3/s]

G_h die **Stofflast einer Verunreinigung** [mg/s]

$C_{h,i}$ der **Richtwert für eine Verunreinigung** [mg/m^3]

$C_{h,o}$ Konzentration in der Zuluft [mg/m^3]

ε_v **Lüftungseffektivität**

Lüftungseffektivität

$$\varepsilon_v = (c_E - c_S) / (c_I - c_S)$$

ε_v Lüftungseffektivität (1 = ideale **Mischlüftung**)

> 1 **Quelllüftung** und < 1 Kurzschlusslüftung)

c_E Verunreinigungskonzentration Abluft [mg/m³]

c_S Verunreinigungskonzentration Zuluft [mg/m³]

c_I Verunreinigungskonzentration Atemluft [mg/m³]

In **Tabelle E.1** werden einige übliche Bereiche für die Lüftungseffektivität vorgestellt. Da die Lüftungseffektivität in realen Anlagen von vielen Parametern abhängt, wird eine Berechnung von Fall zu Fall empfohlen. Weitere Hinweise können der Literatur entnommen werden. Das REHVA Guidebook Nr. 2 enthält grundlegende Informationen und weitere Hinweise.

Tabelle E.1 — Übliche Werte für die Lüftungseffektivität

Luftverteilung	Kaltluftstrahlen $\Delta\varrho < 0 \text{ K}$		Warmluftstrahlen		
	Effektive Geschwindigkeit	Lüftungs-effektivität	$\Delta\varrho$ (Zuluft)	Niedrige Decke	Hohe Decke
Horizontaler Mischstrahl	> 1,5 m/s	0,9 – 1,1	< 10 °C	0,8 – 1	Nicht empfohlen
	< 0,5 m/s	0,7 – 0,9	> 15 °C oder 20 °C	0,4 – 0,8	Nicht empfohlen
Vertikaler Mischstrahl	Alle Verteiler		< 10 °C	0,6 – 0,8	0,8 – 1 ^a
		0,9 – 1,1	> 15 °C	0,4 – 0,8	Nicht
Verdrängungslüftung		1,0 – 2,0		0,2 – 0,7	empfohlen

^a Die Anwendung dieses Wertes setzt voraus, dass die verwendeten Verteiler eine kraftbetriebene Geometrie oder Wirbelung aufweisen. Bei Verwendung von Verteilern mit fester Geometrie ist der Wert auf eine Verwendung im Heizbetrieb (nicht bei Kühlung) beschränkt; bei der Wahl ist sorgfältig vorzugehen und $\Delta\varrho$ zu berücksichtigen.

Tabelle 7 — Klassifizierung der Abluft (ETA) und der Fortluft (EHA) Kategorie und Beschreibung

Abluft mit geringem Verunreinigungsgrad [ETA 1 / EHA 1]

Luft aus Räumen, deren Hauptemissionsquellen Baustoffe und das Bauwerk sind; ebenso Luft aus Aufenthaltsräumen, deren Hauptemissionsquellen der menschliche Stoffwechsel, Baustoffe und das Bauwerk sind. Räume, in denen **Rauchen gestattet** ist, sind **nicht eingeschlossen**.

Abluft mit mäßigem Verunreinigungsgrad [ETA 2 / EHA 2]

Luft aus Aufenthaltsräumen, die stärker verunreinigt ist als Kategorie 1 und deren Verunreinigungen denselben Quellen entstammen und/oder durch menschliche Aktivitäten entstehen.

Tabelle 3 — Klassifizierung der Abluft (ETA) und der Fortluft (EHA) Kategorie und Beschreibung

Abluft mit hohem Verunreinigungsgrad [ETA 3 / EHA 3]

Luft aus Räumen, in denen Emissionen durch Feuchte, Arbeitsverfahren, Chemikalien, **Tabakrauch** usw. die Luftqualität wesentlich beeinträchtigen.

Abluft mit sehr hohem Verunreinigungsgrad [ETA 4 / EHA 4]

Luft, die Gerüche und Verunreinigungen enthält, deren **Konzentrationen deutlich höher liegen**, als für die Raumluft in **Aufenthaltsbereichen** erlaubt ist.

Tabelle 8 — Klassifizierung der Außenluft (ODA) Kategorie und Beschreibung

ODA 1

Saubere Luft, die nur zeitweise staubbelastet sein darf (z. B. Pollen)

ODA 2

Außenluft mit hoher Konzentration an Staub oder Feinstaub und/oder gasförmigen Verunreinigungen

ODA 3

Außenluft mit sehr hoher Konzentration an gasförmigen Verunreinigungen und/oder Staub oder Feinstaub

Die Klassifizierung nach Tabelle 8 muss getrennt für gasförmige (G) und partikelförmige (P) ODA-Schadstoffe ausgeführt werden.

Die Anwendung einer derartigen Klassifizierung hängt von der Definition der Kriterien ab. Als Ausgangspunkt wird die folgende Herangehensweise vorgeschlagen.

ODA 1 gilt, wenn die **WHO-Richtlinien (2005)** und alle nationalen Normen oder -vorschriften zur Qualität der Außenluft eingehalten werden.

ODA 2 gilt, wenn die Verunreinigungskonzentrationen die **WHO-Richtlinien** oder nationale Normen oder -vorschriften zur Qualität der Außenluft um einen Faktor **bis zu 1,5** überschreiten.

ODA 3 gilt, wenn die Verunreinigungskonzentrationen die **WHO-Richtlinien** oder nationale Normen oder -vorschriften zur Qualität der Außenluft um einen Faktor von **mehr als 1,5** überschreiten.

Klassifizierung der Außenluft

Da es nicht für alle Verunreinigungen Richtlinien oder Verordnungen gibt und die, die bestehen, für die einzelnen Länder verschieden sind, ist eine differenzierte Beurteilung durch den Planer erforderlich. Die möglichen Auswirkungen nicht nur einzelner Verunreinigungen sondern auch von Verunreinigungsgemischen sind zu berücksichtigen.

Übliche gasförmige Verunreinigungen, die bei der Bewertung der Außenluft für die Auslegung von Lüftungs- und Raumkühlsystemen berücksichtigt werden müssen, sind **Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid, Stickstoffoxide** und **flüchtige organische Verbindungen (VOC)**. Bei der Beurteilung der Schädlichkeit von gasförmigen Verunreinigungen sollten sowohl die Toxizität als auch die Reaktivität des Gases berücksichtigt werden.

Klassifizierung der Außenluft

Schwebstoffe beziehen sich auf die **Gesamtmenge** fester oder flüssiger **Partikel** in der Luft, von sichtbarem Staub bis zu submikroskopischen Teilchen. Die meisten Richtlinien zur Außenluft beziehen sich auf **PM10** (Schwebstoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser bis zu $10 \mu\text{m}$); es wird jedoch auch in zunehmendem Maße anerkannt, dass aus Gründen des Gesundheitsschutzes kleinere Partikel stärker zu berücksichtigen sind und als Kriterium ein Grenzwert für die Partikelkonzentration bis zu $2,5 \mu\text{m}$ (**PM2,5**) anzuwenden ist.

Die WHO gibt Werte für beide an. Wenn biologische Partikel berücksichtigt werden müssen, ist nicht die Partikelkonzentration maßgeblich, sondern die **mikrobiologische Qualität** der **Luft zu beachten**.

Klassifizierung der Zuluft (Anhang B.4)

Als Ausgangspunkt wird die folgende Herangehensweise vorgeschlagen:

- **SUP 1** gilt, wenn die Zuluft die Grenzwerte der **WHO-Richtlinien (2005)** und alle nationalen Normen oder Vorschriften zur Qualität der Luft mit einem **Faktor** von **0,25** einhält;
- **SUP 2** gilt, wenn die Zuluft die Grenzwerte der **WHO-Richtlinien (2005)** mit einem **Faktor** von **0,5** einhält;
- **SUP 3** gilt, wenn die Zuluft die Grenzwerte der **WHO-Richtlinien (2005)** mit einem **Faktor** von **0,75** einhält;
- **SUP 4** gilt, wenn die Zuluft die Grenzwerte der **WHO-Richtlinien (2005)** **einhält.**

Tabelle 6 Schlüsselverunreinigungen, Partikel

Verunreinigung	Mittlere Einwirkzeit	Guidline value 2008/50/EC	Guidline value WHO 2005
Partikel			
PM_{2,5}	24 h		25 µg/m ³
PM_{2,5}	1 Jahr		10 µg/m ³
PM₁₀	24 h	50 µg/m ³ max. 35 d überschreitend	50 µg/m ³
PM₁₀	1 Jahr	40 µg/m ³	20 µg/m ³

Hinweis: WHO 2005 führte PM_{2,5} ein.

Tabelle 6 Schlüsselverunreinigungen, Gase

Verunreinigung	Mittlere Einwirkzeit	Guidline value 2008/50/EC	Guidline value WHO 2005
Gase			
SO_2	10 Min		500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
SO_2	1 h	350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ max. 24 h überschreitend	
SO_2	24 h	125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ max. 3 d überschreitend	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
O_3	8 h		100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Verunreinigung	Mittlere Einwirkzeit	Guidline value 2008/50/EC	Guidline value WHO 2005
NO ₂	1 Jahr	40 µg/m ³	40 µg/m ³
NO ₂	24h	10 µg/m ³	
Benzol	1 Jahr	5 µg/m ³	
CO	24 h	10 mg/m ³	
Blei	1 Jahr	0,5 µg/m ³	

Table 7 — Summary of classification of outdoor air, examples

	<i>Criteria</i>	<i>Stuttgart</i>	<i>London</i>	<i>Madrid</i>
Gaseous Components				
SO ₂	Available data from building area:			
	annual mean µg/m ³	5	3	9
	maximum 24 h µg/m ³	23	26	37
	<i>Days over 125 µg/m³ (max 3 days (EC))</i>	0	0	0
Factor over guideline:				
	EC: 125 µg/m ³ Selected for rating	$23/125 = 0,18 < 1$	$26/125 = 0,21 < 1$	$37/125 = 0,30 < 1$
	WHO 20 µg/m ³	Not used	Not used	Not used

	<i>Criteria</i>	<i>Stuttgart</i>	<i>London</i>	<i>Madrid</i>
Gaseous Components				
O_3	Available data from building area:			
	annual mean $\mu\text{g}/\text{m}^3$	63	31	32
	maximum 8 h	178	86	106
	days over $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	31	4	1
O_3	Factor over guideline:			
	EC $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (maximum 8h)	$178/120 = 1,48$ $< 1,5$	$86/120 = 0,72$ < 1	$106/120 = 0,88$ < 1
	Selected for rating			
NO ₂	WHO $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Not used	Not used	Not used

	<i>Criteria</i>	<i>Stuttgart</i>	<i>London</i>	<i>Madrid</i>
NO ₂	Available data from building area:			
	annual mean µg/m ³	80	67	60
	maximum 1 h µg/m ³	244	176	216
	hours over 200 µg/m ³ 18 days max	21	0	1
	days over 200 µg/m ³ 18 days			
	Factor over guideline			
	40 µg/m ³ (annual mean)			
	200 µg/m ³ (maximum 1h)	$244/200 = 1,22$ $< 1,5$	$176/200 = 0,88$ < 1	$216/200 = 1,08$ $< 1,5$
	Selected for rating			

Table 7 — Summary of classification of outdoor air, examples

	<i>Criteria</i>	<i>Stuttgart</i>	<i>London</i>	<i>Madrid</i>
Particles				
	Available data from building area:			
PM ₁₀	annual mean $\mu\text{g}/\text{m}^3$	34	28	30
	maximum 24 h $\mu\text{g}/\text{m}^3$	109	78	109
	days over 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	42	43	44
	Factor over guideline			
	35 days over 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$42/35 = 1,2$	$43/35 = 1,2$	$44/35 = 1,3$
	Selected for rating	< 1,5	< 1,5	< 1,5

Tabelle 5 — Allgemeine Klassifizierung der Raumluftqualität (IDA) Kategorie und Beschreibung

IDA 1

Hohe Raumluftqualität

IDA 2

Mittlere Raumluftqualität

IDA 3

Mäßige Raumluftqualität

IDA 4

Niedrige Raumluftqualität

Einteilung der Klassen nach EN 15251

Tabelle NA.6 — Grundlegende erforderliche Lüftungsraten für die Abschwächung von Emissionen (biologische Ausdünstungen) von Personen

Kategorie	Erwarteter Prozentsatz Unzufriedener	Luftstrom je Person l / s / pers
I	15	10
II	20	7
III	30	./.
IV	40	< 4

Definition sehr schadstoffarme Gebäude

Für die Beurteilung der Luftqualität im Raum kann eine große Anzahl an Kriterien herangezogen werden, von denen einige über geeignete Messverfahren und andere nur oder in Ergänzung durch eine direkte Bewertung des Menschen (Gerüche) erfasst werden können. Die Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL – erarbeitet seit den 1980er Jahren technische Regeln zur Messung der unten beispielhaft genannten Luftverunreinigungen und zur Bewertung der aufgeführten Geruchskriterien. Die Richtlinienreihen VDI 4300 Blatt 1 (Messstrategie), VDI 4301 (Messtechnik), sowie die Normenreihen DIN ISO 16000 (Messtechnik, Gerüche) und DIN EN ISO 16000 (Messstrategie) beschreiben, wie die Qualität der Raumluft in Gebäuden sinnvoll erfasst und beurteilt werden kann.

Definition sehr schadstoffarme Gebäude

Beispiele für die mit geeigneten Messverfahren erfassbaren Größen der Raumluftqualität sind gasförmige Inhaltsstoffe (z. B. Radon); geeignete Referenzstoffe für Verunreinigungen (z. B. CO₂-Konzentration für die Emissionen von Personen); Partikel und Fasern; partikelgebundene Inhaltsstoffe (z. B. Dioxine / PCB, Flammschutzmittel); Schimmelpilze; Bakterien.

Zu den nur durch den Menschen bewertbaren Kriterien für die Luftqualität gehören:

- Geruchsintensität;
- Geruchseindruck / Hedonik;
- Akzeptanz (empfundene Luftqualität).

Beispiel für die Definition von schadstoffarmen Gebäuden (Anhang C)

Das Gebäude ist schadstoffarm, wenn die **Mehrheit der verwendeten Baustoffe schadstoffarm** ist. **Schadstoffarme Baustoffe** sind üblicherweise natürliche Materialien, wie Stein oder Glas, die als **emissionssicher** gelten, sowie Materialien, die folgende Anforderungen erfüllen:

- Emission der gesamten flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC) liegt unterhalb von 0,2 mg/m²/h;
- Emission von Formaldehyd liegt unterhalb von 0,05 mg/m²/h;
- Emission von Ammoniak liegt unterhalb von 0,03 mg/m²/h;
- Emission von krebserregenden Verbindungen (IARC) liegt unterhalb von 0,005 mg/m²/h;
- Material ist geruchlos (Unzufriedenheit in Bezug auf den Geruch liegt unterhalb von 15 %).

Beispiel für die Definition sehr schadstoffarmen Gebäuden

Das Gebäude ist sehr schadstoffarm, wenn **alle verwendeten Baustoffe sehr schadstoffarm** sind und in dem Gebäude nie geraucht wurde und auch nicht zulässig ist. **Sehr schadstoffarme Baustoffe** sind üblicherweise natürliche Materialien, wie Stein, Glas oder Metall, die als **emissionssicher** gelten, sowie Materialien, die folgende Anforderungen erfüllen:

- Emission der gesamten flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC) liegt unterhalb von 0,1 mg/m²/h;
- Emission von Formaldehyd liegt unterhalb von 0,02 mg/m²/h;
- Emission von Ammoniak liegt unterhalb von 0,01 mg/m²/h;
- Emission von krebserregenden Verbindungen (IARC) liegt unterhalb von 0,002 mg/m²/h;
- Material ist geruchlos (Unzufriedenheit in Bezug auf den Geruch liegt unterhalb von 10 %).

**Tabelle NA.8 — Beispiel für Auslegungs-
Außenluftvolumenstrom für ein Einzelbüro von 10 m² in einem
schadstoffarmen Gebäude (unangepasste Person)**

Kategorie	Schadstoffarmes Gebäude $l/s \cdot m^2$	Luftvolumenstrom je unangepasste Person l/s je Person	Gesamtwert des Auslegungs- Außenluftvolumenstroms für den Raum		
			l/s	l/s je Person	$l/s \cdot m^2$
I	1,0	10	20	20	2
II	0,7	7	14	14	1,4
III	0,4	4	8	8	0,8
IV	0,3	2,5	5,5	5,5	0,55

Tabelle 12 — Mögliche Arten der Regelung der Raumluftqualität (IDA-C)

Kategorie und Beschreibung

IDA – C1 / Die Anlage läuft konstant.

IDA – C2 / Manuelle Regelung (Steuerung)

Die Anlage unterliegt einer manuellen Schaltung.

IDA – C3 / Zeitabhängige Regelung (Steuerung)

Die Anlage wird nach einem vorgegebenen Zeitplan betrieben.

IDA – C4 / Belegungsabhängige Regelung (Steuerung)

Die Anlage wird abhängig von der Anwesenheit von Personen betrieben (Lichtschalter, Infrarotsensoren usw.).

Tabelle 6 — Mögliche Arten der Regelung der Raumluftqualität (IDA-C)

Kategorie und Beschreibung

IDA – C5 / Bedarfsabhängige Regelung (Anzahl der Personen)

Die Anlage wird abhängig von der Anzahl der im Raum anwesenden Personen betrieben.

IDA – C6 / Bedarfsabhängige Regelung (Gassensoren)

Die Anlage wird durch Sensoren geregelt, die Raumluftparameter oder angepasste Kriterien messen (z. B. CO₂-, Mischgas- oder VOC-Sensoren). Die angewendeten Parameter müssen an die Art der im Raum ausgeübten Tätigkeit angepasst sein.

Tabelle 14 — Volumenströme der Außen- oder Überströmluft je Bodenflächeneinheit (Nettofläche) für Räume, die nicht für den Aufenthalt von Personen bestimmt sind

Volumenstrom der Außen- oder Überströmluft je Kategorie Einheit

Bodenflächeneinheit	Üblicher Bereich	Standardwert
SUP 1 [l / s/ m ²]	x	x
SUP 2 [l / s/ m ²]	> 0,7	0,83
SUP 3 [l / s/ m ²]	0,35 – 0,7	0,55
SUP 4 [l / s/ m ²]	< 0,35	0,28

x) Für SUP 1 ist dieses Verfahren nicht ausreichend.

Diese Werte beruhen auf einer Betriebszeit von 50 % und einer Raumhöhe von bis zu 3 m. Bei kürzeren Betriebszeiten und höheren Räumen sollten die Luftvolumenströme höher sein.

Anmerkung: In EN 13779 noch basierend auf IDA

Tabelle NA.9 — Standardauslegungswerte für die CO₂-Konzentration oberhalb der Konzentration in Außenluft

Der CO₂-Gehalt kann zur Auslegung eines bedarfsgeregelten Systems verwendet werden.

CO₂-Gehalt in Räumen

CO₂-Gehalt über dem Gehalt in der Außenluft, in ppm

Kategorie	Üblicher Bereich (nach alter Norm 15251)	Standardwert
I	≤ 400	350
II	400 – 600	550
III	600 – 1.000	900
IV	1.000	1.350

Bei CO₂-Konzentrationen in der Raumluft von mehr als 1 000 ppm sind bei Arbeitsstätten die Maßnahmen nach der Technischen Regel für Arbeitsstätten Lüftung (ASR A3.6) zu beachten.

A.17.4 Geräte

Als Grundlage für die Auslegung der RLT-Anlage sind **sämtliche Geräte mit maßgeblichen Emissionen** im belüfteten Raum zu definieren.

In Bürogebäuden beträgt die **Wärmelast durch Geräte** üblicherweise **25 W · Person⁻¹ bis 200 W · Person⁻¹**, gemittelt über die Nutzungsdauer. Ein **Standardwert für Bürogebäude ist 100 W · Person⁻¹** über 8 h am Tag.

A.17.2 Personen

Die **Wärmeerzeugung** durch **Personen** besteht aus einem **sensiblen Teil (Strahlung zuzüglich Konvektion)** und einem **latenten Teil (Dampfemission)**. Für den Temperaturanstieg ist nur der sensible Teil von Bedeutung.

Tabelle A.13 enthält Werte für die Wärmeerzeugung von sich im Raum aufhaltenden Personen, die auf einer Lufttemperatur von **24 °C** beruhen. Bei höheren Temperaturen bleibt die Gesamtwärmeerzeugung gleich, die sensiblen Wärmewerte nehmen jedoch ab ($\vartheta_a = 26 °C$: etwa -20 %).

Tabelle A.13 — Wärmeerzeugung durch Personen bei unterschiedlichen Aktivitäten (Lufttemperatur 24 °C)

Aktivität	Gesamtwärme		Sensible Wärme
	met^a	W · Person⁻¹^b	W · Person⁻¹
Zurückgelehnt	0,8	80	55
Entspannt sitzend	1,0	100	70
Sitzende Tätigkeit (Büro, Schule)	1,2	125	75
Stehend, leichte Tätigkeit (Einkaufen, Leichtindustrie)	1,6	170	85
Stehend, mittelschwere Tätigkeit (Verkäufer, Arbeit an Maschinen)	2,0	210	105
Gehend, 5 km · h ⁻¹	3,4	360	120

^a 1 met = 58 W · m⁻²

^b Gerundete Werte für einen menschlichen Körper mit einer Oberfläche von 1,8 m² · Person⁻¹

Beispiel

IDA 2 Nichtraucherbereich 12,5 l / s / Person

Annahme: 50 Personen

$$\dot{V}_{AUL} = 50 \cdot 12,5 \text{ l/s} = 625 \text{ l/s} = 2.250 \text{ m}^3/\text{h} \quad [\text{Tab. A.11}]$$

$$\dot{V}_{\text{Fläche}} = 30 \text{ m} \cdot 10 \text{ m} \cdot 0,83 \text{ l/s/m}^2 = 249 \text{ l/s} = 896 \text{ m}^3/\text{h}$$

[Tab. A.9]

Thermische Last (**Innere Lasten Beleuchtung und Geräte**)

Beispiel Maschinen mit $\dot{Q} = 4.500 \text{ W}$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta$$

$$\dot{m} = \dot{Q} / c_p / \Delta\vartheta$$

$$\dot{m} = 4,5 \text{ kJ/s} / 1,004 \text{ kJ/kg/K} / 7 \text{ K} = 0,641 \text{ kg/s}$$

$$\dot{V} = 0,641 \text{ kg/s} / 1,2 \text{ kg/m}^3 = 0,534 \text{ m}^3/\text{s} = 1.923 \text{ m}^3/\text{h}$$

Thermische Last (**Innere Lasten durch Personen**)

Beispiel 50 Personen a **125 W (Büro)** $\dot{Q} = 6.250 \text{ W}$

$$\dot{Q} = m \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta$$

$$\dot{m} = \dot{Q} / c_p / \Delta\vartheta$$

$$\dot{m} = 6,25 \text{ kJ/s} / 1,004 \text{ kJ/kg/K} / 7 \text{ K} = 0,889 \text{ kg/s}$$

$$\dot{V} = 0,889 \text{ kg/s} / 1,2 \text{ kg/m}^3 = 0,741 \text{ m}^3/\text{s} = 2.667 \text{ m}^3/\text{h}$$

Beispiel Transmissionswärme (äußere Last)

$$A = 30 \cdot 10 \cdot 2 + 10 \cdot 4 \cdot 2 + 30 \cdot 10 = 620 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta$$

$$\dot{Q} = 0,82 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 620 \text{ m}^2 \cdot (22 - 0)\text{K} = 11.185 \text{ W}$$

$$\dot{m} = 11,2 \text{ kJ/s} / 1,004 \text{ kJ/kg/K} / 7 \text{ K} = 1,592 \text{ kg/s}$$

$$\dot{V} = 1,592 \text{ kg/s} / 1,2 \text{ kg/m}^3 = 1,327 \text{ m}^3/\text{s} = 4.776 \text{ m}^3/\text{h}$$

Beispiel kombinierte Lasten (Innere und äußere Lasten)

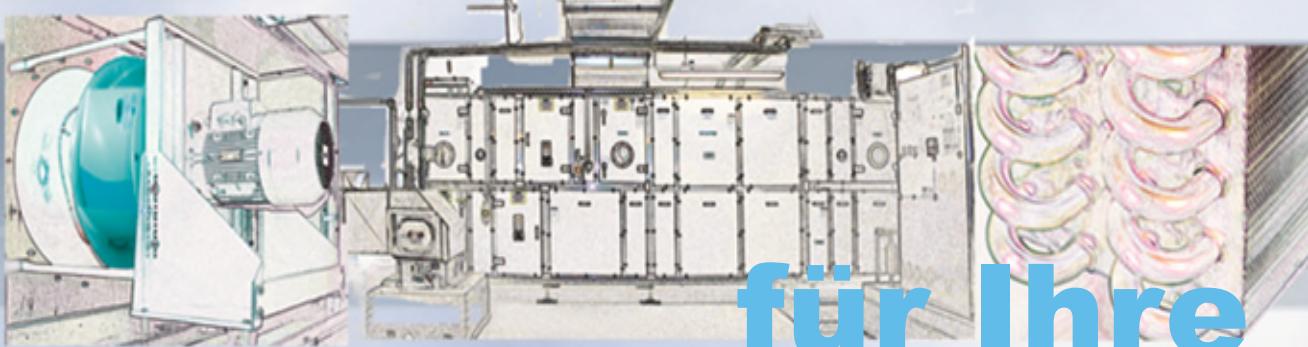
$$\dot{Q} = 11.185 \text{ W} - 4.500 \text{ W} - 6.250 \text{ W} = 435 \text{ W}$$

$$\dot{m} = 0,44 \text{ kJ/s} / 1,004 \text{ kJ/kg/K} / 3 \text{ K} = 0,144 \text{ kg/s}$$

$$\dot{V} = 0,144 \text{ kg/s} / 1,2 \text{ kg/m}^3 = 0,120 \text{ m}^3/\text{s} = 432 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\dot{V}_{\text{Min}} = 2.250 \text{ m}^3/\text{h} \quad \underline{\text{AUL Volumenstrom wird unterschritten!}}$$

Herzlichen Dank



für Ihre
Aufmerksamkeit

Raumlufttechnik Wärmebedarf

Energierückgewinnung und Energieeffizienz-
technologien in der Lüftungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Dr. Christoph Kaup

c.kaup@umwelt-campus.de