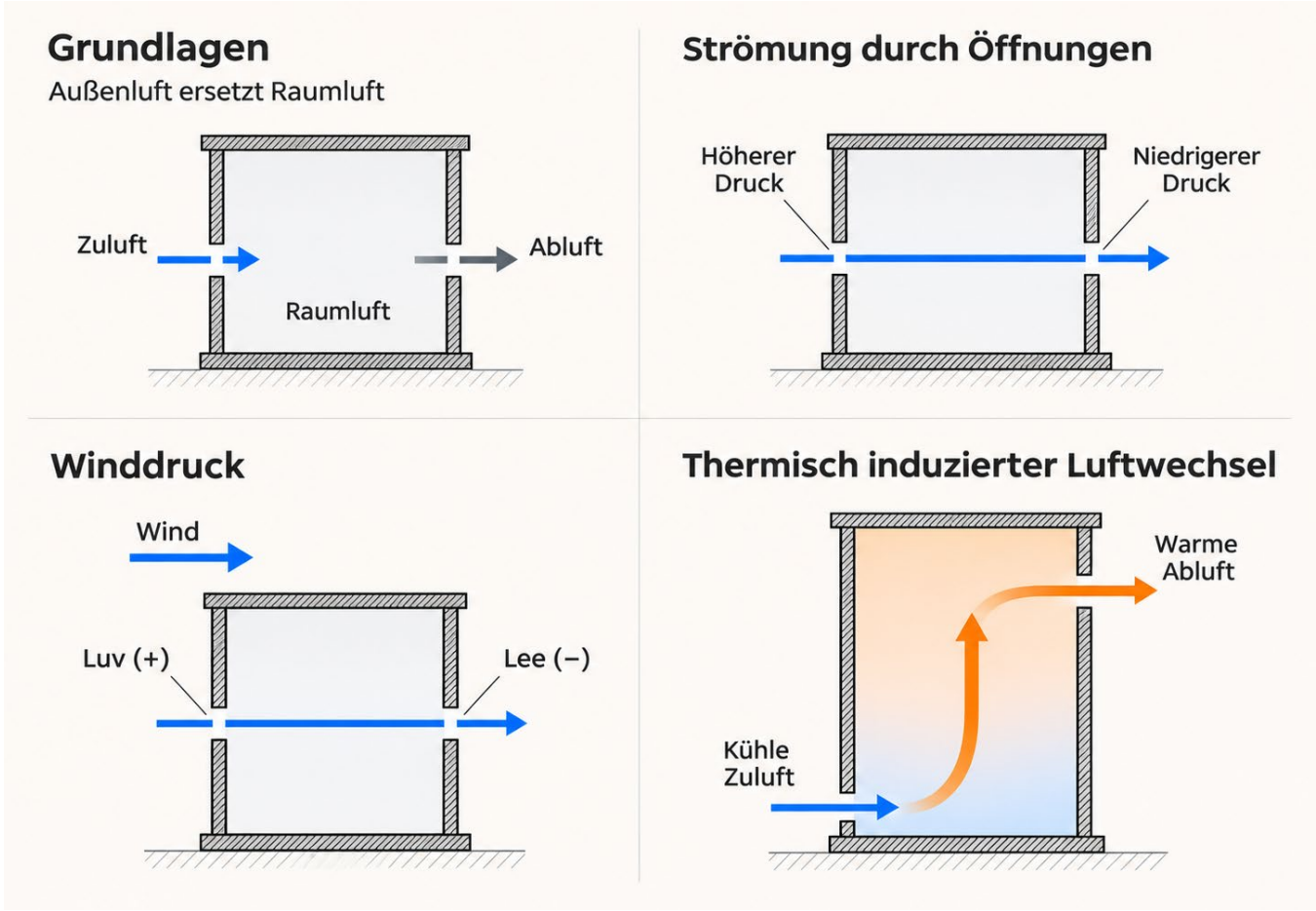
HSLU Hochschule Luzern

Modul Bauphysik Grundlagen

Luftaustausch in Gebäuden

Grundlagen, Strömung durch Öffnungen,
Winddruck und thermisch induzierter Luftwechsel



Dominik Hotz
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Institut für Gebäudetechnik und Energie
Prüfstelle Gebäudetechnik
Technik & Architektur

20. November 2026

Lernziele

1

Luftwechsel beschreiben

Sie berechnen Luftwechselzahl n, Frischluftbedarf (CO_2-Bilanz) und Lüftungswärmeverlust.

2

Strömung durch Öffnungen

Sie bestimmen den Luftvolumenstrom $\dot{V}$ durch Fenster, Fugen und kombinierte Öffnungen (Serie/parallel).

3

Winddruck abschätzen

Sie berechnen Staudruck, Windprofil und Winddruck mit Druckbeiwerten c_p.

4

Thermischen Auftrieb nutzen

Sie berechnen den Kamineffekt, die neutrale Zone und den thermisch induzierten Luftwechsel.

Ablauf der drei Lektionen

Lektion 1

Grundlagen zum Luftaustausch

- Wozu lüften?
- Luftwechselzahl n
- Frischluftbedarf & CO_2
- Lüftungswärmeverlust
- Luftdichtheit

Übungen 1 + 2

Lektion 2

Öffnungen & Winddruck

- Bernoulli & Druckdifferenz
- Grosse Öffnungen, Fugen
- Öffnungen in Serie/parallel
- Staudruck, Windprofil, c_p
- Querlüftung

Übungen 3 + 4

Lektion 3

Thermisch induzierter Luftwechsel

- Luftdichte & Kamineffekt
- Neutrale Zone
- Einseitige Lüftung, Schacht
- Wind + Auftrieb
- Synthese & Quiz

Übungen 5 + 6, Quiz

Einstieg: Was treibt die Luft an?

EINSTIEG · 4 min



Hochhaus im Winter

Warum zieht es im Erdgeschoss eines Hochhauses, während die Türen im obersten Geschoss pfeifen?



Kippen oder Stosslüften?

Ein Kippfenster bleibt den ganzen Tag offen. Warum ist das energetisch und bauphysikalisch problematisch?



Türe knallt zu

Bei Wind schlägt die Zimmertüre zu, wenn auf der Gegenseite ein Fenster geöffnet wird. Was passiert?

Think – Pair – Share: 1 min allein, 2 min zu zweit, dann Plenum

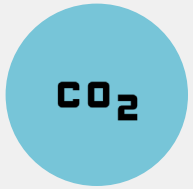
1

Grundlagen zum Luftaustausch

- Aufgaben des Luftaustauschs
- Luftwechselzahl, Frischluftbedarf, CO_2-Bilanz
- Lüftungswärmeverlust und Luftdichtheit

Ziel: Luftwechsel quantifizieren und seine Folgen für Raumluft und Energie beurteilen.

Wozu brauchen Gebäude Luftaustausch?



Luftqualität

CO_2, Gerüche, VOC und Radon abführen. Leitgrösse: CO_2 der Personen.



Feuchteschutz

Wasserdampf aus Kochen, Duschen, Personen abführen → kein Schimmel, kein Kondensat.



Sommerkomfort

Wärmelasten abführen, Nachtauskühlung der Speichermasse.



Energie

Jeder m³ Aussenluft muss im Winter erwärmt werden → Lüftungswärmeverlust.

Zielkonflikt: so viel Aussenluft wie nötig, so wenig wie möglich

Arten des Luftaustauschs

Luftaustausch

Natürlich (frei)

Infiltration	**Fensterlüftung**	**Schachtlüftung**
Fugen, Undichtheiten	Kipp-, Stoss-, Querlüftung	Kamin, Atrium, Treppenhaus

Antrieb: Wind und thermischer Auftrieb

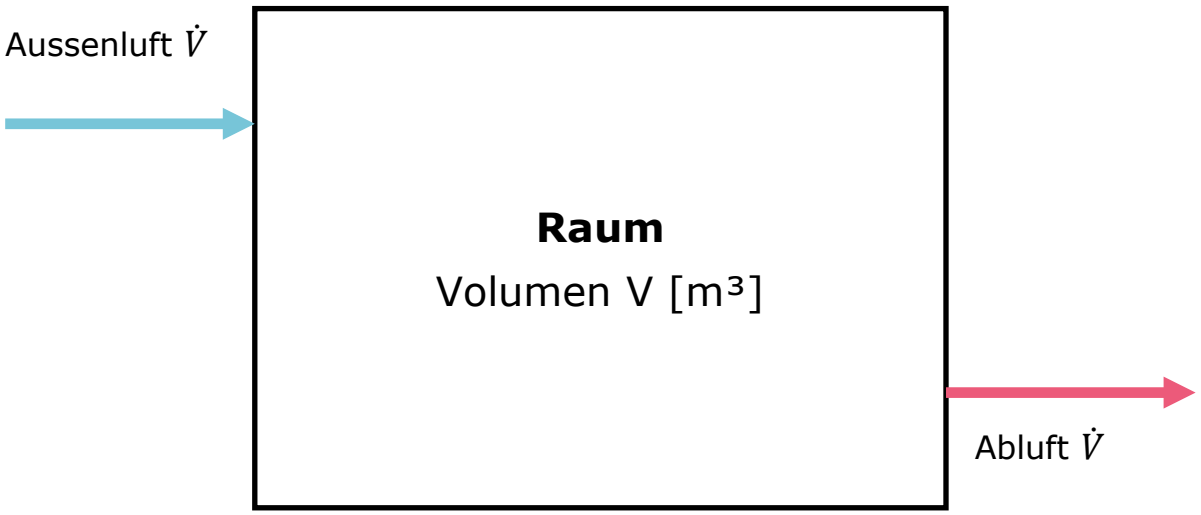
Erzwungen (mechanisch)

Abluftanlage	**Zu-/Abluftanlage**
Unterdruck, Zuluft über Aussenluftdurchlässe	mit Wärmerückgewinnung (WRG)

Antrieb: Ventilator

Gemeinsam ist allen: Luft strömt nur, wenn eine **Druckdifferenz Δp** besteht.

Luftwechselzahl n



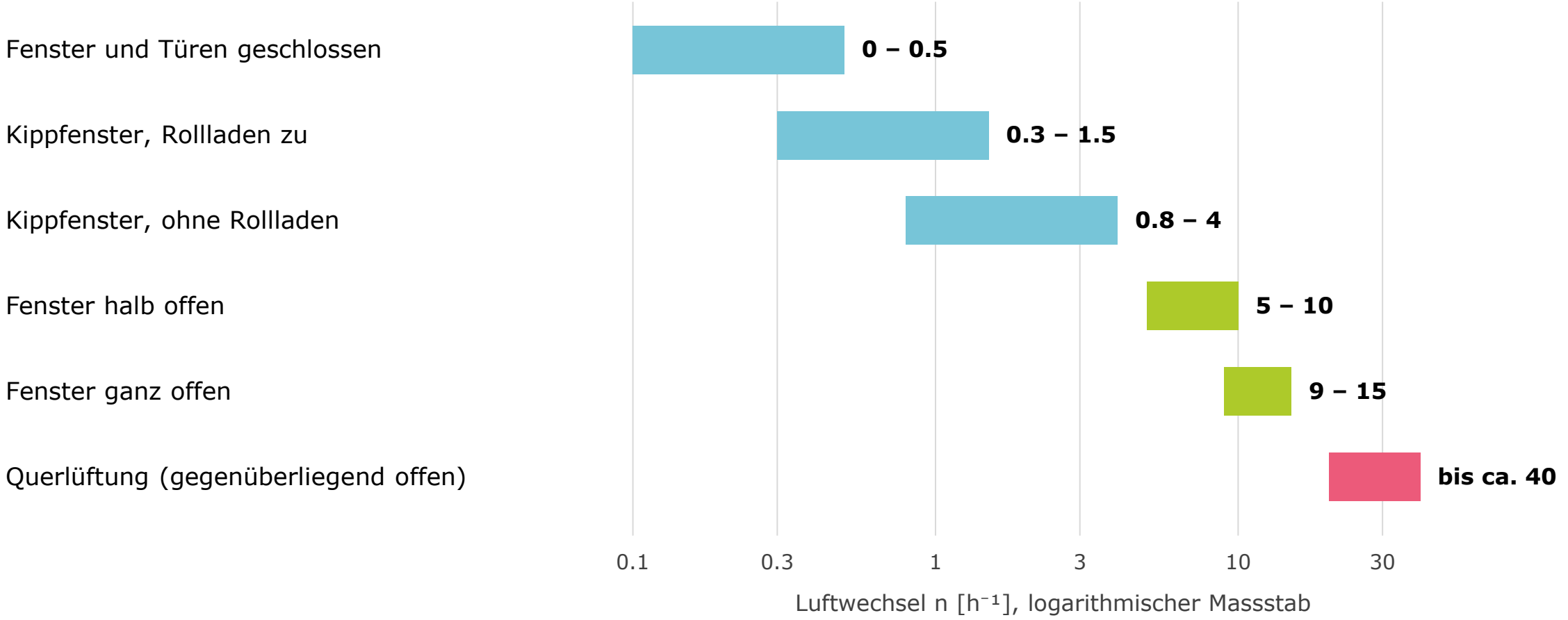
Massenerhaltung: Was einströmt, muss auch wieder ausströmen.

$$n = \frac{\dot{V}}{V} \quad [h^{-1}]$$

$\dot{V}$: Aussenluftvolumenstrom [m³/h] V: Netto-Raumvolumen [m³]

- n = 1 h⁻¹: pro Stunde strömt rechnerisch einmal das Raumvolumen zu.
- Nur Aussenluft zählt – Umluft trägt nicht zum Luftwechsel bei.

Typischer Luftwechsel je nach Fensterstellung



Typische Literaturwerte; tatsächliche Werte hängen stark von Wind und Temperaturdifferenz ab.

Frischluftbedarf aus der CO_2-Bilanz

$$c_i = c_e + \frac{\dot{M}_{CO2}}{\dot{V}}$$

stationär, vollständige Durchmischung

$$\dot{V} = \frac{\dot{M}_{CO2}}{c_i - c_e}$$

→ erforderlicher Aussenluftvolumenstrom

- c_i, c_e: CO_2-Konzentration innen/aussen [m³/m³]
- $\dot{M}_{CO2}$: CO_2-Produktion [m³/h]
- Umrechnung: 1 ppm = 10^{-6} m³/m³

≈ 420 ppm
Aussenluft (c_e)

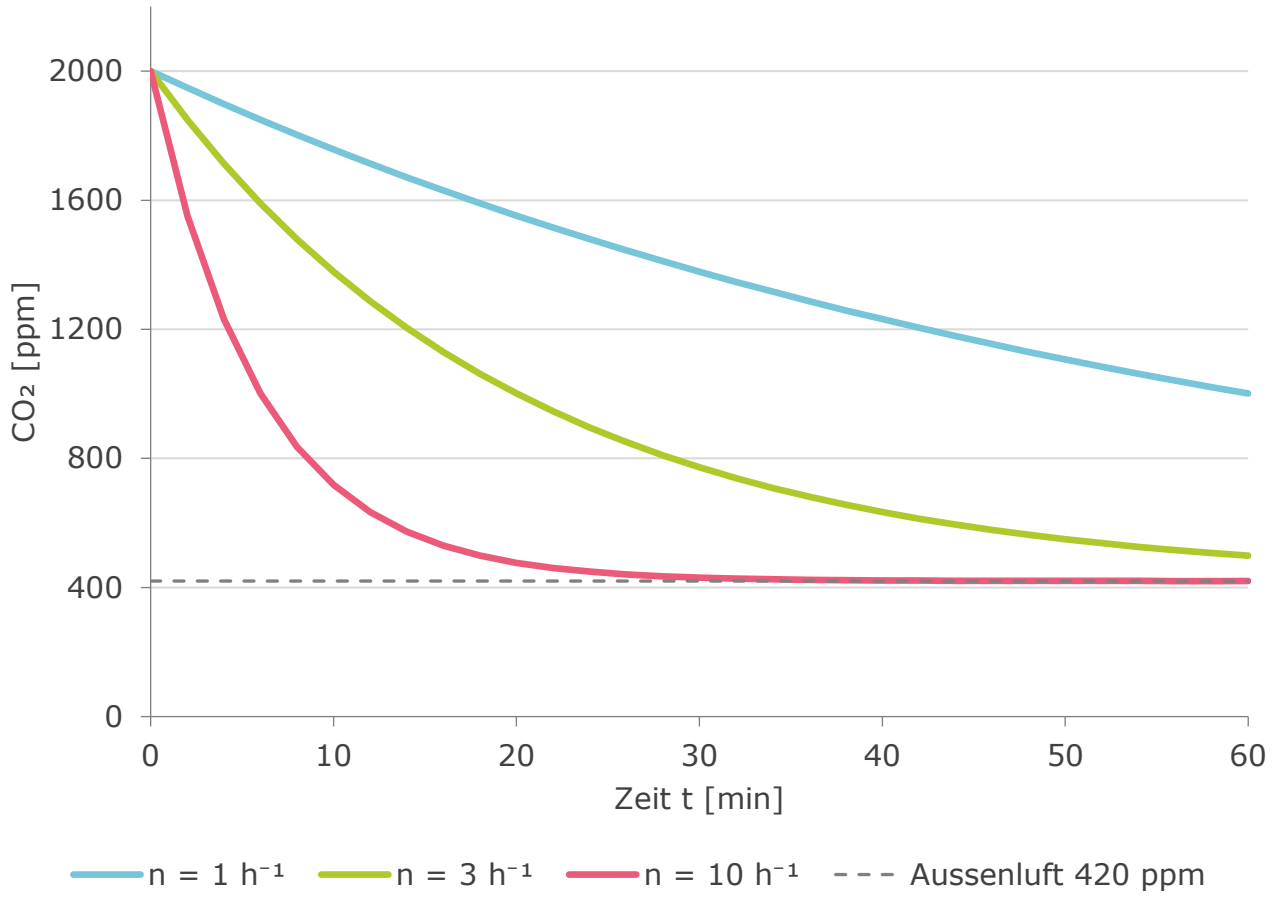
18–20 l/h
CO_2 pro Person, sitzend

1'000 ppm
Pettenkofer-Zahl (Leitwert)

> 2'000 ppm
inakzeptabel (UBA)

Richtwert Frischluft: ca. 25–35 m³/h pro Person

Luftwechsel messen: Abklingverfahren



$$c(t) = c_e + (c_0 - c_e) \cdot e^{-n \cdot t}$$

$$n = \frac{\ln\left[\frac{c_0 - c_e}{c(t) - c_e}\right]}{t}$$

- Quelle aus (Personen verlassen den Raum)
- CO_2 zu Beginn und nach Zeit t messen
- t in Stunden einsetzen → n in h^{-1}

Lüftungswärmeverlust

$$\dot{Q}_v = \rho \cdot c_p \cdot \dot{V} \cdot (\theta_i - \theta_e)$$

$\rho \cdot c_p \approx 1.2\ \text{kg/m}^3 \cdot 1006\ \text{J/kg} \cdot \text{K} \approx 1200\ \text{J/(m}^3\text{K)} \approx 0.34\ \text{Wh/(m}^3\text{K)}$

$$\dot{Q}_v \approx 0.34 \cdot \dot{V} \cdot \Delta\theta \quad [\text{W}]$$

Beispiel: Wohnung V = 250 m³, Δθ = 20 K

- Grundlüftung n = 0.5 h^{-1}: $\dot{V}$ = 125 m³/h
- Kippfenster ganztags n ≈ 3 h^{-1}: $\dot{V}$ = 750 m³/h

850 W

Grundlüftung n = 0.5 h^{-1}

≈ 5.1 kW

Kippfenster ganztags, n ≈ 3 h^{-1}

Faktor 6 – nur durch das Nutzerverhalten

Luftdichtheit der Gebäudehülle

Blower-Door-Messung

- Ventilator erzeugt Δp = ±50 Pa (Unter- und Überdruck)
- Leckagevolumenstrom $\dot{V}_{50}$ messen
- Kennwert $n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V}$ $[h^{-1}]$
- Anforderungen: SIA 180

Faustregel: $n_{Infiltration} \approx n_{50} / 20$

Undichtheiten sind keine Lüftung: Sie sind unkontrolliert, wetterabhängig und führen zu Feuchteschäden.

> 4 h⁻¹

unsanierter Altbau (oft)

≈ 1–2 h⁻¹

Neubau, typisch

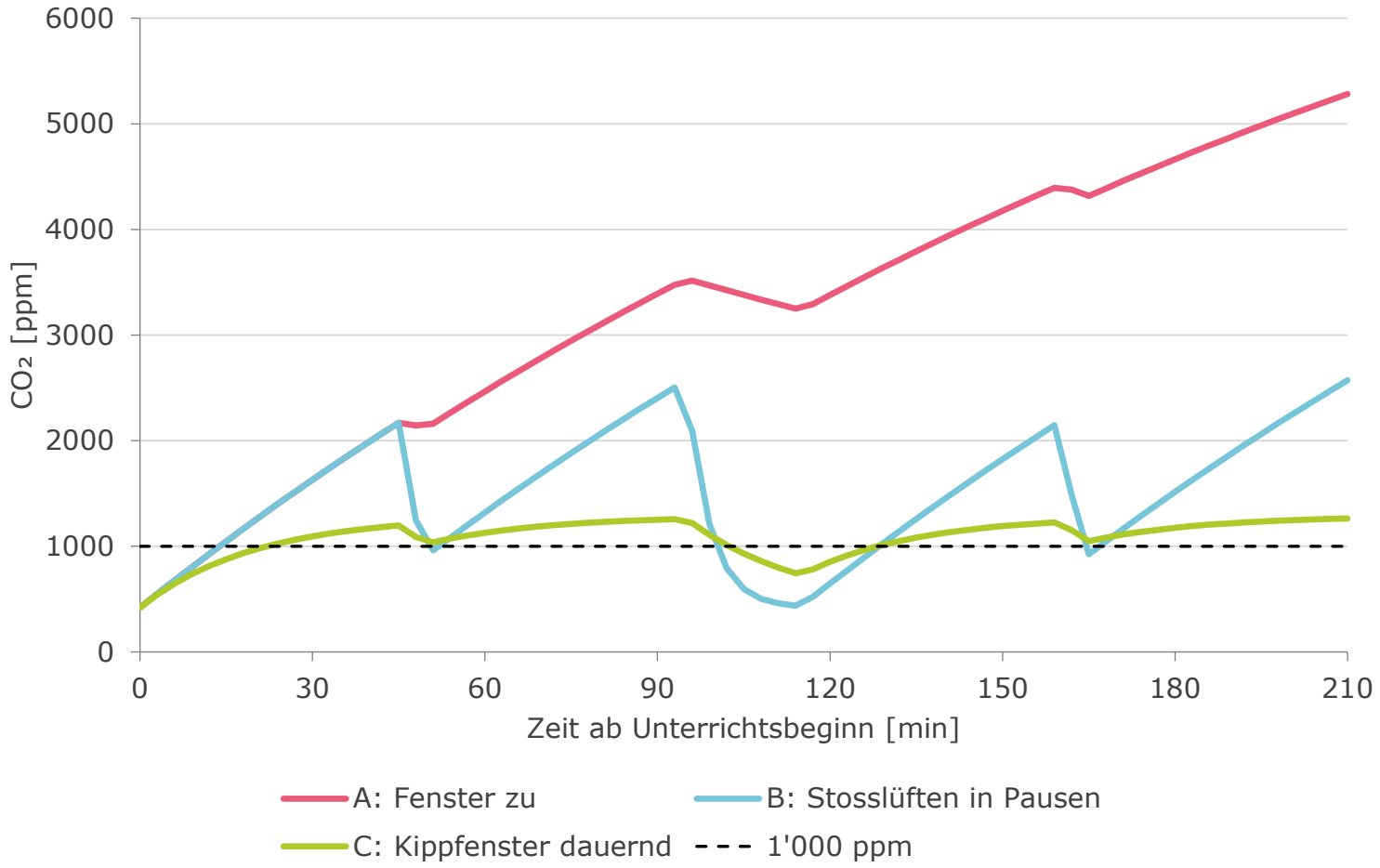
≤ 0.6 h⁻¹

Passivhaus-Standard

n_{50}-Werte: typische Grössenordnungen

Praxisbeispiel: CO_2 im Schulzimmer

PRAXIS



Modellrechnung

- 192 m³, 25 Personen, 4 Lektionen
- A: Fenster zu → über 5'000 ppm
- B: kurze Pausen senken nur auf ca. 1'000 ppm; nach der grossen Pause sind 1'000 ppm nach ca. 13 min wieder überschritten
- C: Kippfenster hält ca. 1'300 ppm – mit hohem Wärmeverlust

Übung 1: Frischluftbedarf im Schulzimmer

ÜBUNG 1 · 8 min

Ein Schulzimmer (8 × 8 × 3 m) wird von 24 Studierenden und 1 Lehrperson genutzt. Wie viel Aussenluft braucht es?

Gegeben

- Raumvolumen V = 192 m³
- CO_2-Abgabe: 20 l/h pro Person
- Aussenluft c_e = 420 ppm
- Grenzen: 1'000 ppm (gut), 2'000 ppm (inakzeptabel)

Aufgaben (Berechnen Sie…)

a) Erforderlicher Aussenluftvolumenstrom $\dot{V}$ und Luftwechsel n für 1'000 ppm

b) Dasselbe für 2'000 ppm

c) Nach wie vielen Minuten sind 1'000 ppm erreicht, wenn die Fenster geschlossen bleiben (Infiltration vernachlässigen)?

8 min · Einzel- oder Partnerarbeit

Übung 2: Abklingmessung und Wärmeverlust

ÜBUNG 2 · 8 min

Nach dem Unterricht verlassen alle das Schulzimmer aus Übung 1. Die Fenster bleiben gekippt. Ein CO_2-Sensor zeichnet den Verlauf auf.

Gegeben

- $V = 192\ m^3$
- $c_0 = 2'200$ ppm (Unterrichtsende)
- $c(20\ min) = 900$ ppm
- $c_e = 420$ ppm
- $\theta_i = 21\ °C$, $\theta_e = 1\ °C$
- Heizöl: ca. 10 kWh pro Liter

Aufgaben (Berechnen Sie…)

a) Luftwechsel n der gekippten Fenster

b) Lüftungswärmeverlust $\dot{Q}_v$ in kW

c) Wärmeverlust, wenn die Fenster 8 h gekippt bleiben, in kWh und in Liter Heizöl

8 min · Partnerarbeit

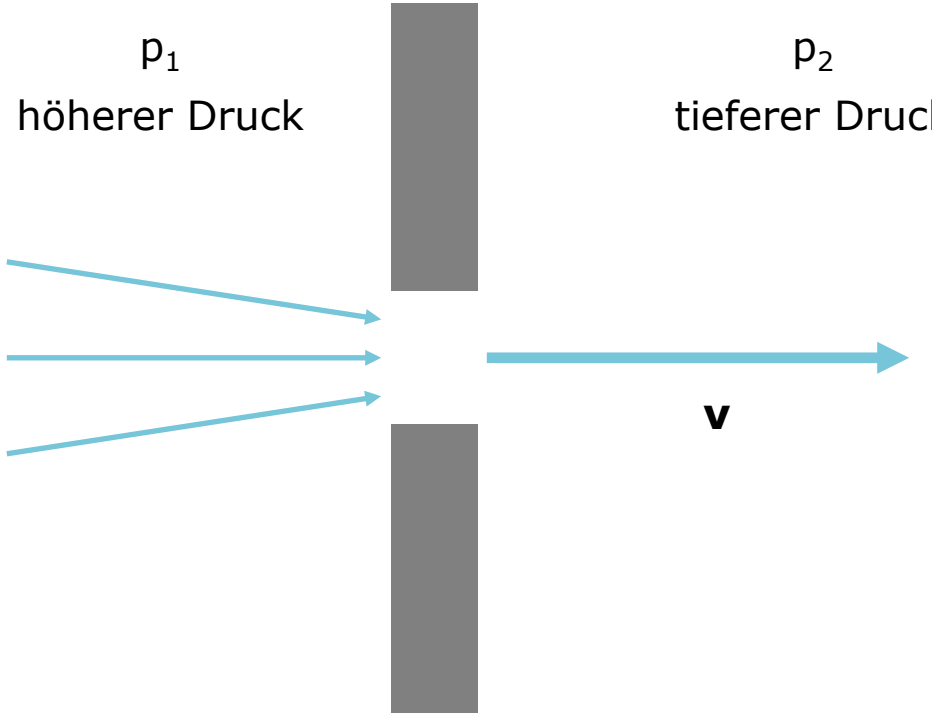
2

Luftströmungen durch Öffnungen und Winddruck

- Druckdifferenz und Strömungsgeschwindigkeit
- Grosse Öffnungen, Fugen, Kombinationen
- Staudruck, Windprofil, Druckbeiwerte, Querlüftung

Ziel: Volumenströme durch Öffnungen aus einer Druckdifferenz berechnen und den Winddruck am Gebäude abschätzen.

Druckdifferenz treibt die Strömung



$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

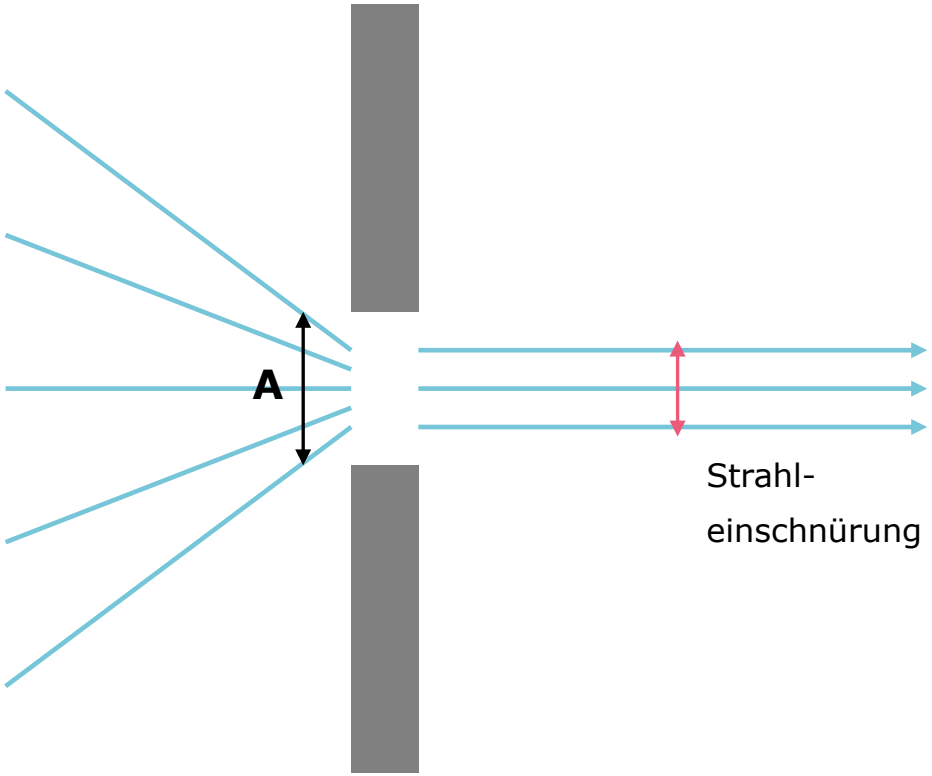
Grundgleichung für die eindimensionale Behandlung von Strömungen in Fluiden
Bernoulli-Gleichung – Wikipedia

Geschwindigkeit bei ρ = 1.2 kg/m³

Δp [Pa]	v [m/s]	Beispiel
0.5	0.91	Fuge, Thermik 1 Geschoss
1	1.29	Fenster, Thermik
5	2.89	leichter Wind
10	4.08	Treppenhaus Hochhaus
50	9.13	Blower-Door-Messung

Schon wenige Pascal genügen für deutliche Luftgeschwindigkeiten.

Strömung durch grosse Öffnungen



Effektive Fläche: $A_{eff} = C_d \cdot A$

$$\dot{V} = Cd \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

$\dot{V}$ [m³/s] A: Öffnungsfläche [m²] C_d: Durchflussbeiwert [–]

Öffnung	C_d
Scharfkantige Öffnung	0.6 – 0.65
Fenster ganz offen	≈ 0.6
Gut gerundeter Einlauf	bis ≈ 0.9

- $\dot{V} \sim \sqrt{\Delta p}$: doppelte Druckdifferenz → nur 1.41-facher Volumenstrom
- Kippfenster: effektive Fläche (Spalt + Dreiecke) einsetzen

Strömung durch Fugen und kleine Öffnungen

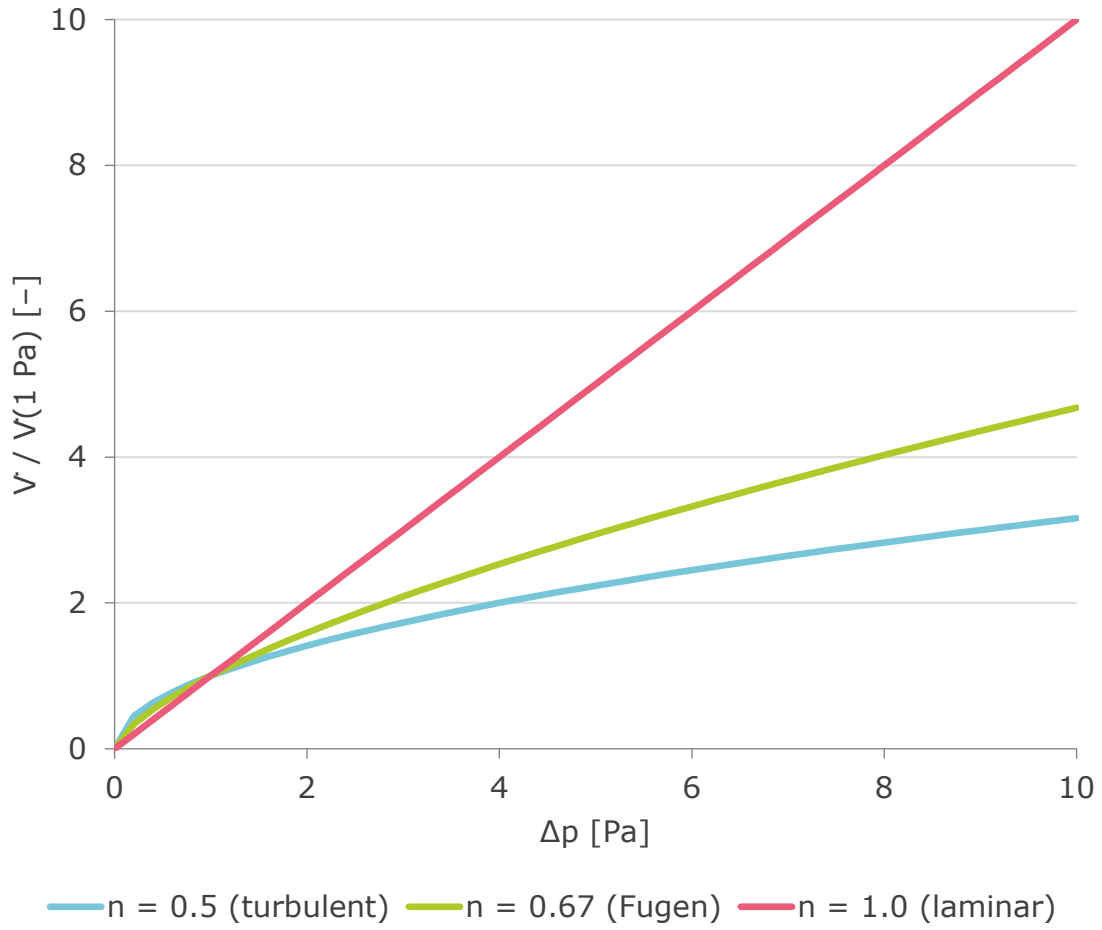
$$\dot{V} = C \cdot \Delta p^{n}$$

Potenzgesetz, Exponent n = 0.5 … 1.0

$$\dot{V} = a \cdot l \cdot \Delta p^{0.6667}$$

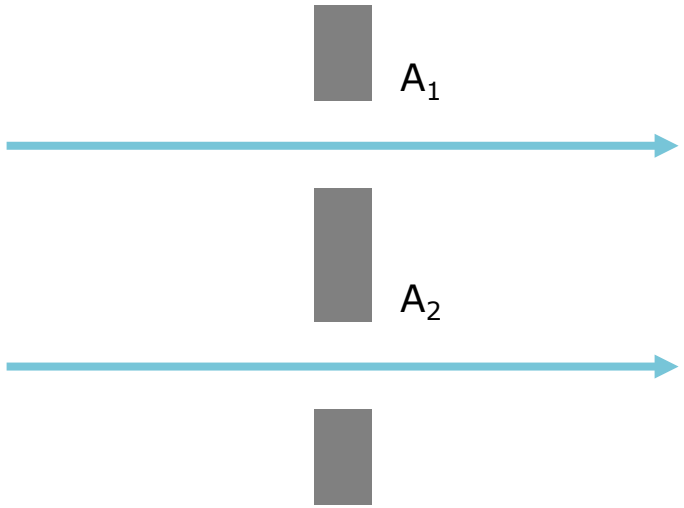
Fugen: a = Fugendurchlasskoeffizient [m³/(h·m·Pa$^{2/3}$)],
l = Fugenlänge [m]

- n = 0.5: turbulent, grosse Öffnungen
- n ≈ 0.65: typische Fugen, Gebäudehülle
- n = 1.0: laminar, sehr feine Spalten



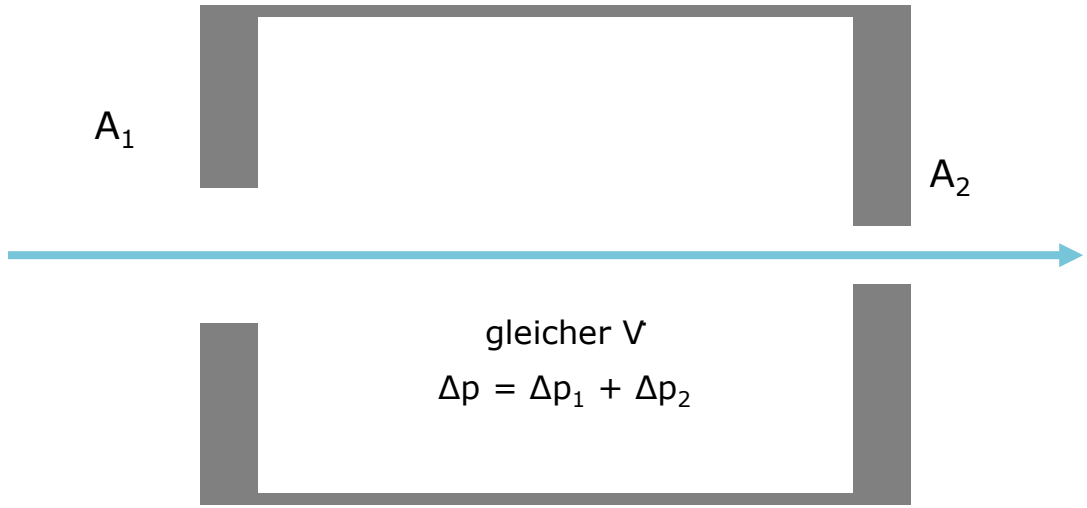
Zusammenwirken mehrerer Öffnungen

Parallel (gleiche Wand)



$$A_{eff} = A_1 + A_2$$

In Serie (Querlüftung durch Raum)



$$1/Aeff^2 = 1/A_1{}^2 + 1/A_2{}^2$$

In Serie bestimmt die **kleinste Öffnung** den Volumenstrom (z. B. Türspalt, Überströmöffnung).

Übung 3: Querlüftung über eine Innentür

ÜBUNG 3 · 8 min

Eine Wohnung wird quer gelüftet: Luft strömt durch ein offenes Fenster ein, durch den Spalt einer angelehnten Zimmertür und tritt auf der Gegenseite aus. Die Türe ist die «Engstelle».

Gegeben

- Fenster: A_1 = 1.2 m²
- Türspalt: A_2 = 0.4 m²
- Druckdifferenz total Δp = 3 Pa
- C_d = 0.6, ρ = 1.2 kg/m³
- Wohnungsvolumen V = 180 m³

Aufgaben (Berechnen Sie…)

a) Effektive Fläche A_{eff} der Serienschaltung

b) Volumenstrom $\dot{V}$ in m³/h und Luftwechsel n

c) Wie ändert sich $\dot{V}$, wenn die Tür weiter geöffnet wird (A_2 = 0.8 m²)? Und wenn stattdessen das Fenster doppelt so gross wäre?

8 min · Partnerarbeit

Staudruck des Windes

$$q = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \qquad mit\ \rho \approx 1.2 \frac{kg}{m^3} \rightarrow \quad q \approx 0.6 \cdot v^2 \ \ [Pa]$$

v = 2 m/s

2.4 Pa

Bft 2 · leichte Brise

v = 5 m/s

15 Pa

Bft 3 · schwache Brise

v = 10 m/s

60 Pa

Bft 5 · frische Brise

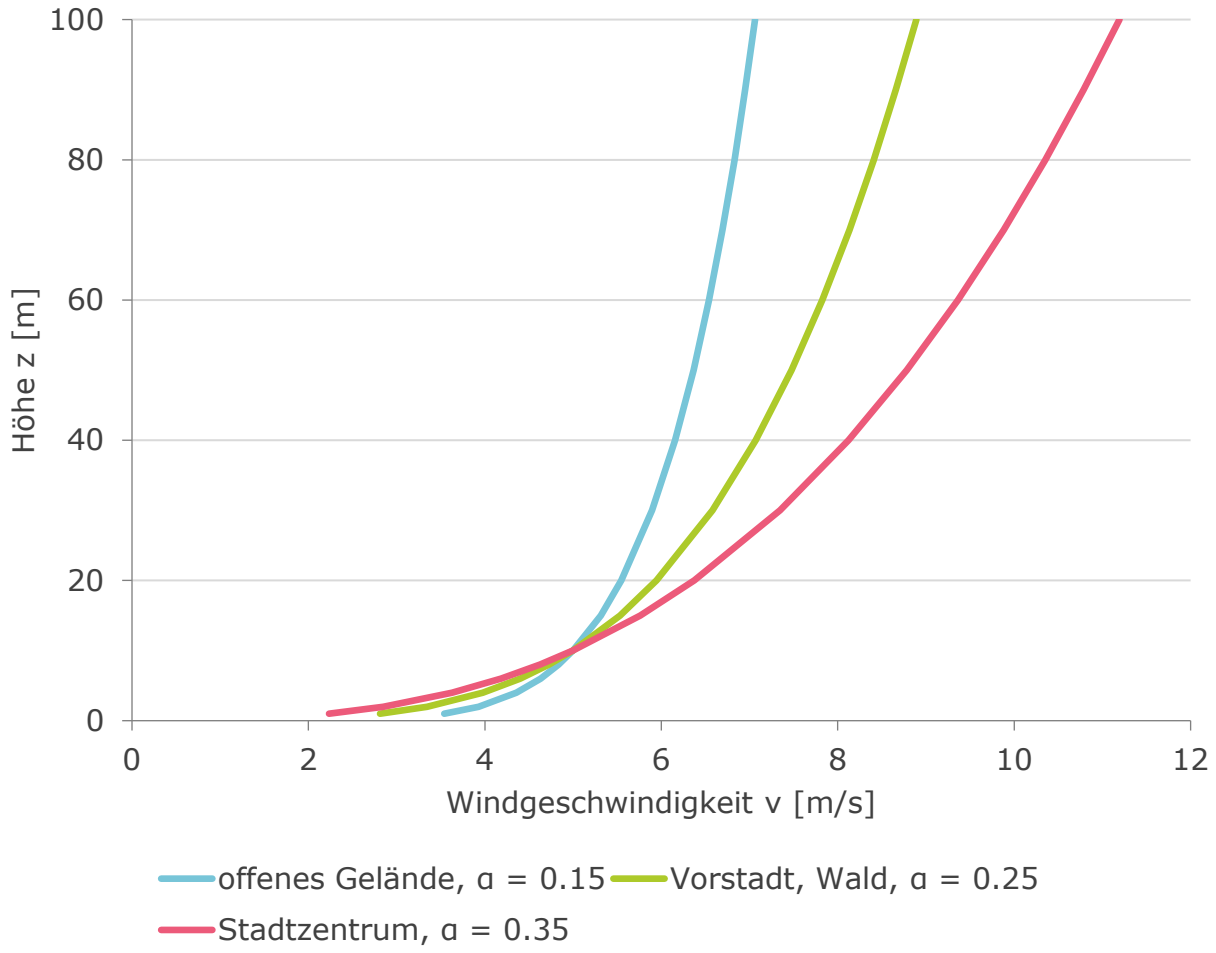
v = 25 m/s

375 Pa

Bft 10 · schwerer Sturm

Doppelte Windgeschwindigkeit → **vierfacher** Druck. Zum Vergleich Thermik: ca. 0.04 Pa pro m Höhe und K.

Windprofil: Geschwindigkeit nimmt mit der Höhe zu



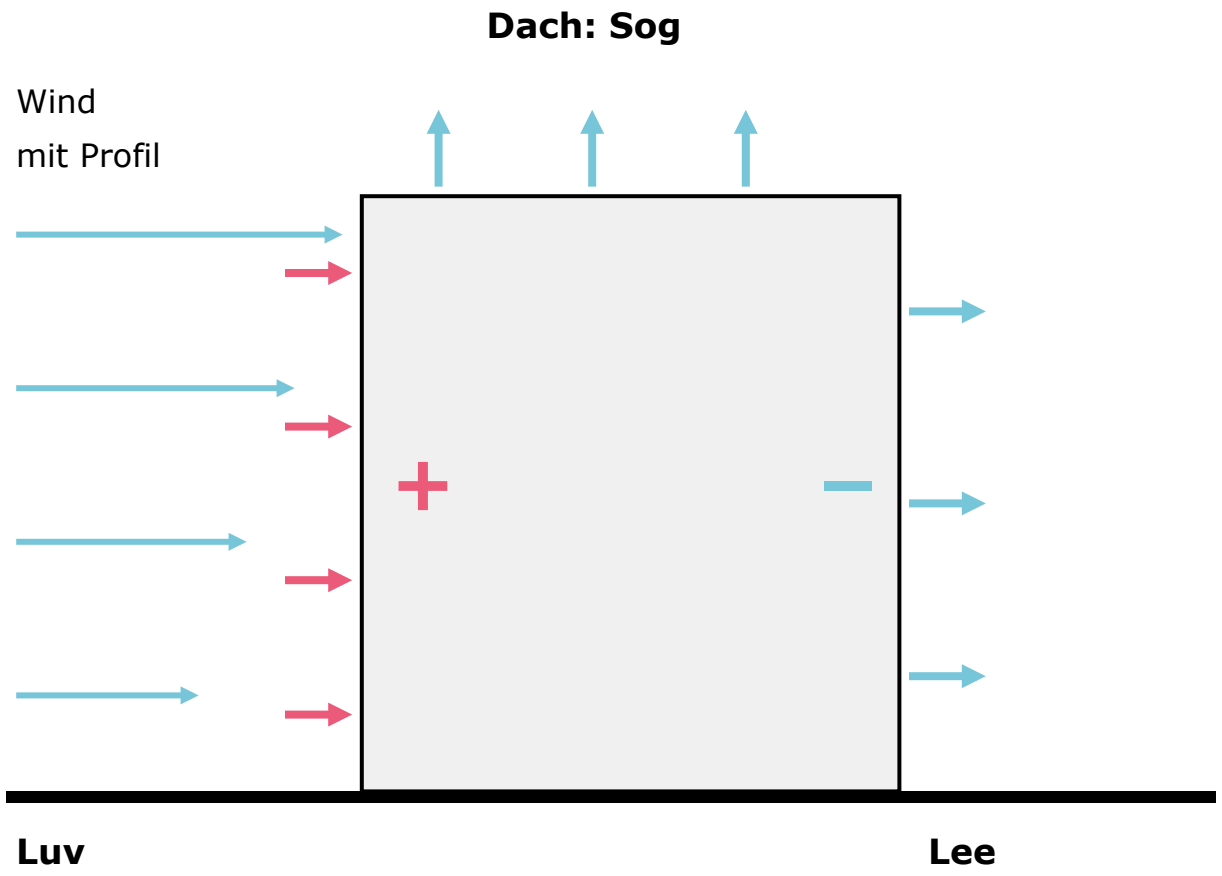
$$v(z) = v_{ref} \cdot \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^{\alpha}$$

v_{ref}: meist Meteostation, z_{ref} = 10 m

Gelände	α
Offenes Gelände, See	0.10 – 0.15
Vorstadt, Wald	0.20 – 0.25
Stadtzentrum	0.30 – 0.40

Beispiel: v_{ref} = 5 m/s,
Vorstadt: in 50 m Höhe
v = 7.5 m/s → q = 34 Pa statt 15 Pa

Druckbeiwerte c_p: Winddruck an der Fassade



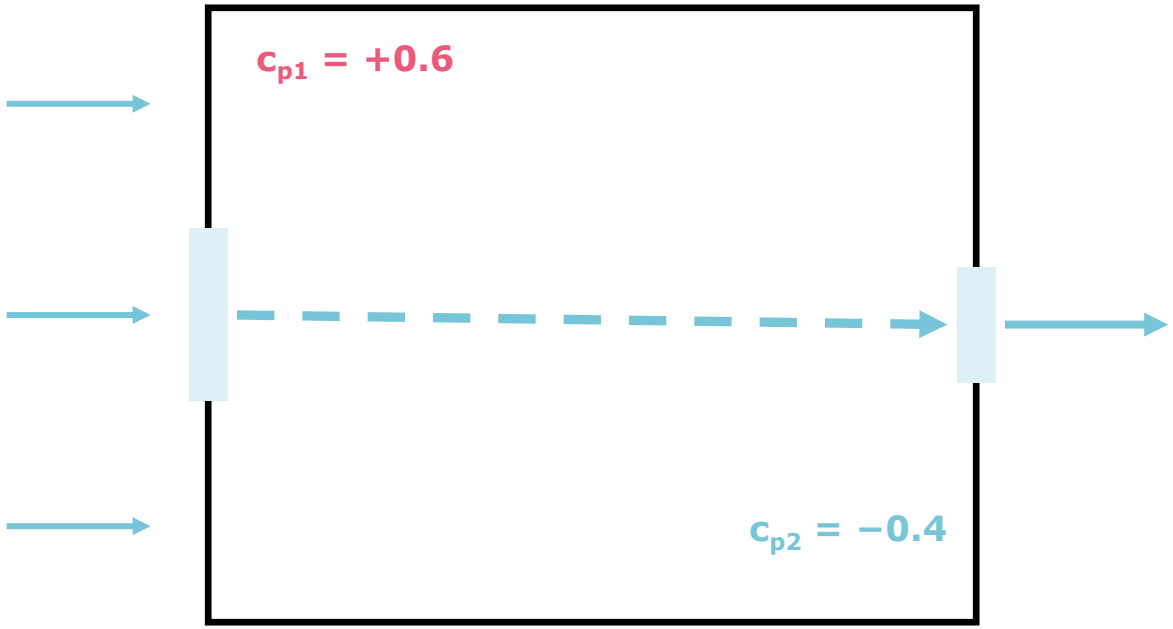
$$p_w = cp \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

v am Gebäude (Höhe z) · c_p aus Tabellen/Windkanal

Fläche	c_p (typisch)
Luv (angeströmt)	+0.5 … +0.8
Lee	−0.3 … −0.5
Seitenwände	−0.5 … −0.7
Flachdach	−0.5 … −1.0
Kanten, Ecken	bis ≈ −1.5

Richtwerte; je nach Gebäudeform und Anströmung, siehe enbau-online 9.17

Windinduzierter Luftwechsel: Querlüftung



Grundriss, Wind von links

Durchgesteckte Grundrisse ermöglichen Querlüftung.

$$\Delta p = (cp_1 - cp_2) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

$$\dot{V} = Cd \cdot A_{eff} \cdot v \cdot \sqrt{(cp_1 _ cp_2)}$$

- Luv- und Leeöffnung wirken in Serie → A_{eff} aus Serienformel
- Einseitige Lüftung: Wind wirkt nur über Böen und Turbulenz – kaum planbar
- Wind schwankt stark → Auslegung mit Thermik, Wind als Bonus

Praxisbeispiele Winddruck

PRAXIS



Durchgesteckte Wohnung

Fenster auf zwei Fassaden ermöglichen Querlüftung mit sehr hohen Luftwechseln, ideal für Nachtauskühlung. Einseitig orientierte Wohnungen lüften deutlich schlechter.



Hochhaus

Hohe Windgeschwindigkeiten in der Höhe: Fenster schwer zu öffnen, Türen schlagen, Zugerscheinungen. Lösungen: Lüftungsflügel, Doppelfassaden, Windfänge.



Dachrand und Ecken

Hohe Sogspitzen an Kanten: Dachabdichtungen und Fassadenbekleidungen müssen dort stärker befestigt werden. Undichtheiten führen zu Exfiltration warmer, feuchter Luft.

Übung 4: Querlüftung durch Wind

ÜBUNG 4 · 10 min

Ein zweigeschossiges Wohnhaus in einer Vorstadt. Die Meteostation (10 m Höhe) meldet 5 m/s. Im Obergeschoss (Fenstermitte auf 8 m) sind zwei Fenster auf gegenüberliegenden Fassaden geöffnet.

Gegeben

- v_{ref} = 5 m/s in z_{ref} = 10 m
- Vorstadt: α = 0.25
- c_p Luv = +0.6, c_p Lee = −0.4
- Je Fenster wirksame Fläche A = 0.5 m²
- C_d = 0.6, ρ = 1.2 kg/m³
- Volumen Obergeschoss V = 220 m³

Aufgaben (Berechnen Sie…)

a) Windgeschwindigkeit auf 8 m Höhe

b) Staudruck q, Winddruck an Luv- und Leefassade

c) Volumenstrom $\dot{V}$ und Luftwechsel n

d) Was ändert sich, wenn nur das Luv-Fenster offen ist?

10 min · Partnerarbeit

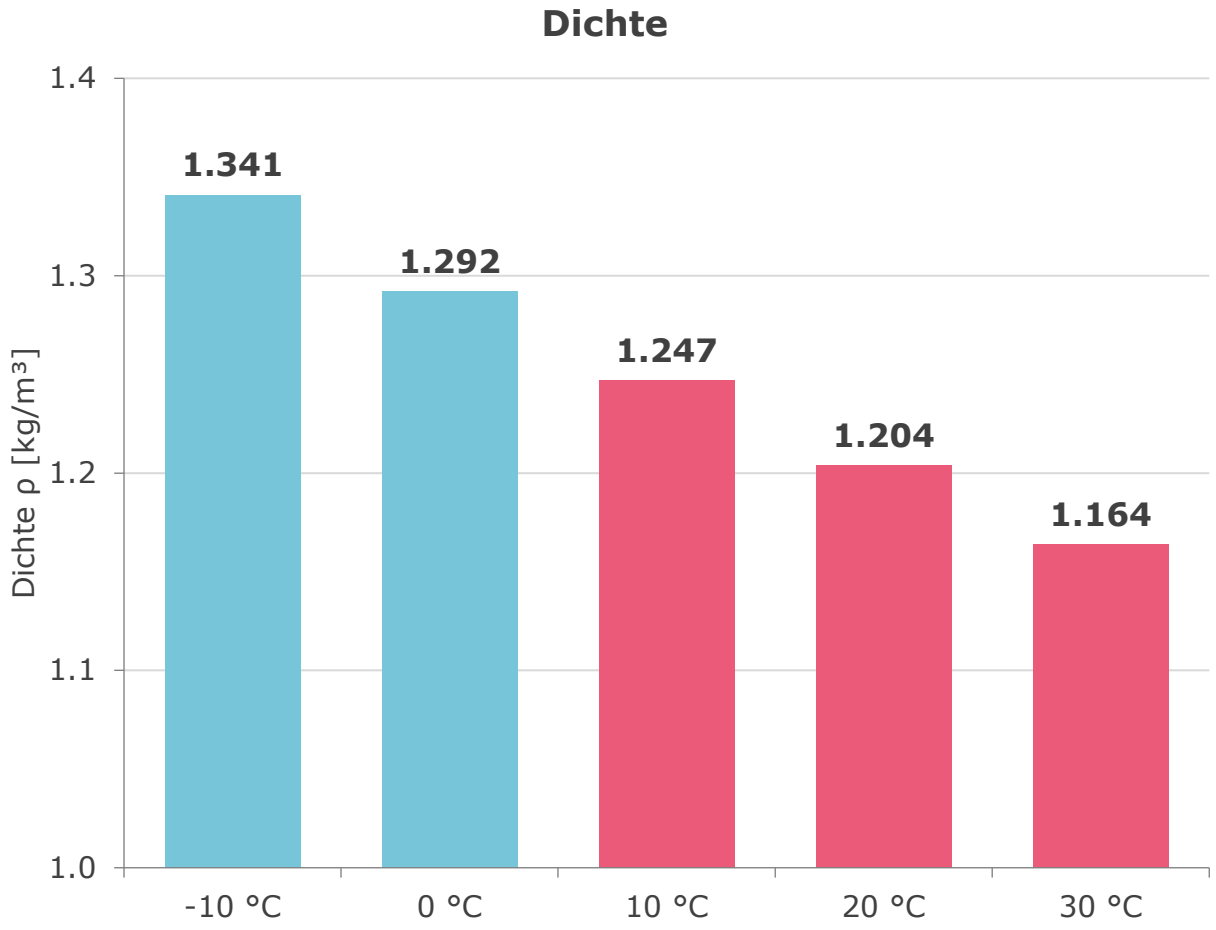
3

Thermisch induzierter Luftwechsel

- Luftdichte und Kamineffekt
- Neutrale Zone, einseitige Lüftung, Schachtlüftung
- Zusammenwirken mit Wind, Synthese

Ziel: Druckverhältnisse infolge Temperaturdifferenz verstehen und den thermischen Luftwechsel berechnen.

Warme Luft ist leichter



$$\rho = \frac{p}{R_L * T} \approx \frac{353}{T}$$

T in Kelvin R_L = 287 J/(kg·K) p = 101'325 Pa

- Kalte Aussenluft ist schwerer als warme Innenluft
- Dichteunterschied −10 °C / +20 °C: ca. **11 %**
- Wie beim Heissluftballon: die warme Luftsäule im Gebäude erfährt Auftrieb

Kamineffekt: Druckdifferenz über die Höhe

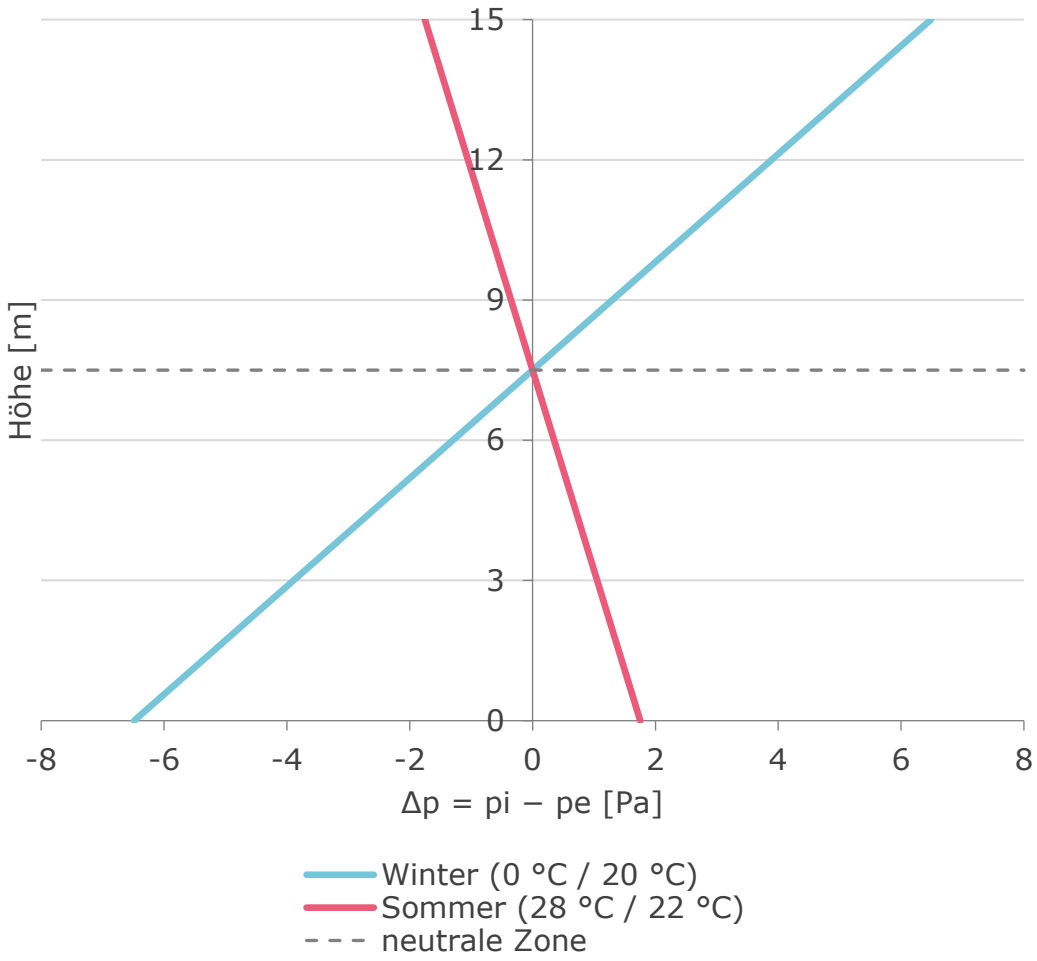
$$\Delta p = g \cdot h \cdot (\rho_e - \rho_i)$$

h: Höhendifferenz [m] · g = 9.81 m/s²

$$\Delta p \approx 0.04 \cdot h \cdot \Delta\theta \ [Pa]$$

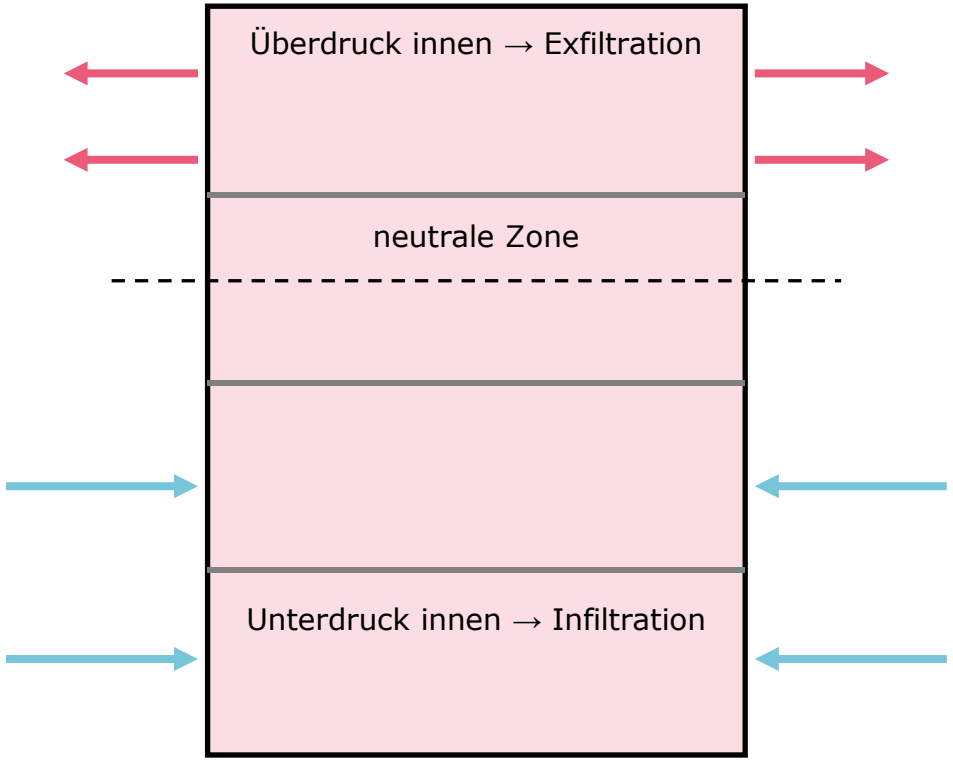
Faustregel: ca. 0.04 Pa pro Meter Höhe und Kelvin Temperaturdifferenz

- Beispiel 0 °C / 20 °C, Gebäude 15 m: Δp ≈ 13 Pa zwischen unten und oben
- Δp innen – aussen wechselt das Vorzeichen bei der **neutralen Zone**

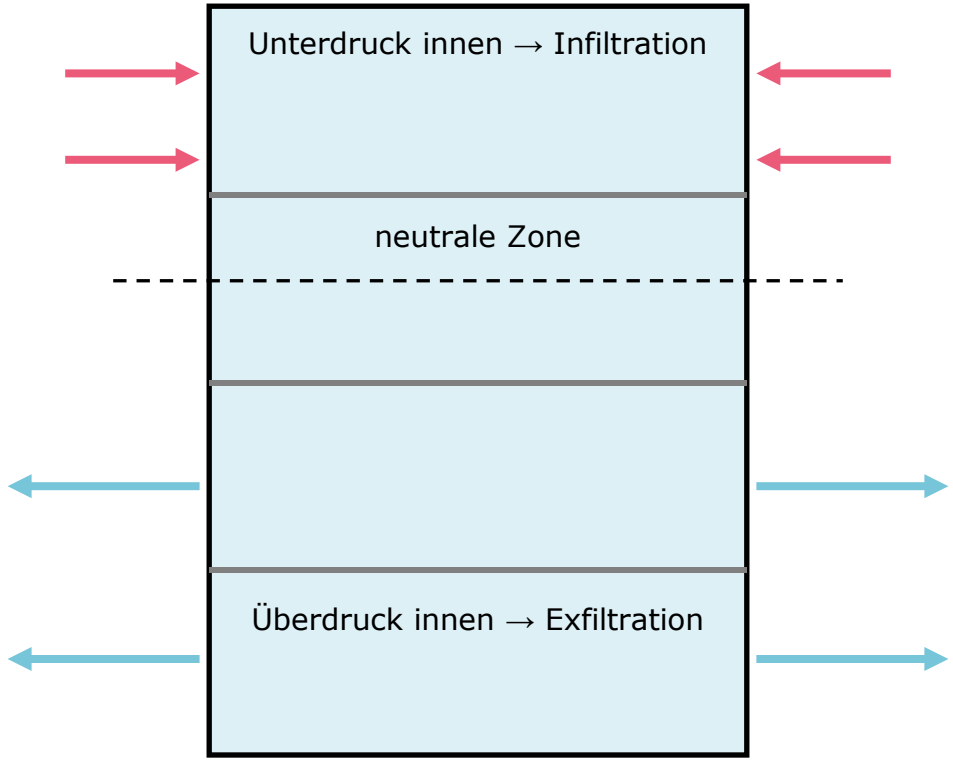


Neutrale Zone: Wo strömt Luft ein, wo aus?

Winter: innen warm

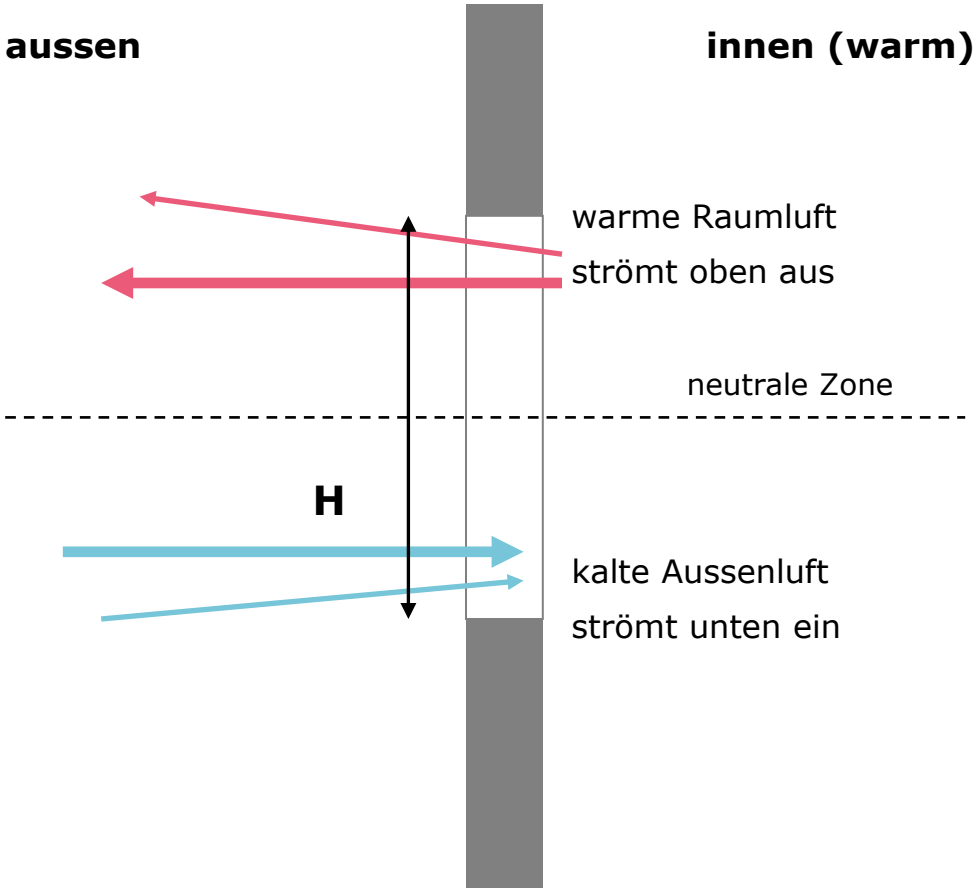


Sommer: innen kühler



Winter: Exfiltration oben trägt feuchte Raumluft in die Konstruktion → Kondensat im Dach.

Einseitige Fensterlüftung (eine Öffnung)

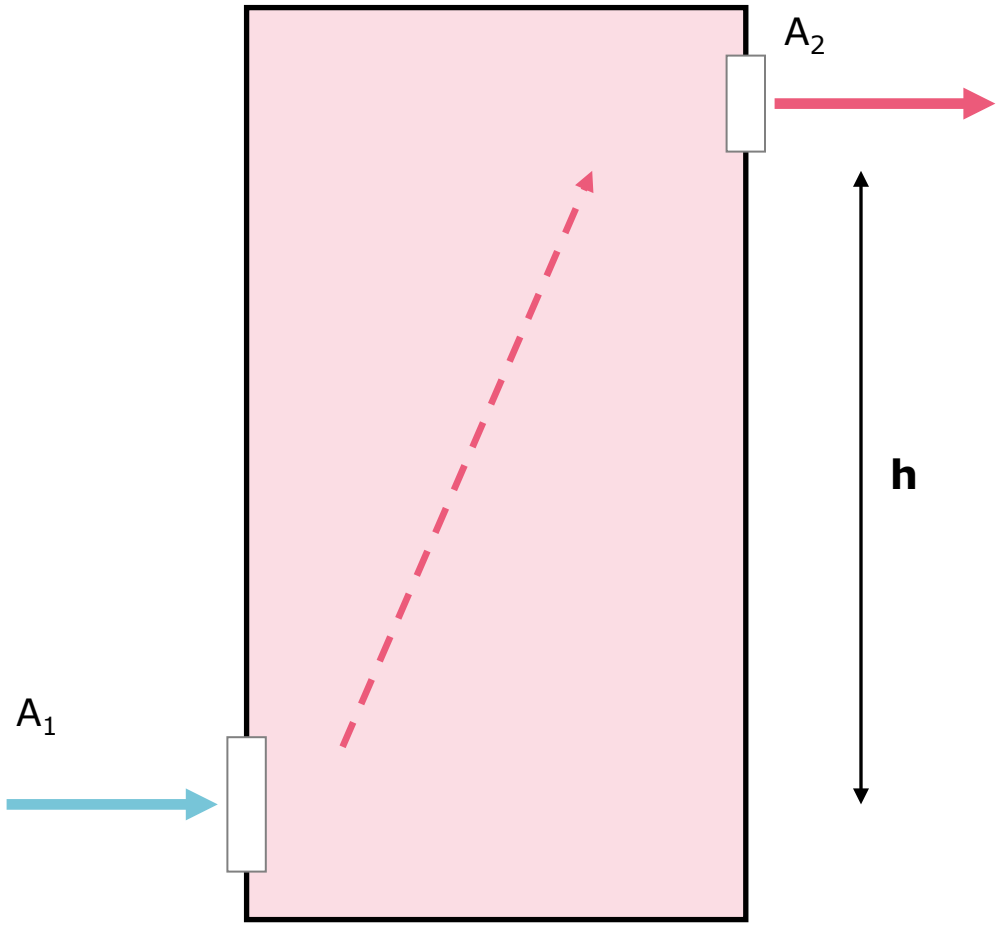


$$\dot{V} = Cd/3 \cdot A \cdot \sqrt{g \cdot H \cdot \frac{\Delta T}{\bar{T}}}$$

A: Öffnungsfläche H: Öffnungshöhe
$\bar{T}$: mittlere Temperatur [K] g = 9.81 m/s²

- Halbe Fläche strömt ein, halbe aus; Geschwindigkeit nimmt zum Rand hin zu → Faktor 1/3
- Wirkung wächst mit **√H**: hohe, schmale Fenster und Oberlichter lüften besser
- Raumtiefe für einseitige Lüftung: max. ca. 2.5 × Raumhöhe

Zwei Öffnungen mit Höhendifferenz: Schachtlüftung



$$\dot{V} = C_d \cdot A_{eff} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \frac{\Delta T}{\bar{T}}}$$

h: Höhendifferenz der Öffnungen A_{eff} aus Serienformel
$\bar{T}$: mittlere Temperatur [K] g = 9.81 m/s²

$$1/Aeff^2 = 1/A_1^2 + 1/A_2^2$$

- Grosse Höhe h → starker Antrieb: Treppenhaus, Atrium, Solarkamin
- Druckabfall $\Delta p_i \sim 1/A_i^2$: an der kleineren Öffnung fällt mehr Druck ab
- Neutrale Zone liegt näher bei der **grösseren** Öffnung

Praxisbeispiele thermischer Auftrieb

PRAXIS



Nachtauskühlung

Kühle Nachtluft strömt unten ein, über Atrium oder Treppenhaus oben aus. Die Speichermasse wird gekühlt – Grundlage vieler Low-Tech-Konzepte.



Hochhaus-Treppenhaus

Grosse Höhe → hohe Druckdifferenzen im Winter: Zugluft im EG, schwer zu öffnende Türen. Gegenmittel: Windfang, Schleusen, Abschottung.



Feuchte im Dachraum

Exfiltration oberhalb der neutralen Zone trägt Wasserdampf in Leckagen der Dachkonstruktion → Kondensat, Schimmel. Luftdichtheitsschicht ist zentral.

Übung 5: Einseitige Fensterlüftung Winter/Sommer

ÜBUNG 5 · 8 min

Ein Büro (V = 60 m³) hat ein einziges Fenster (1.0 m breit, 1.4 m hoch), das vollständig geöffnet wird. Windstille.

Gegeben

- Fenster: A = 1.4 m², H = 1.4 m
- C_d = 0.6, g = 9.81 m/s²
- Winter: θ_i = 21 °C, θ_e = −1 °C
- Sommernacht: θ_i = 26 °C, θ_e = 18 °C
- V = 60 m³

Aufgaben (Berechnen Sie…)

a) $\dot{V}$ und n im Winter

b) $\dot{V}$ und n in der Sommernacht

c) Das Fenster wäre gleich gross, aber 2.0 m breit und 0.7 m hoch. Wie ändert sich $\dot{V}$ im Winter?

8 min · Partnerarbeit

Übung 6: Kamineffekt im Treppenhaus

ÜBUNG 6 · 10 min

Ein 5-geschossiges Treppenhaus hat unten eine Eingangstür mit Lüftungsgitter und oben ein Rauchabzugsfenster, das offen steht.

Gegeben

- Höhendifferenz der Öffnungen h = 15 m
- θ_i = 18 °C, θ_e = −2 °C
- Öffnung unten A_1 = 1.0 m²
- Öffnung oben A_2 = 0.6 m²
- C_d = 0.6, ρ ≈ 353 / T

Aufgaben (Berechnen Sie…)

a) Gesamte Druckdifferenz Δp über die Höhe (exakt mit ρ = 353/T und mit Faustregel)

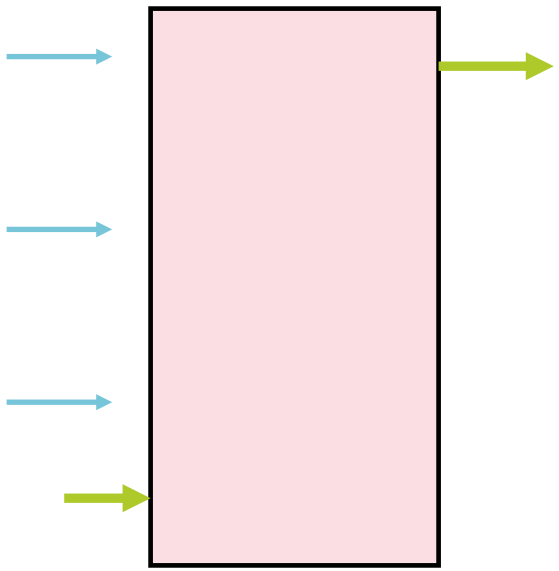
b) Volumenstrom $\dot{V}$ in m³/h

c) Auf welcher Höhe liegt die neutrale Zone?
(Tipp: $\Delta p_i \sim 1/A_i^2$)

10 min · Partnerarbeit

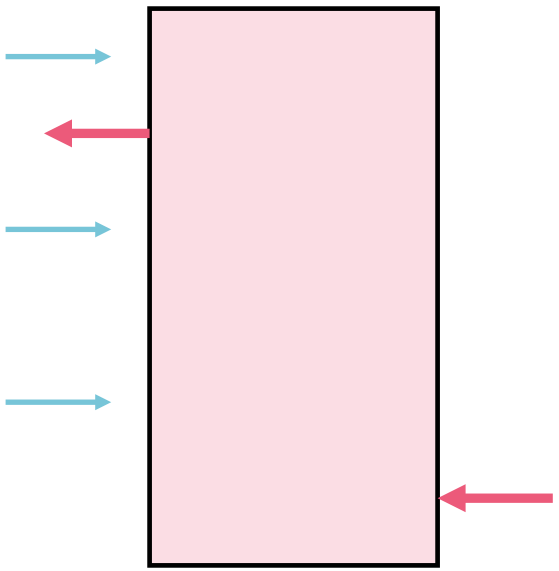
Zusammenwirken von Wind und Auftrieb

Verstärkend



Zuluft unten im Luv, Abluft oben im Lee

Abschwächend



Wind drückt oben im Luv hinein, Auftrieb will hinaus

$$\dot{V} \approx \sqrt{(\dot{V}_{Wind}{}^2 + \dot{V}_{Thermik}{}^2)}$$

Näherung für eine erste Abschätzung

Einzonenmodell

- Pro Öffnung: $\Delta p_j = p_{w,j} + p_{th,j} - p_i$
- Unbekannter Innendruck p_i
- Massenbilanz: $\Sigma \dot{V}_j = 0 \rightarrow p_i$ iterativ lösen
- Genauer: Mehrzonenmodelle, Simulation

Öffnungen so anordnen, dass Wind und Auftrieb in dieselbe Richtung wirken.

Quiz: Richtig oder falsch?

QUIZ · 5 min

1. Bei $n = 0.5\ h^{-1}$ strömt pro Stunde das halbe Raumvolumen als Aussenluft zu.
2. Bei Öffnungen in Serie bestimmt die grösste Öffnung den Volumenstrom.
3. Verdoppelt sich die Windgeschwindigkeit, verdoppelt sich der Winddruck.
4. Im Winter herrscht oberhalb der neutralen Zone innen Überdruck.
5. Ein hohes, schmales Fenster lüftet thermisch besser als ein gleich grosses breites, niedriges.
6. Fugen sind eine gute Alternative zur geplanten Lüftung.

Handzeichen: Daumen hoch = richtig, Daumen runter = falsch

Zusammenfassung: die wichtigsten Formeln

Grundlagen

Luftwechselrate: $n = \frac{\dot{V}}{V}$

Frischluftbedarf: $\dot{V} = \dot{M}_{CO2} \frac{\dot{M}_{CO2}}{c_i - c_e}$

Lüftungswärmeverluste: $\dot{Q}_v \approx 0.34 \cdot \dot{V} \cdot \Delta\theta$

Öffnungen

Strömung durch grosse Öffnungen: $\dot{V} = Cd \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$

Strömung durch kleine Öffnungen: $\dot{V} = C \cdot \Delta p^n$

Zwei Öffnungen mit Höhendifferenz: $\frac{1}{A_{eff}^2} = \Sigma \frac{1}{A_i^2}$ $(Serie)$

Winddruck

Staudruck des Windes: $q = \frac{\rho}{2} \cdot v^2$

Windprofil: $v(z) = v_{ref} \cdot \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^{\alpha}$

Winddruck: $p_w = cp \cdot q$

Thermik

Druckdifferenz Höhe:

$$\Delta p = g \cdot h \cdot (\rho_e - \rho_i) \approx 0.04 \cdot h \cdot \Delta\theta$$

Einseitige Fensterlüftung:

$$\dot{V} = \frac{C_d}{3} \cdot A \cdot \sqrt{g\, H\, \frac{\Delta T}{\overline{T}}}$$

Zweiseitige Fensterlüftung mit Höhenunterschied:

$$\dot{V} = C_d \cdot A_{eff} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \frac{\Delta T}{\overline{T}}}$$

$\rho \approx 1.2$ kg/m³ $\rho \cdot c_p \approx 0.34$ Wh/(m³K) $C_d \approx 0.6$ · Temperaturen T in Kelvin

Literatur und Grundlagen

Zürcher, C.; Frank, T.: Bauphysik – Bau & Energie. vdf Hochschulverlag, Zürich. Kapitel «Luftströmungen».

enbau-online.ch/bauphysik – Begleitmaterial zum Buch, u. a. Anhang 9.17 «Windumströmung Gebäude: Druckbeiwerte».

SIA 180: Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden.

SIA 382/1: Lüftungs- und Klimaanlagen – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen.

CIBSE AM10: Natural ventilation in non-domestic buildings (Formeln einseitige Lüftung, Schachtlüftung).

Umweltbundesamt (2008): Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft.

HSLU Hochschule Luzern

Danke! Fragen?