

## Wann ist Fensterlüftung zumutbar?

Bewertung der CO<sub>2</sub>-Konzentration und des Schimmelrisikos mittels Monte-Carlo-Simulation

Gabriel Rojas, Clemens Weißbacher, Andreas Greml, Rainer Pfluger, Peter Tappler  
Innenraumtag 2024, Wien, 28. November 2024

## Motivation

### OIB-Richtlinie 3/2019 -> 10.1 Lüftung

*10.1.1 Aufenthaltsräume und Sanitäräume müssen durch unmittelbar ins Freie führende Fenster, Türen und dergleichen **ausreichend gelüftet werden können**. Davon kann ganz oder teilweise abgesehen werden, wenn eine mechanische Lüftung vorhanden ist, die eine für den Verwendungszweck ausreichende Luftwechselrate zulässt.*

### OIB-Richtlinie 6/2019 -> 4.8 Schadensbildende Kondensation und Risiko zur Schimmelbildung

*Bei Neubau und Renovierung von Gebäuden und Gebäudeteilen sind in Abhängigkeit von deren Nutzung (nutzungsprofil-spezifische Feuchteproduktion) schadensbildende Kondensation an der inneren Bauteiloberfläche **und das Risiko zur Schimmelbildung an der inneren Bauteiloberfläche zu vermeiden**.*

**Wann sind diese Forderungen erfüllt? / Wie können diese Forderungen erfüllt werden?**



Quelle: Pixabay.com  
Clicke-Free-Vector-Images

## Ausreichend gelüftet?

### Lüftung / hygienischer Luftwechsel -> RLQ Richtlinie definiert CO<sub>2</sub> Richtwerte

(Tappler et al. 2017)

Klasse	Beschreibung	Arithmetischer Mittelwert der Momentanwerte für CO <sub>2</sub> (ppm)
Klasse 1	Ziel für Innenräume für den dauerhaften Aufenthalt von Personen	< 800
Klasse 2	Richtwert für Innenräume für den dauerhaften Aufenthalt von Personen, in denen geistige Tätigkeiten verrichtet werden bzw. die zur Regeneration dienen	< 1000
Klasse 3	Allgemeiner Richtwert für Innenräume für den dauerhaften Aufenthalt von Personen	< 1400
Klasse 4	Richtwert für Innenräume mit geringer Nutzungsdauer durch Personen	< 5000
Außerhalb der Klassen	Situation in Flugzeugen, Nachtsituation z.B. in Liege- und Schlafwagenabteilen von Zügen	> 5000

Reine Fensterlüftung: Kann das mit einem zumutbaren Nutzereingriff erfüllt werden?

-> Ist der Zeitraum zwischen zwei Nutzereingriffen zumutbar?

### Schimmelbildung / Feuchteschutz -> Bauphysik fordert aw Wert ≤ 0,8

-> Unter welchen Bedingungen (in wie vielen Fällen) wird der aw > 0,8?

## Grundidee im Projekt "Lüftungskonzept Österreich"



Beantwortung von zwei Grundfragen:

### **Raumluftqualität:**

In welchen Zeitabständen muss gelüftet werden um CO<sub>2</sub> Konzentration einzuhalten und ist das zumutbar?

### **Feuchteschutz:**

Wie hoch ist das Schimmelrisiko wenn nur 2 x am Tag (morgens und abends) gelüftet wird?

-> **Rechnerische Abschätzung: Stochastischer Ansatz mit Monte Carlo Berechnung**

**klimaaktiv** Startseite Luftqualität Schimmelrisiko Wissenschaftlicher Hintergrund Richtlinie zu CO<sub>2</sub> des BMK

### 1. Lüftungskonzept Österreich inkl. Exceltool

### 2. Online Implementierung

### Lüftungskonzept für Österreich

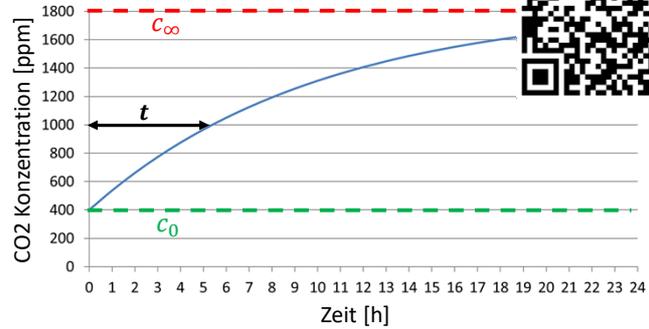
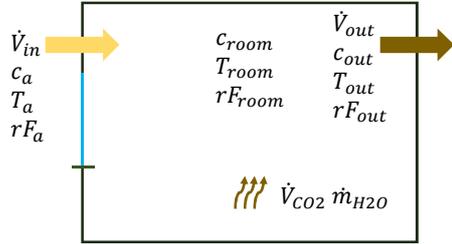
Ist eine Fensterlüftung zumutbar? Wie hoch ist das Schimmelrisiko?

Gute Luftqualität und Schimmelfreiheit sind wesentliche Voraussetzungen für Gesundheit und Wohlbefinden. Die beiden Berechnungstools klären dabei eine Grundsatzfrage, die im Zuge von Lüftungskonzepten bei Neu- und Umbauten, aber auch anderen Fragestellungen auftritt. Diese Grundsatzfrage lautet, ob sich mit einer reinen Fensterlüftung mit zumutbaren Lüftungsaktivitäten durch die Nutzer:innen eine in den bautechnischen Regelungen der Länder geforderte, ausreichend gute Luftqualität und Schimmelfreiheit erreichen lässt. Durch Anklicken der Buttons „Berechnungstool Luftqualität“ oder „Berechnungstool Schimmelrisiko“ findet man die Möglichkeit zur Eingabe konkreter Daten sowie umfangreiche Infos in den Erläuterungen.

Berechnungstool Luftqualität

Berechnungstool Schimmelrisiko

## CO<sub>2</sub> Konzentration: dynamisches Ein-Zonen-Model



$$c(t) = (c_0 - c_\infty)e^{-AER \cdot t} + c_\infty$$

$$c_\infty = c_a + \frac{\dot{V}_{CO_2}}{AER \cdot V}$$

$$t = -\frac{\ln \frac{c(t) - c_\infty}{c_0 - c_\infty}}{AER}$$

$$\bar{c}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t c(t) dt = \frac{(c_0 - c_\infty)}{AER \cdot t} (1 - e^{-AER \cdot t}) + c_\infty$$

$$t_{Avg} = f(AER, \dot{V}_{CO_2}, c_a, c_0, V)$$

## a<sub>w</sub> Wert (rel. F.): tagesmittlere Berechnung gesamte Wohneinheit



$$\rho_{i(T_{i,min})} = \left( \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\dot{V}} + \rho_{a(T_i)} \right) \cdot \frac{T_i}{T_{i,min}}$$

$$a_w = \frac{\rho_{i(T_{i,min})} \cdot 461.5 \cdot T_{i,min}}{E(T_{si})}$$

$$T_{si} = f_{Rsi} \cdot (T_{i,min} - \bar{T}_a) + \bar{T}_a$$

**tagesmittlere Massenbilanz!**

$RH_{si} > 0.8$  (in wie vielen Fällen?)

### 2 Szenarien

- Anwesenheit: "normale" Feuchtprod. + 2x pro Tag lüften
- Abwesenheit: e.g. Winterurlaub (kaum Feuchtprod, niedr. Temp., kein Lüften)

## Luftwechselrate durch In-/Exfiltration: Wie berechnen?

- „Tabellen-Modell“, z.B. DIN 1946  
n50 + Korrekturfaktoren für wenige Einflussfaktoren:  
Gebäuelage, Standort (windstark/windschwach), Höhe  
der Nutzungseinheit,...

- **Physikalisch basierte vereinfachtes Modell**  
Wichtigsten physikalischen Kräfte (Kamineffekt +  
Winddruck) abgebildet + empirische Parameter

- Detaillierteres physikalischen Modell / Simulation

**Lawrence Berkeley Laboratory**  
UNIVERSITY OF CALIFORNIA

ENERGY & ENVIRONMENT  
DIVISION

AIR INFILTRATION IN BUILDINGS

Max Howard Sherman  
(Ph. D. thesis)

$$\dot{V}_{inf} = A_0 \sqrt{f_s^2 \cdot \Delta T + f_w^2 \cdot v^2}$$

- Rechenaufwand gering
- wissensch. mehrfach validiert und anerkannt
- zeitliche Variation der Infiltration abbildbar

## Die „Schwierigkeit“: LWR bestimmen

~~- „Tabellen-Modell“, z.B. DIN  
n50 + Korrekturfaktoren für wenige Einflussfaktoren:  
Gebäuelage, Standort (windstark/windschwach),  
Höhe der Nutzungseinheit,...~~

- Physikalisch basierte vereinfachtes Modell  
Wichtigsten physikalischen Kräfte (Kamineffekt +  
Winddruck) abgebildet + empirische Parameter  
-> wissenschaftlich validiert/anerkannt

~~- Detaillierteres physikalischen Modell -> Simulation~~

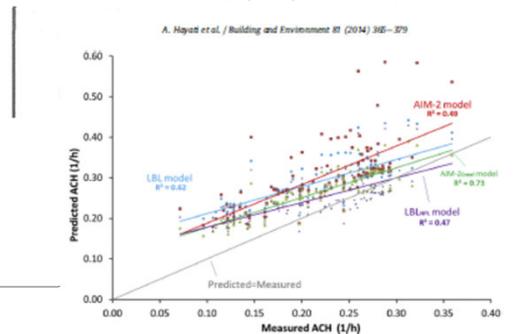
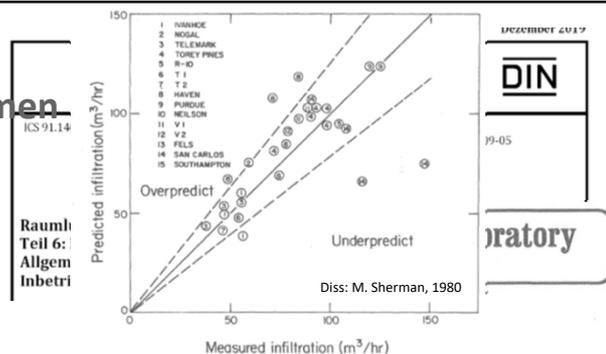
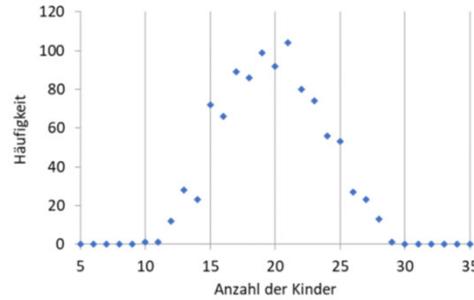
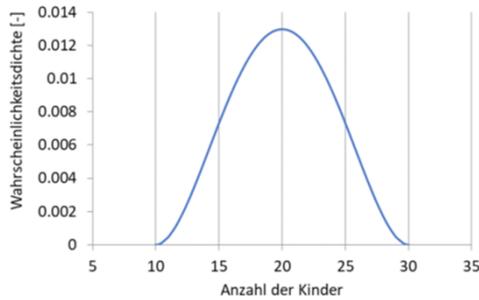


Fig. 9. Predicted vs. measured ACH for Keweenaw church - gaussian and log-normal distribution.

## Methode / Monte Carlo Ansatz

1 Anfrage -> 1000 Berechnungen mit zufällig gewählten Parametern  
Eingabeparameter gemäß vorgegebener Verteilungen variiert werden



-> **Unsicherheiten bzw. Variabilität in den Annahmen fließen ins Ergebnis ein**  
falls Parameter bekannt, kann dieser genau vorgegeben werden  
Aber zumindest die konkreten Wetterbedingungen bleiben unbekannt

## "Hinterlegte Wertebereiche" / Verteilfunktionen (und deren Abhängigkeit)

Building and room parameters	No. PDFs (dependency)	Parameters for mould risk assessment	No. PDFs (dependency)
Location	-	Thermal bridges ( $f_{RSI}$ )	5 (bld. standard)
Building type	-	Total humidity load [l/d]	-
$n_{50}$ -value [1/h]	5 (bld. standard)	Emi. rate occupancy [g/(h m <sup>2</sup> )]	1 (hum. load)
Room type	-	Emi. rate occupancy [g/(h per)]	1 (hum. load)
Room area [m <sup>2</sup> ]	9 (room type)	Emi. rate absence [g/(h m <sup>2</sup> )]	1 (hum. load)
Room height [m]	9 (room type)	Dwelling area [m <sup>2</sup> ]	4 (bld. type)
Window area [m <sup>2</sup> ]	9 (room type)	No. of person	4 (bld. type)
Window airing AER [1/h]	2 (bld. type)	Window airing AER [1/h]	2 (bld. type)
Window airing dura. [min]	2 (bld. type)	Window airing dura. [min]	2 (bld. type)
Window class (EN12207)	5 (bld. standard)	Temperature avg. [°C]	5 (bld. standard)
Terrain class (wind)	15 (location)	Temperature min. [°C]	5 (bld. standard)
Shielding class (wind)	15 (location)	Temperature abs. [°C]	5 (bld. standard)
Occupancy parameters	No. PDFs (dependency)	„Hidden“ parameters (not shown in entry mask)	No. PDFs (dependency)
No. adults	9 (room type)	Factor $n_{50}$ bld. vs. $n_{50}$ room	1 (-)
Activity adults [met]	9 (room type)	Factor leakage distribution	2 (-)
No. children	9 (room type)	Building height [m]	6 (bld. type)
Activity children [met]	9 (room type)	Rel. stack eff. height [-]	6 (bld. type)
Avg. age children [a]	9 (room type)	Rel. wind press. height [-]	6 (bld. type)

**Σ 170 PDF's**

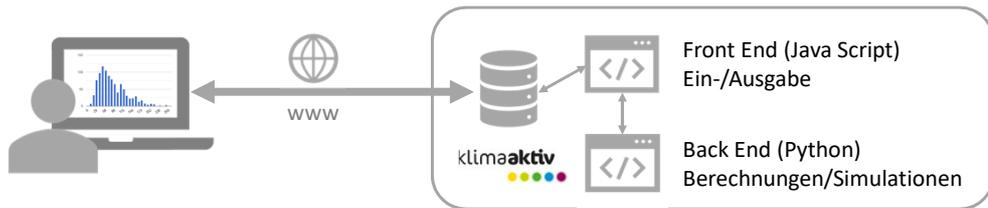
## Umsetzung als Online Tool



<https://www.energieinstitut.at/tools/lueftungskonzept/>



Startseite Luftqualität Schimmelrisiko Wissenschaftlicher Hintergrund Richtlinie zu CO<sub>2</sub> des BMK



Open Source (Back End Berechnungen)

<https://github.com/UIBK-EnergyEfficientBuilding/lueftungskonzeptAT>

## Eingabemaske CO<sub>2</sub> Rechner

### GEBÄUDE & RAUMPARAMETER

Standort\*  
Wien

Gebäudeart\*  
Mehrfamilienhaus

Luftdichtigkeit n50-Wert (Gebäude)\*  
Standard Neubau  
1,5 +/- 0,3 1/h

**erforderliche Eingaben**

Gelände-/Terrainklasse (Windeinfluss)  
Hinterlegter Wertebereich  
3 bis 5

Abschirmung-/Shieldingklasse (Windeinfluss)  
Hinterlegter Wertebereich  
3 bis 5

Raumart (betrachter Raum)\*  
Schlafzimmer

### EINGABEN PERSONEN FÜR BETRACHTETEN RAUM

Anzahl Erwachsene  
Hinterlegter Wertebereich  
1 bis 2

Aktivität Erwachsene  
Hinterlegter Wertebereich  
0,8 +/- 0,1 met

Anzahl Kinder  
Hinterlegter Wertebereich  
0 bis 2

Aktivität Kinder  
Hinterlegter Wertebereich  
0,8 +/- 0,1 met

Mittleres Alter der Kinder  
Hinterlegter Wertebereich  
1,0 +/- 1,2 a

Restliche Eingaben optional  
falls keine Eingabe: hinterlegte Verteilung



## Ausgabe CO<sub>2</sub> Rechner – 4 Ergebnisse

Defaultausgabe

Ergebnisse gleitender Mittelwert CO<sub>2</sub> - Realistisches Lüftungsverhalten<sup>2</sup>

$\bar{c}(t) < 1000 \text{ ppm}, c_0 \sim 650 - 700 \text{ ppm}$

Ergebnisse Momentanwerte CO<sub>2</sub> - Realistisches Lüftungsverhalten<sup>2</sup>

$c(t) < 1000 \text{ ppm}, c_0 \sim 650 - 700 \text{ ppm}$

"strenge" Anforderung

Ergebnisse gleitender Mittelwert CO<sub>2</sub> - Ideales Lüftungsverhalten<sup>3</sup>

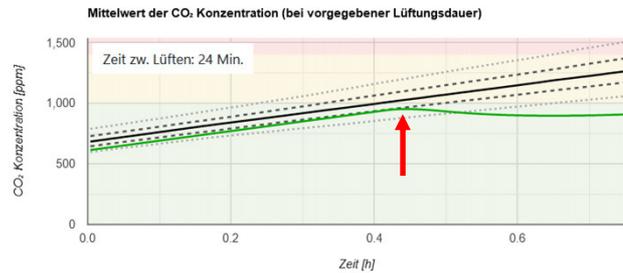
$\bar{c}(t) < 1000 \text{ ppm}, c_0 \sim 450 \text{ ppm}$

Ergebnisse Momentanwerte CO<sub>2</sub> - Ideales Lüftungsverhalten<sup>3</sup>

$c(t) < 1000 \text{ ppm}, c_0 \sim 450 \text{ ppm}$

Ergebnis drucken

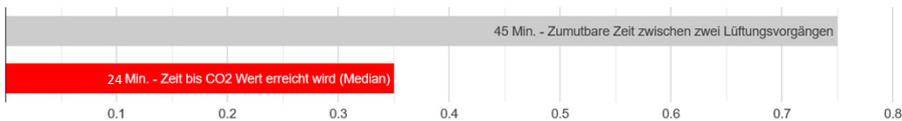
## Beispiel CO<sub>2</sub> Rechner: Klassenzimmer (Neubau) für Altbau kaum unterschiedlich Zeit zwischen Fensterlüftungs-Events damit < 1000 ppm



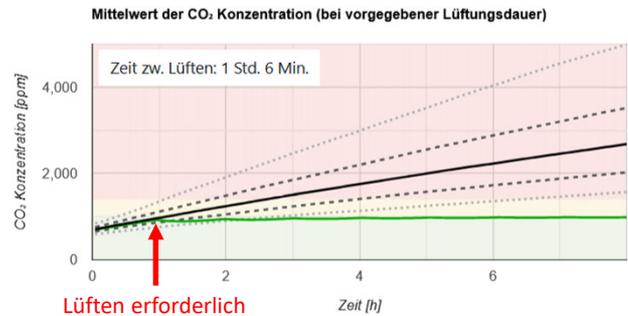
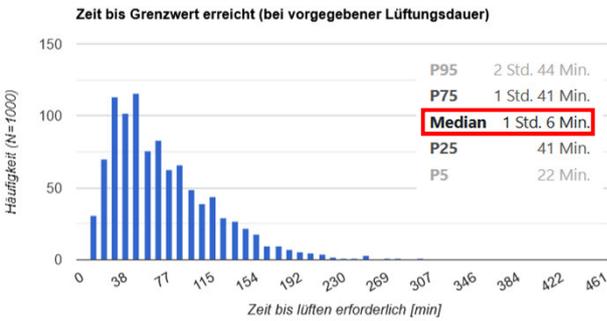
Zumutbar?

Median: 24 min << 45 min

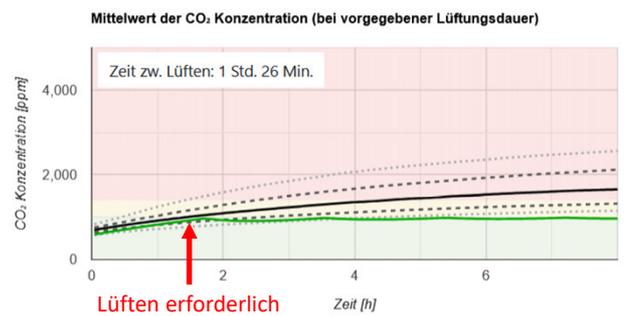
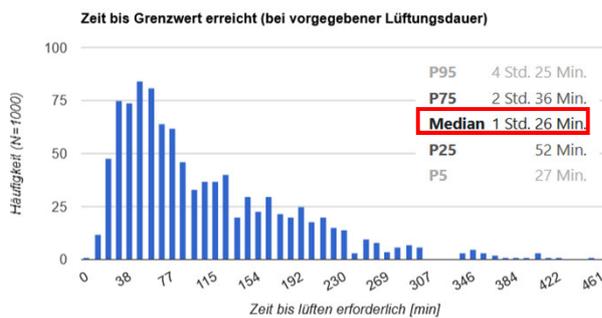
-> Nein



### Beispiel CO<sub>2</sub> Rechner: Schlafzimmer im MFH (Standard Neubau) Zeit zwischen Fensterlüftungs-Events damit < 1000 ppm



### Beispiel CO<sub>2</sub> Rechner: Schlafzimmer im MFH (Standard Neubau) Zeit zwischen Fensterlüftungs-Events damit < 1000 ppm



Zumutbar?      Median: 1h 26 min << 8h      -> Nein

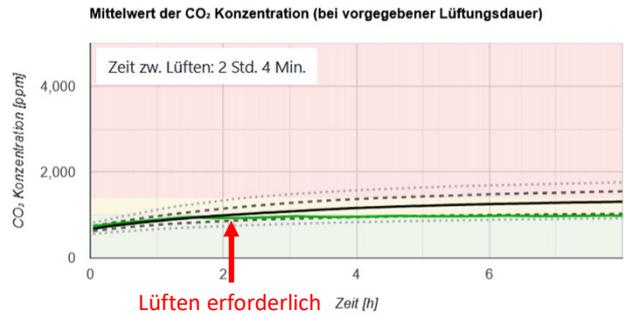
Simulation mechanische Lüftung ⓘ

10

10,0 m<sup>3</sup>/h



### Beispiel CO<sub>2</sub> Rechner: Schlafzimmer im MFH (Standard Neubau) Zeit zwischen Fensterlüftungs-Events damit < 1000 ppm



Zumutbar?      Median: 2h 4 min << 8h      -> Nein

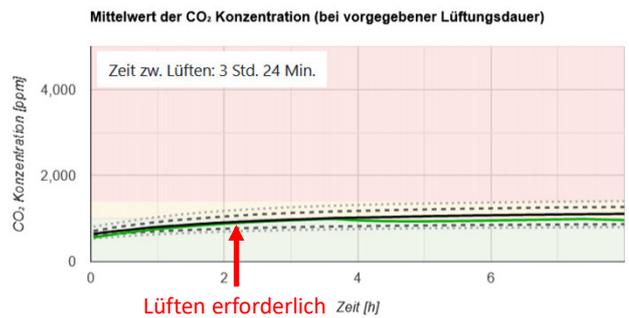
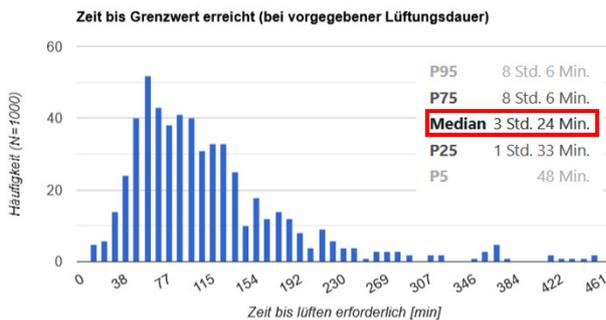
Simulation mechanische Lüftung ⓘ

20

20,0 m<sup>3</sup>/h



### Beispiel CO<sub>2</sub> Rechner: Schlafzimmer im MFH (Standard Neubau) Zeit zwischen Fensterlüftungs-Events damit < 1000 ppm



Zumutbar?      Median: 3h 24 min < 8h      -> Nein

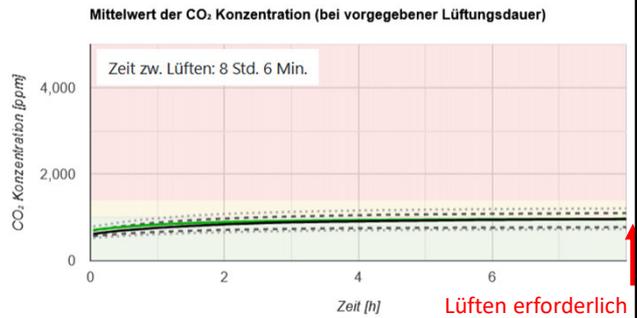
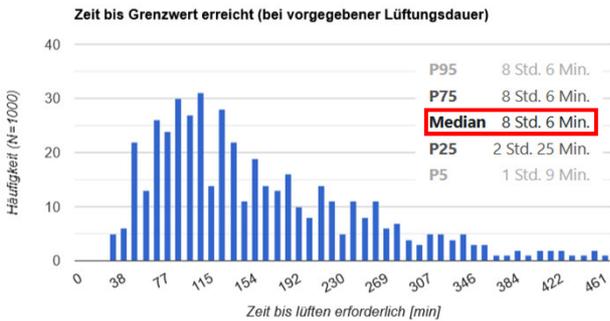
Simulation mechanische Lüftung ⓘ

30

30,0 m<sup>3</sup>/h



## Beispiel CO<sub>2</sub> Rechner: Schlafzimmer im MFH (Standard Neubau) Zeit zwischen Fensterlüftungs-Events damit < 1000 ppm



Zumutbar? Median: 8h 6 min > 8h -> Ja

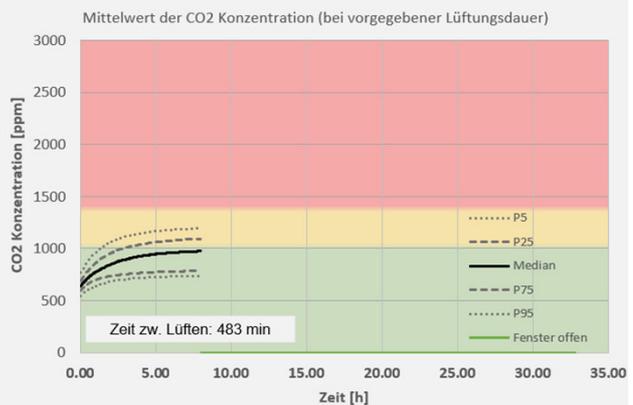
Simulation mechanische Lüftung ⓘ

40

40,0 m<sup>3</sup>/h



### Bewertung des gleitenden Mittelwert der CO<sub>2</sub>-Konzentration (Österr. IAQ Richtlinie)



## Eingabemaske Schimmelrisiko-Rechner

Zwei Szenarien werden bewertet (nur Wohnbau):

### 1. Anwesenheitsfall:

- mit Feuchtelasten aus "normalen" Nutzung
- mit NutzerInneneingriff (Fensterlüftung 2xTag)

### 2. Abwesenheitsfall (z.B. Winterurlaub)

- stark reduzierte Feuchtelasten (Pflanzen, Aquarium,..)
- ohne Nutzer:inneneingriff

### Ausgabe:

- Anzahl der Fälle (von 1000) wo  $a_w$ -Wert > 0,8

Feuchtelast  
Niedrig

Feuchtequellstärke pro m<sup>2</sup> bei Anwesenheit  
Hinterlegter Wertebereich  
0,4 +/- 0,1 g/(hm<sup>2</sup>)

Feuchtequellstärke pro m<sup>2</sup> bei Abwesenheit  
Hinterlegter Wertebereich  
0,1 +/- 0,1 g/(hm<sup>2</sup>)

Personenanzahl (gesamte Wohneinheit)  
Hinterlegter Wertebereich  
2,3 +/- 1,7

Feuchtequellstärke pro Pers bei Anwesenheit  
Hinterlegter Wertebereich  
55,0 +/- 6,3 g/(hPers)

Mittlere Raumtemperatur in gesamter Wohneinheit  
Hinterlegter Wertebereich  
21,0 +/- 1,2 °C

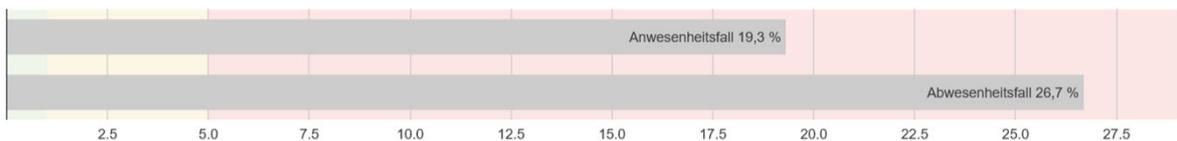
## Beispiel Schimmelrisiko: MFH (Standard Neubau)

Anzahl der Fälle mit  $a_w$ -Wert > 0,8

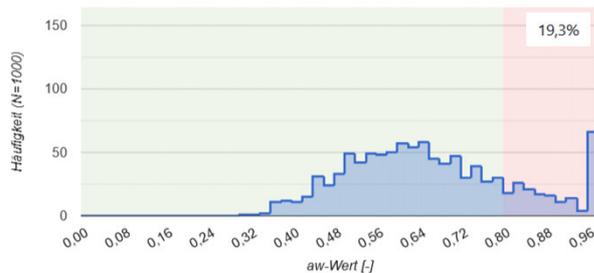
Ergebnis: Hohes Schimmelrisiko (über 5%)

Zusätzliche Luftmenge: 49 m<sup>3</sup>/h

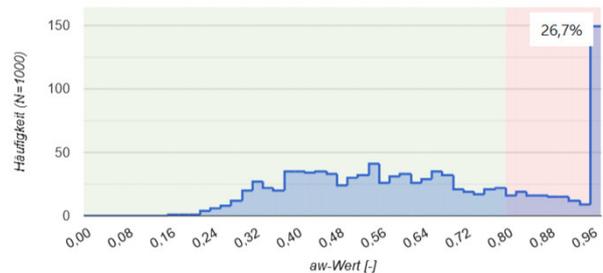
Freier Querschnitt: 620 cm<sup>2</sup>



Fälle mit Schimmelrisiko bei Anwesenheit



Fälle mit Schimmelrisiko bei Abwesenheit



## Beispiel Schimmelrisiko: MFH (Standard Neubau) + xx m<sup>3</sup>/h Grundlüftung Anzahl der Fälle mit a<sub>w</sub>-Wert > 0,8

### mit 30 m<sup>3</sup>/h Grundlüftung



1-5% -> mittleres Schimmelrisiko

### mit 60 m<sup>3</sup>/h Grundlüftung



<1% -> niedriges Schimmelrisiko

## Weitere Beispiele

Gebäudeart	Luftdichtheit (n50)	Fensterlüftung zumutbar?	Schimmelrisiko
MFH (Schlafzimmer)	Standard Neubau	N (<8h)	~26% (abs.)
EFH (Schlafzimmer)	Standard Neubau	N (<8h)	~11% (abs.)
EFH (Wohnzimmer, 50m <sup>2</sup> )	Standard Neubau	J (>2h)	~11% (abs.)
Büro	Standard Neubau	N (<2h)	n/a
Klassenzimmer	Undichter Altbau	N (<45min) / Y with ideal airing	n/a
Klassenz. (10 SchülerInnen)	Undichter Altbau	J (>45min)	n/a



## Zusammenfassung



- Tool bereits Online verfügbar!  
<https://www.energieinstitut.at/tools/lueftungskonzept/>
- Bewertet CO<sub>2</sub> Konzentration (bioeffluents removal) und Feuchte (a<sub>w</sub> Wert / Schimmelrisiko)
- Prüft ob Fensterlüftung und Infiltration ausreicht (mechanische Lüftung kann auch getestet werden)
- Stochastischer Ansatz gibt Information über Varianz / Unsicherheit der Ergebnisse
- Verteilfunktionen für hinterlegte Parameter (noch) "educated guess"
- Ergebnisse plausibel, aber Aktualisierung / Validierung mit empirischen Daten angestrebt

## Vielen Dank!

### Weitere Informationen / Details:

Rojas, G., Greml, A., Pfluger, R., & Tappler, P. (2023). Assessing the "sufficient ventilation" requirement for Austrian buildings: development of a Monte Carlo based spreadsheet calculation to estimate airing intervals and mould risk in window ventilated buildings. *International Journal of Ventilation*, 22(4), 336–345.

<https://doi.org/10.1080/14733315.2023.2198788>

Bericht (Deutsch) + xls Erstversion verfügbar:

<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/luefrungskonzept-oesterreich.php>

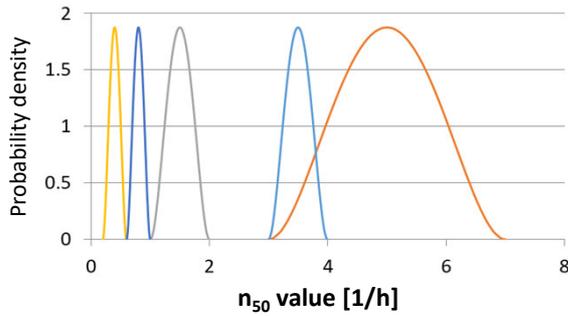
**Check it out @** <https://www.energieinstitut.at/tools/lueftungskonzept/>

**Get in touch:** [gabriel.rojas@uibk.ac.at](mailto:gabriel.rojas@uibk.ac.at)

[www.uibk.ac.at/bauphysik](http://www.uibk.ac.at/bauphysik)



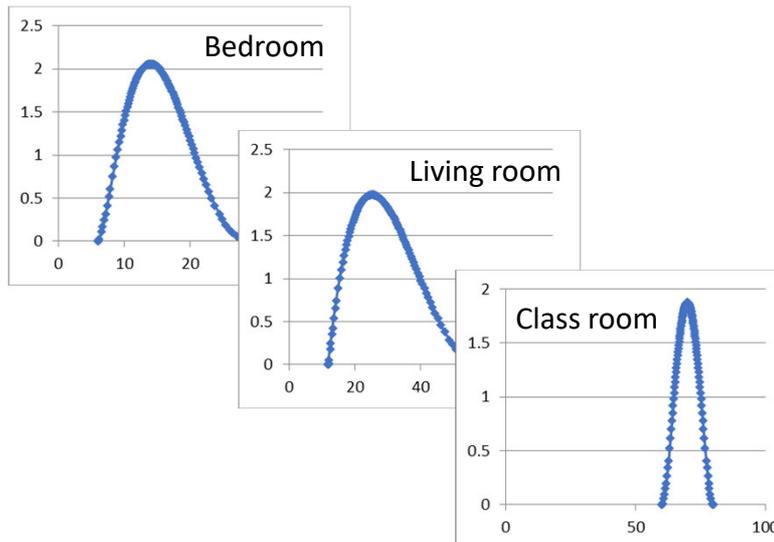
### Example: Assumed pdf for building airtightness



Old building - very leaky	3 – 7 [1/h]
Old building - standard	3 – 4 [1/h]
New building - standard	1 – 2 [1/h]
New building - airtight	0.6 – 1 [1/h]
New building - very airtight	0.2 – 0.6 [1/h]

So far: only educated guess due to lack of empirical data

### Example: Assumed pdf for room size



Others pdfs for:

- Teacher room
- Office (director/CEO)
- Office small
- Office large (open space)
- Meeting room