

PENDELLÜFTER: AKTUELLE FORSCHUNG ZU LUFTAUSTAUSCH UND THERMISCHEM WIRKUNGSGRAD

40 JAHRE
FRAUNHOFER ISE
#CreatingTheEnergyFuture

Wärmepumpen-Effizienz in Mehrfamilienhäusern: Heizung, Warmwasser, Lüftung und Komfort



Sven Auerswald

Dr. Constanze Bongs, Dr. Thibault Pflug, Arnulf Dinkel,
Raghavakrishna Devineni, Bruno Bavia Bampi

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Energietage 2021

Berlin, Fr, 23.04.2021

www.ise.fraunhofer.de

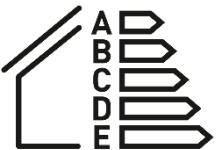
Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen
Bundestages.
FKZ.: 03ET1540B

AGENDA



- Motivation
- Feldmesskampagnen
 - Theorie: Luftaustausch
 - Ergebnisse
- Labormessungen
 - Messprinzip: Energieeffizienz
 - Teststand
- Zusammenfassung

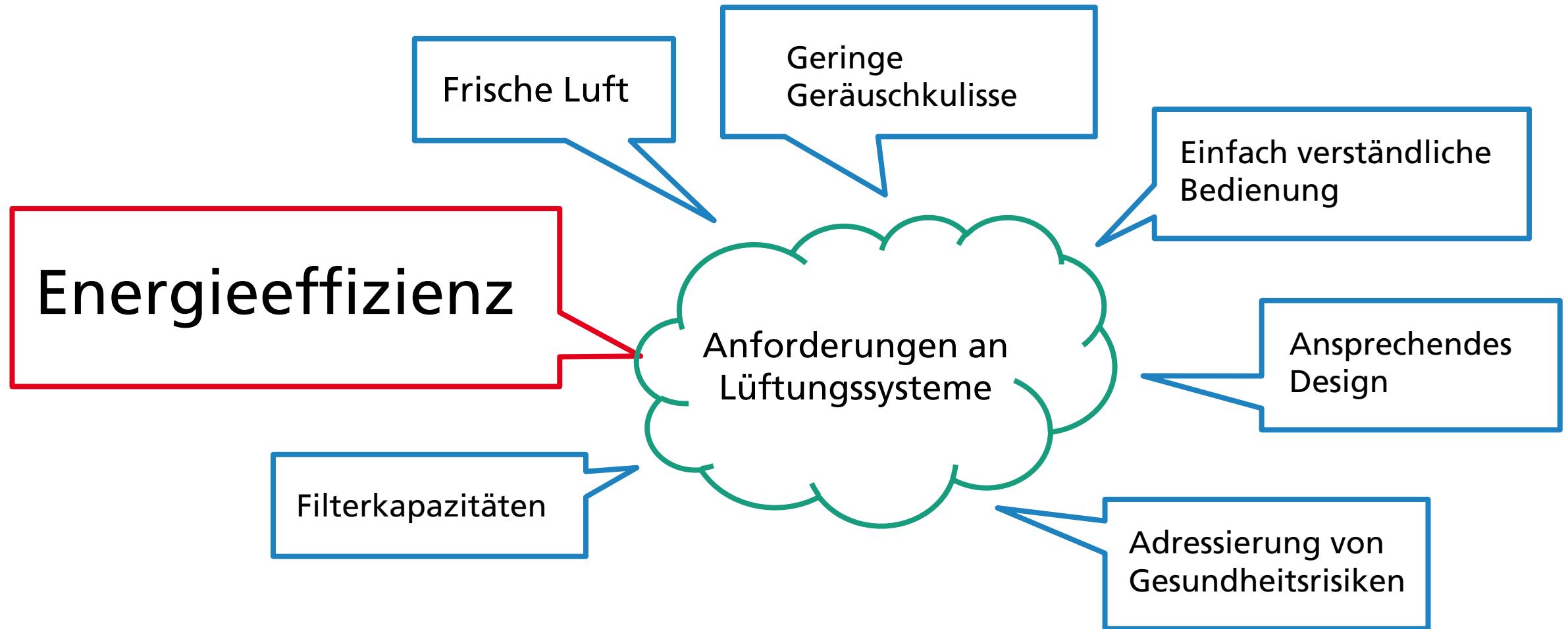


- 1) Zuluft,
- 2) Mehrfachnutzung der Frischluft über verbundene Räume,
- 3) Zirkulation in einem Raum,
- 4) Abluft



Motivation

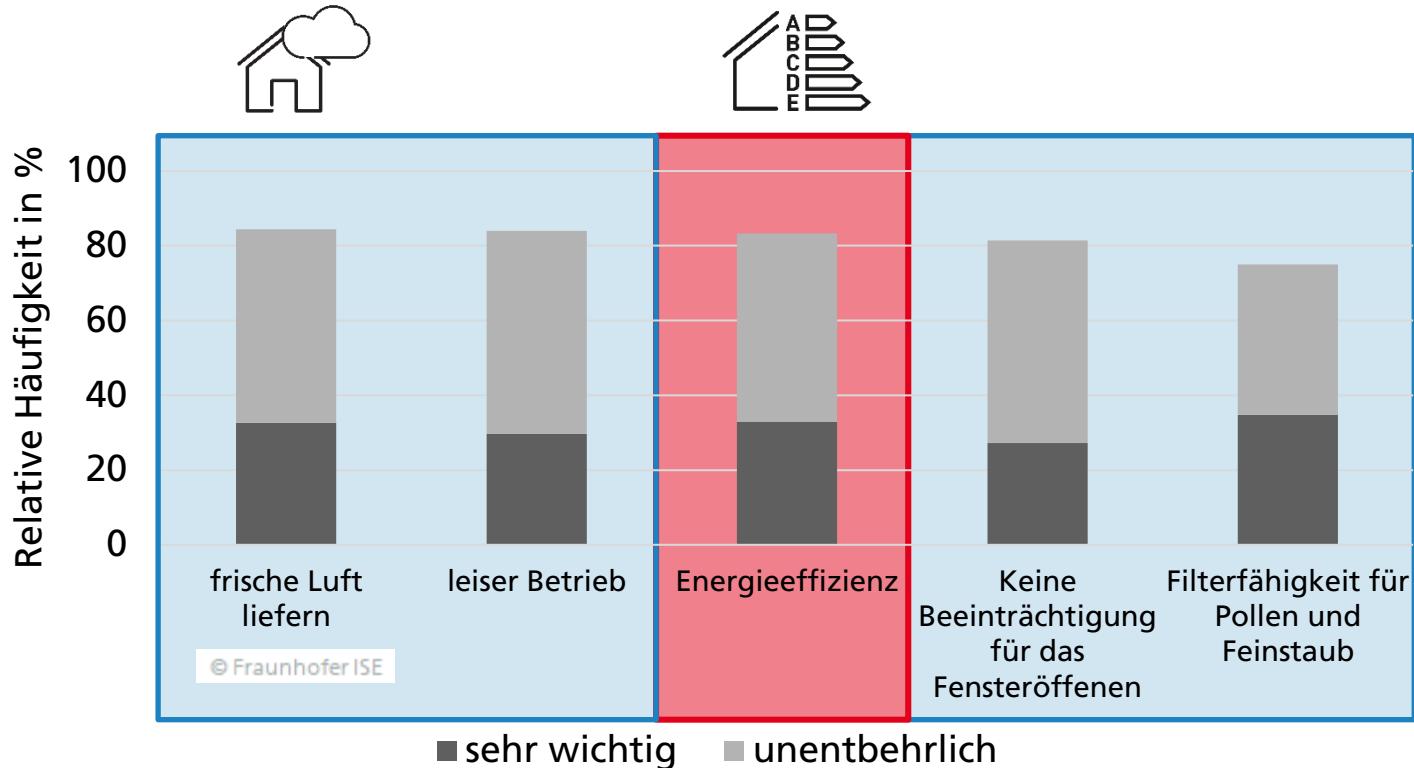
Was ist wichtig für energieeffiziente Gebäude und deren Lüftungssysteme?



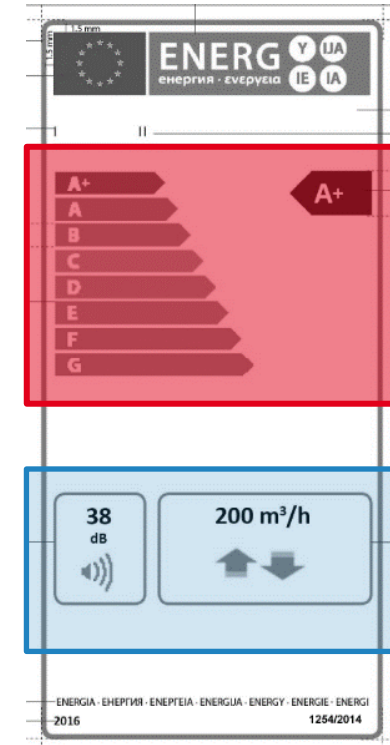
Motivation

Anforderungen von Nutzern im Vergleich zum Gesetzgeber

Nutzer:



Gesetzgeber:



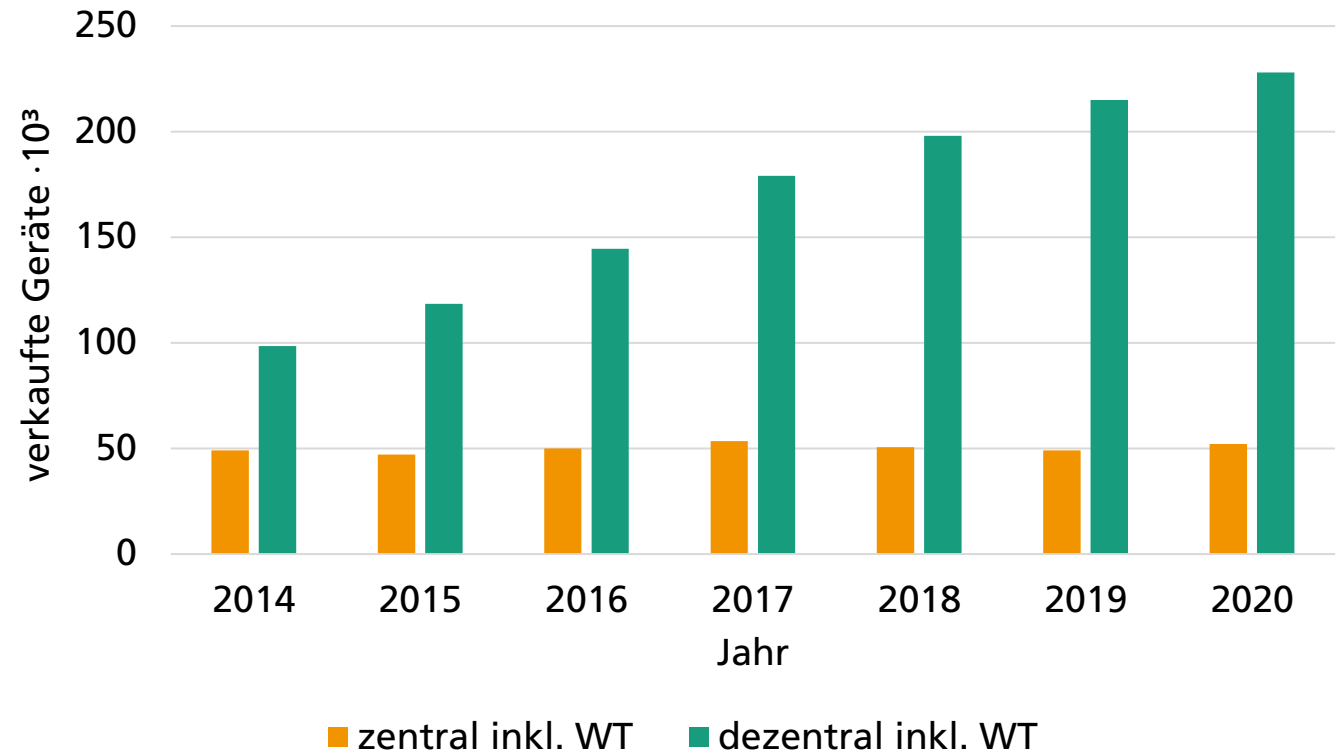
Quellen:

Maier, D., ... Mixed-Methods-Studie zu Lüftungsverhalten ..., Masterarbeit, 2020.
EU KOMMISSION, EU 1254/2014 & EU 1253/2014, 2014.

Motivation

Marktentwicklung von kontrollierten Wohnungslüftungsgeräten (KWL)

- Dezentrale Lüftungssysteme sind in den frühen 2000er Jahren aufgekommen.
- Mittlerweile haben ca. 50 verschiedene Firmen entsprechende Geräte im Programm.

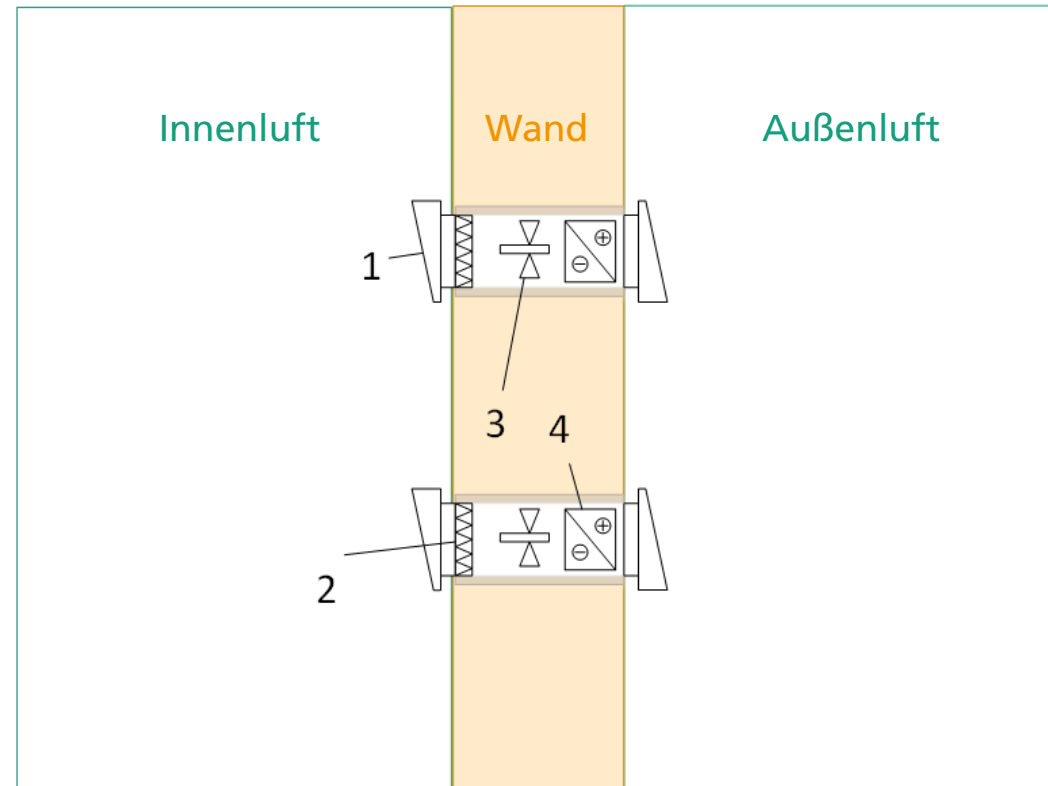


Untersuchtes Lüftungssystem

Pendellüfter

Charakteristische Eigenschaften:

- dezentral
- fassaden-integriert
- regenerativer Wärmeaustausch
- alternierender Betrieb
- T-Verhältnis: $\sim 85 \% v. \Delta T$
- Max. V-Strom: $\sim 46 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



- 1) Innen- & Außenblende,
- 2) Filter,
- 3) axial Ventilator,
- 4) regenerativer Wärmetauscher

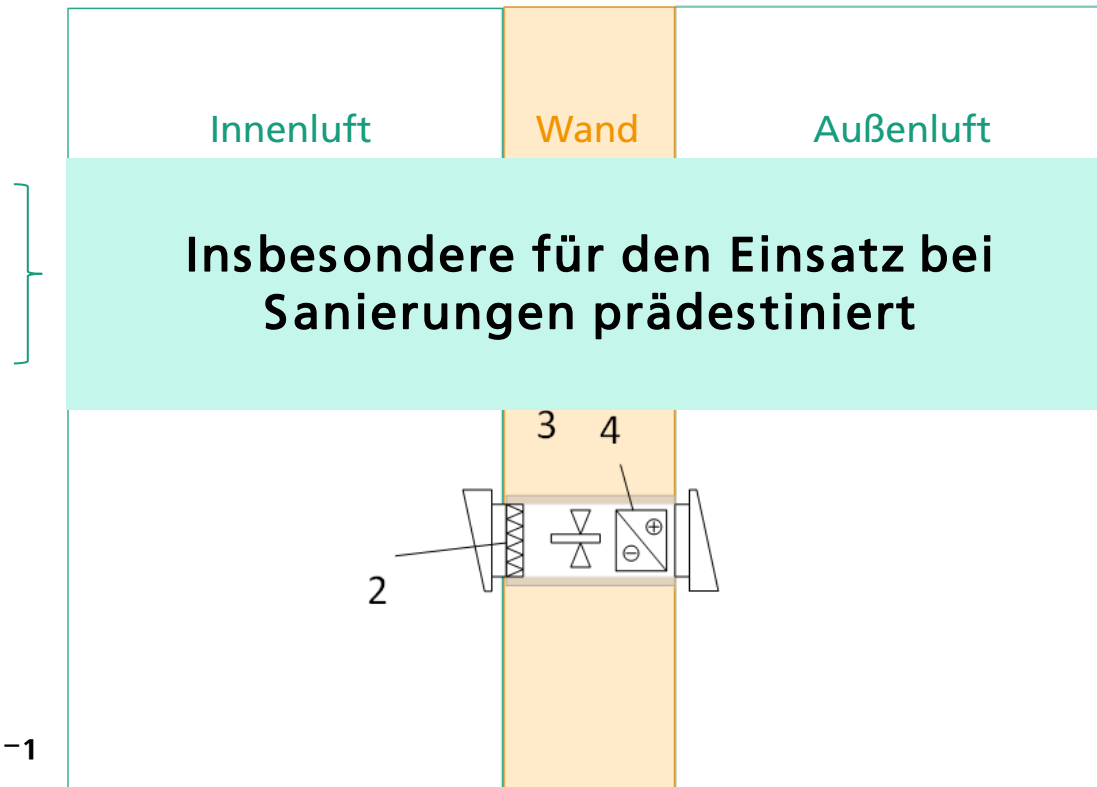
Untersuchtes Lüftungssystem

Pendellüfter

Charakteristische

Eigenschaften:

- dezentral
- fassaden-integriert
- regenerativer
Wärmeaustausch
- alternierender Betrieb
- T-Verhältnis: $\sim 85\% v. \Delta T$
- Max. V-Strom: $\sim 46 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

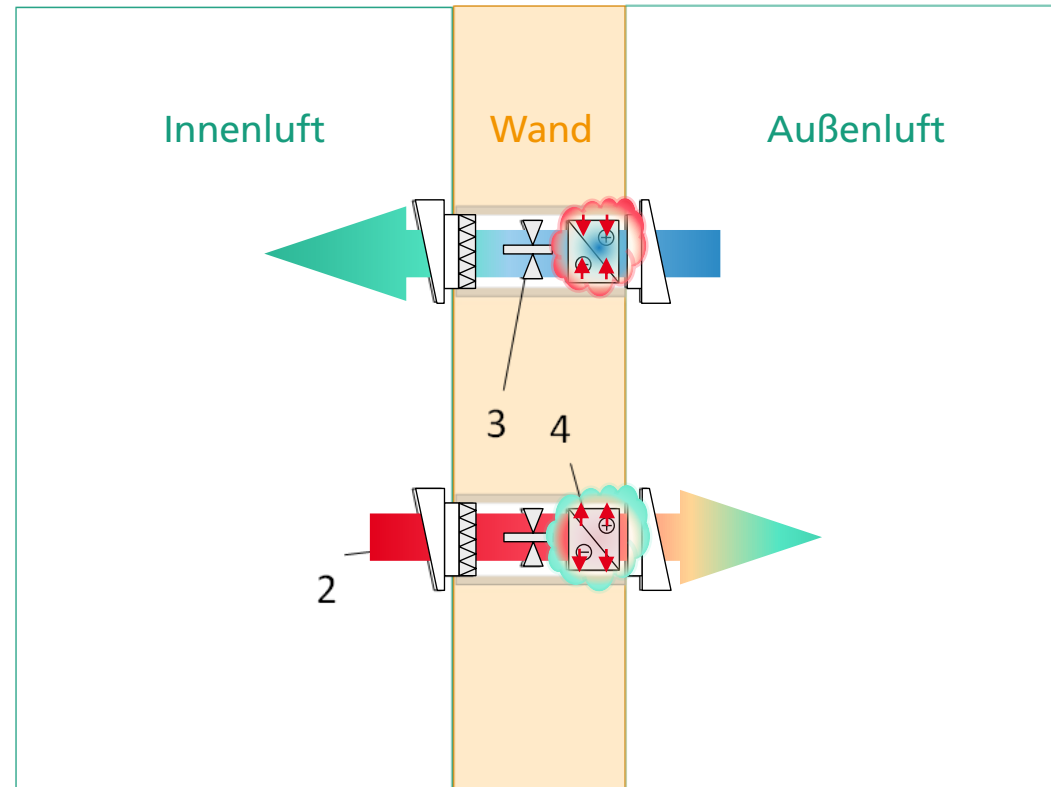


- 1) Innen- & Außenblende,
- 2) Filter,
- 3) axial Ventilator,
- 4) regenerativer Wärmetauscher

Untersuchtes Lüftungssystem

Pendellüfter

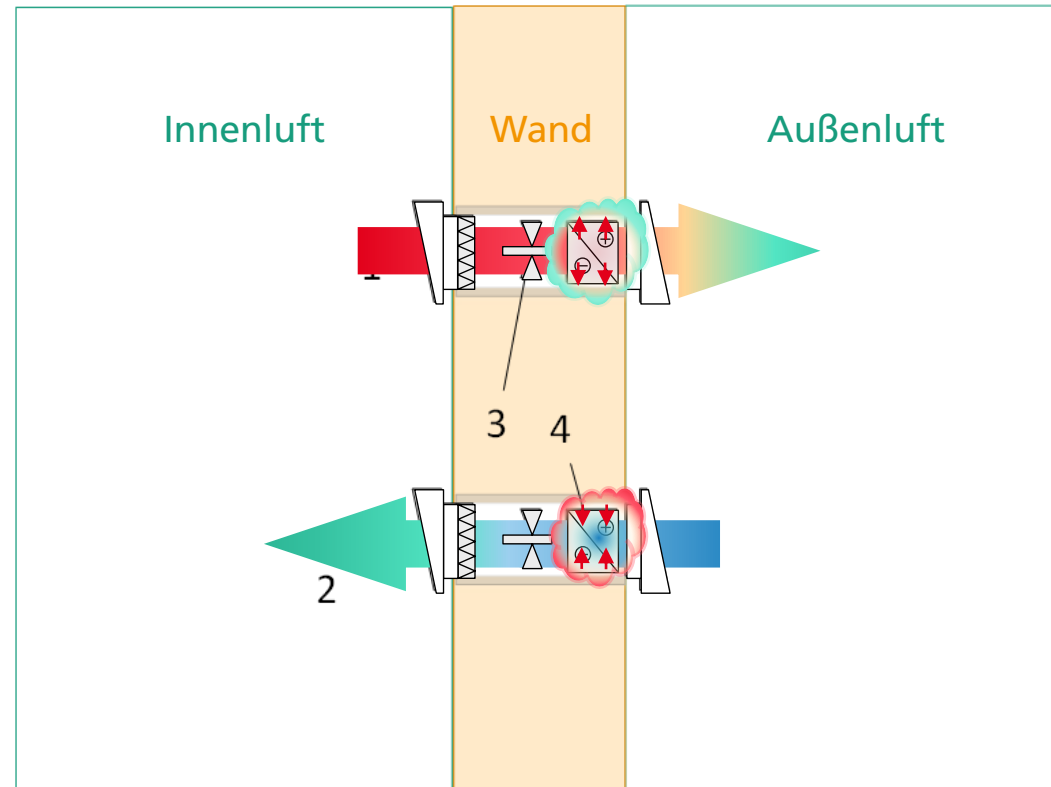
Phase 1



Untersuchtes Lüftungssystem

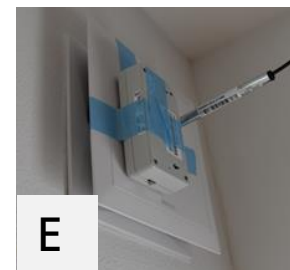
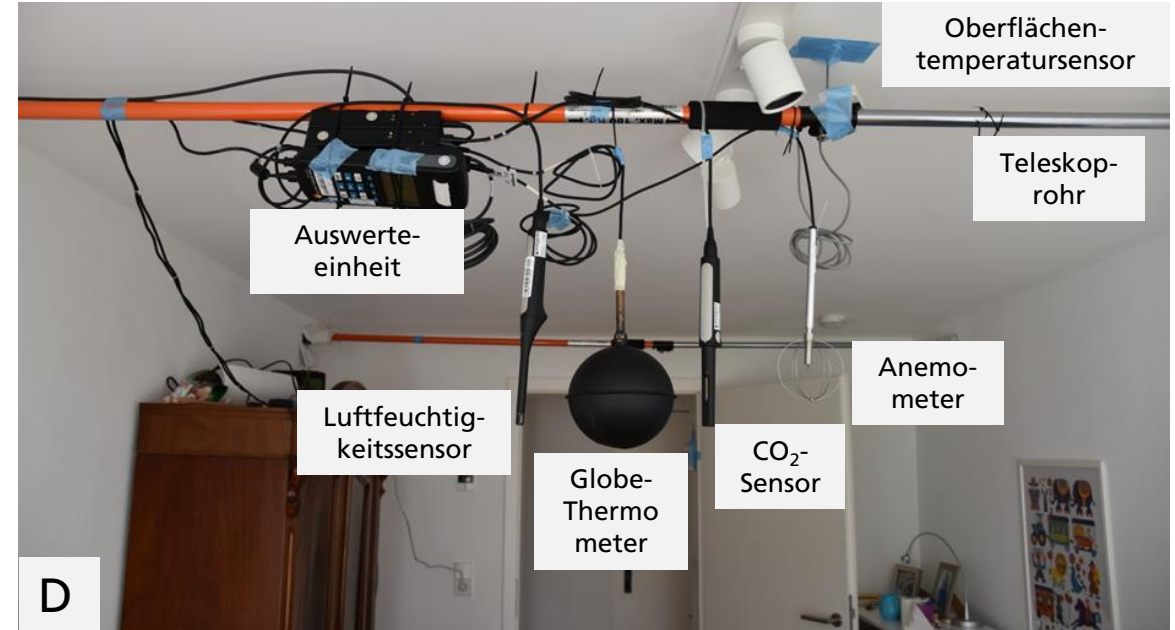
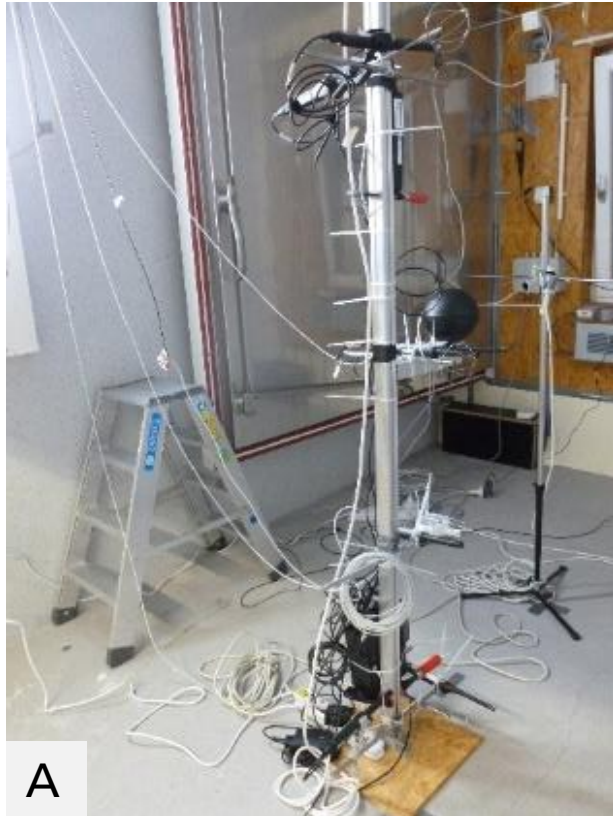
Pendellüfter

Phase 2



FELDMESSUNGEN

Lüftungswirksamkeit

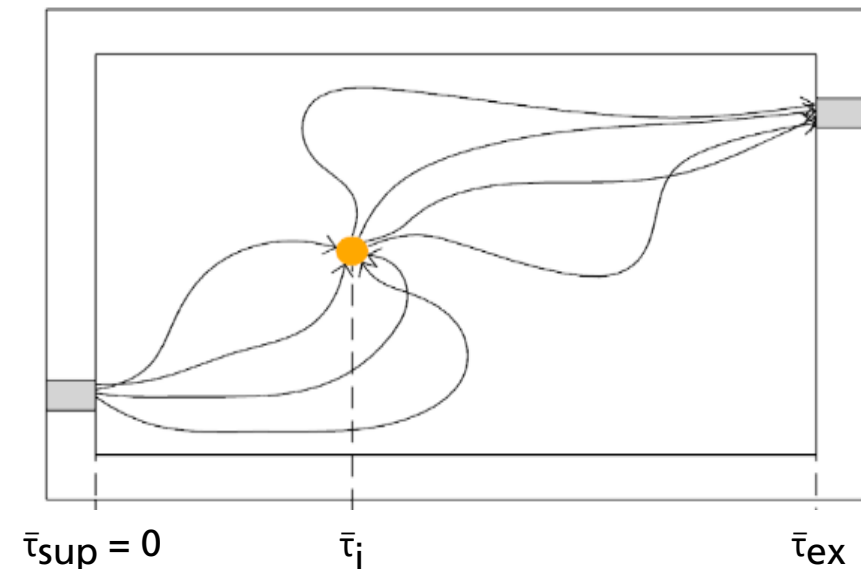
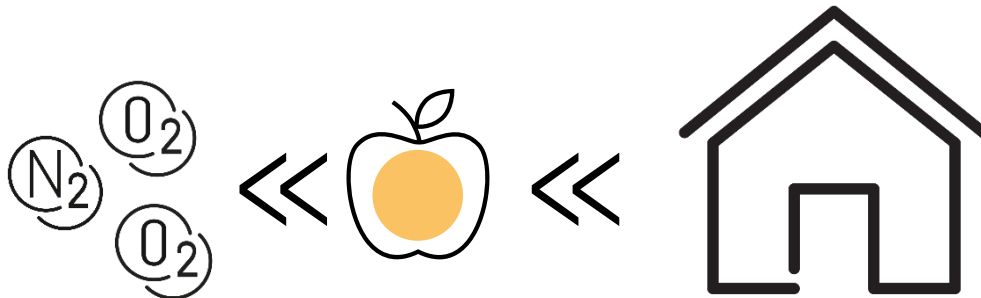


Theorie: Lüftungswirksamkeit

Luftaustauschwirkungsgrad auf Basis der Luftalterbestimmung



- Lokales Luftalter $\bar{\tau}_i$
 - Die Zeit, die im Mittel vergeht bis ein gedachtes, im Vergleich zur Gebäudezone, sehr kleines Luftvolumen*, von der Zuluftdüse an einen relevanten Ort in der Gebäudezone gewandert ist.



Quelle:

Sandberg, M. Building and Environment 1981, 16, 123–135, doi:[10.1016/0360-1323\(81\)90028-7](https://doi.org/10.1016/0360-1323(81)90028-7).

Sandberg, M.; Sjöberg, M. Building and Environment 1983, 18, 181–197, doi:[10.1016/0360-1323\(83\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0360-1323(83)90026-4).

Anmerkungen:

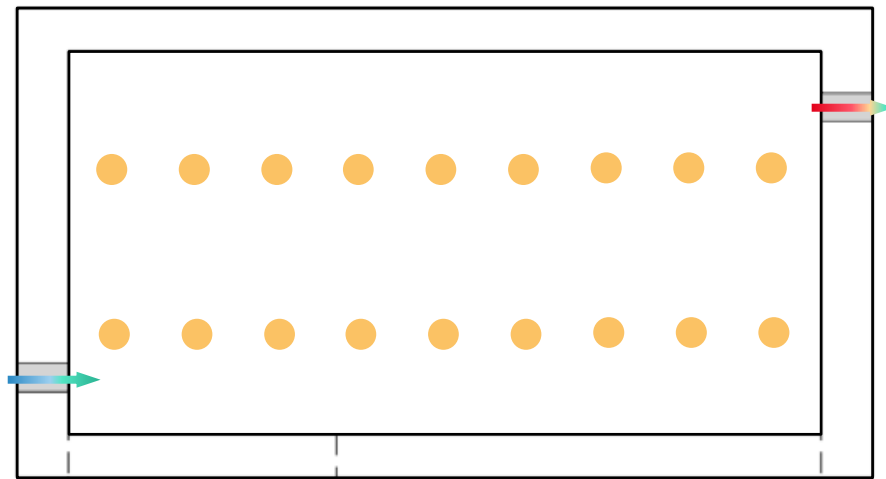
* mit noch immer unendlich vielen Gas-Molekülen

Theorie: Lüftungswirksamkeit

Luftaustauschwirkungsgrad auf Basis der Luftalterbestimmung

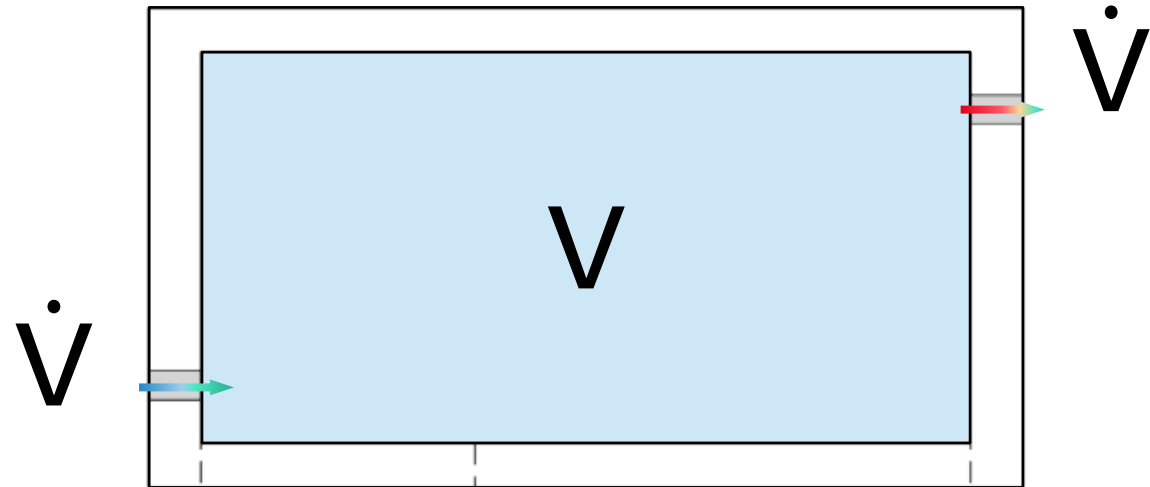


- Mittleres Luftalter des Raumes $\langle \bar{\tau}_j \rangle$
= Kehrwert der räumlich gemittelten, bereitgestellten Luftwechselrate (EN 16798-1)



$$\langle \bar{\tau}_j \rangle = \sum_{j=1}^N \bar{\tau}_j \cdot N^{-1} = \frac{1}{\langle \bar{n} \rangle}$$

- Nominales Luftalter τ_{nom}
= Kehrwert der nominalen Luftwechselrate (DIN 1946-6)



$$\tau_{\text{nom}} = \frac{V}{\dot{V}} = \frac{1}{n_{\text{nom}}}$$

Quellen:

Theorie: Lüftungswirksamkeit

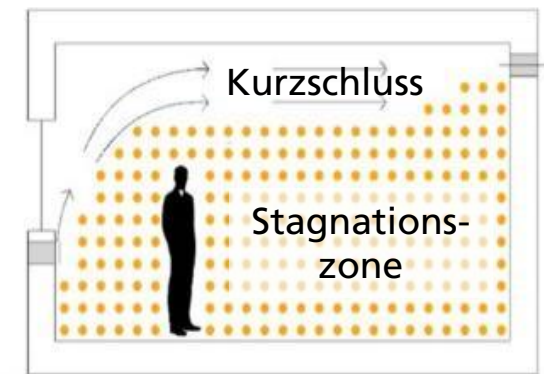
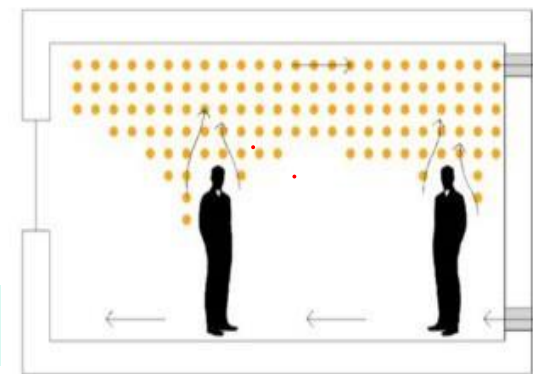
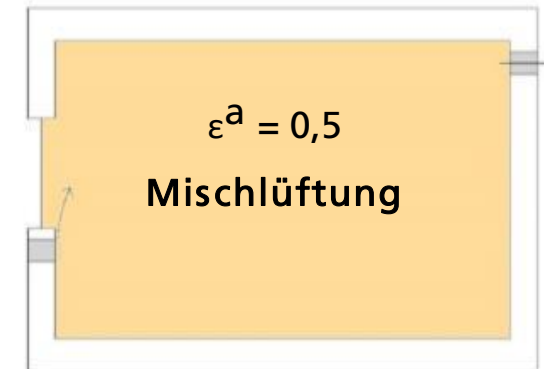
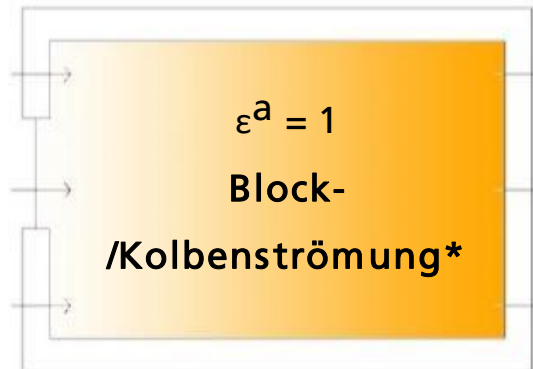
Lüftungseffizienz ist ein Baustein für die Energieeffizienz!



- Luftaustauschwirkungsgrad: $\epsilon^a = \frac{\langle \bar{n} \rangle}{2 \cdot n_{\text{nom}}}$

Prof. E. Skåret (1986):

„Regel Nr. 1 bei der Konfiguration eines effektiven Lüftungssystems ist daher eine Auslegung auf einen Luftaustauschwirkungsgrad über 50%.“



Zielbereich

$$0,5 \leq \epsilon^a < 1$$

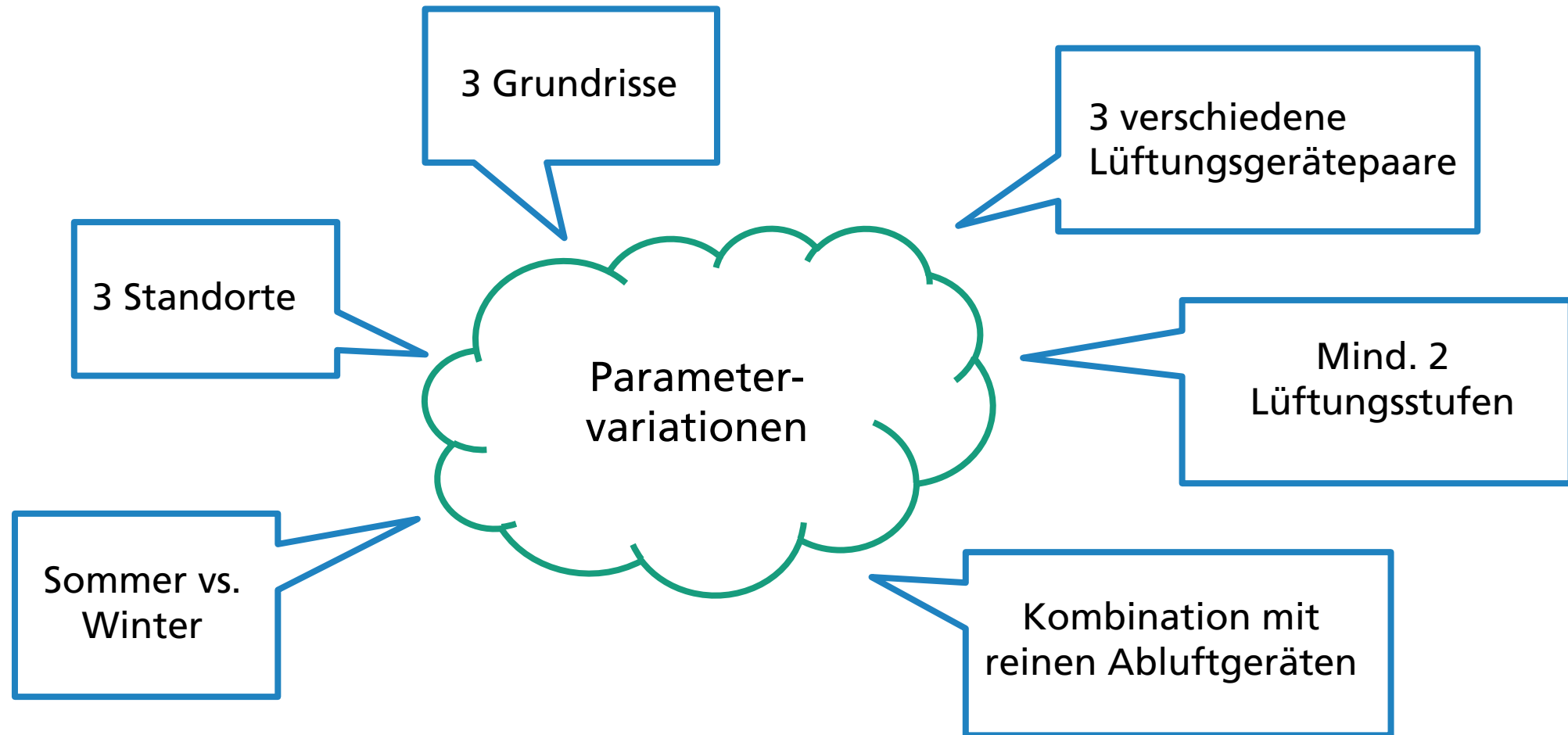
$$\epsilon^a < 0,5$$

Quellen:

Federspiel, C.C. Indoor Air 1999, 9, 47–56, doi:[10.1111/j.1600-0668.1999.t013-00008.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1999.t013-00008.x).
Skåret, E. Environment International 1986, 12, 419–427, doi:[10.1016/0160-4120\(86\)90057-7](https://doi.org/10.1016/0160-4120(86)90057-7).
Mundt, E., et. al. Rehva: Bruselas, 2004, ISBN [2-9600468-0-3](https://www.rehva.europa.eu/~/media/Files/2004/04/2004_04_03_29600468-0-3.pdf).
* Blockströmung ohne Diffusion nach Federspiel und Sandberg

Methodik: Lüftungswirksamkeit

Untersuchte Parametervariationen



Methodik: Lüftungswirksamkeit

Grundrisse & Sensorpositionen



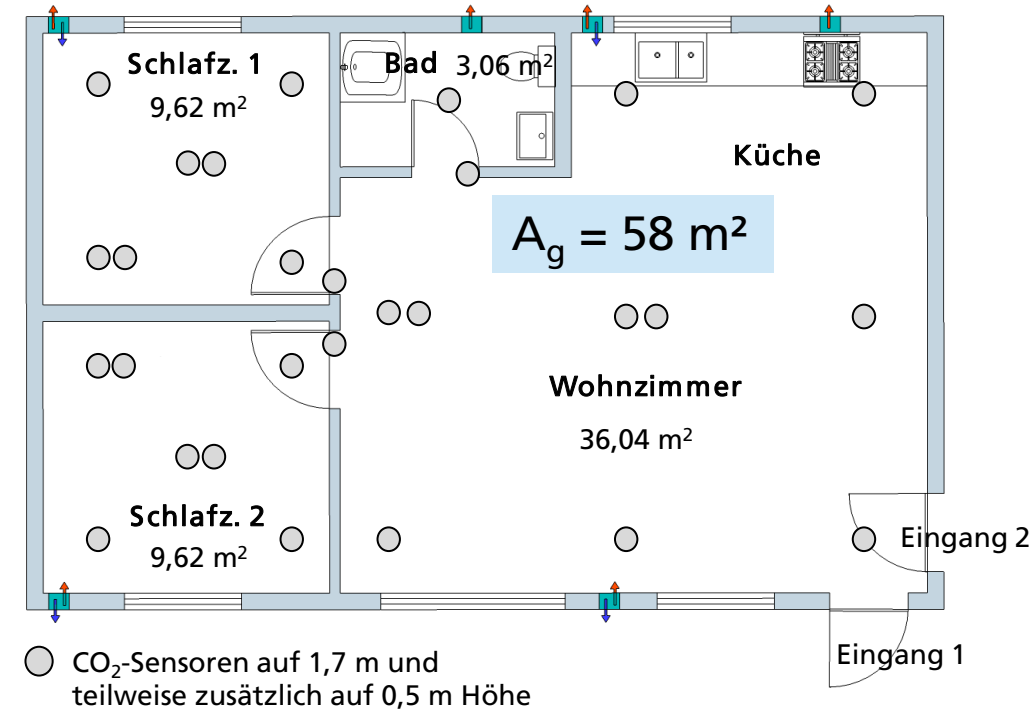
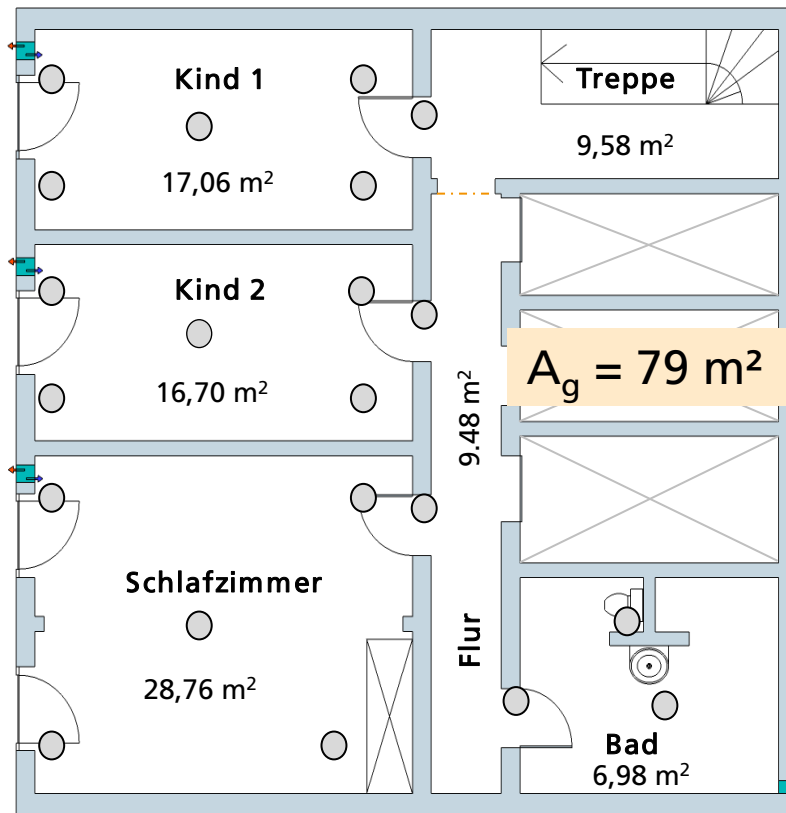
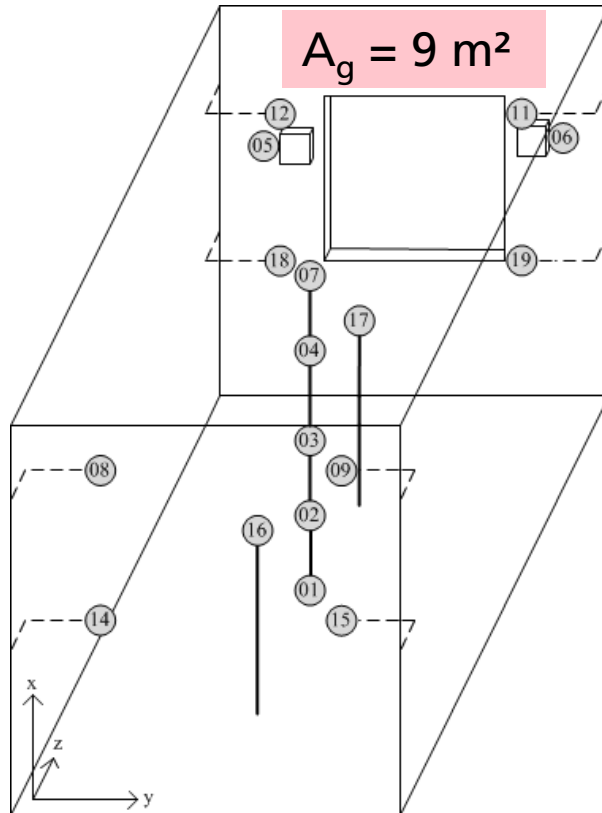
Voruntersuchungen
im Labor 2019
Grundriss 1, Gerätepaar 1

1. Feldmesskampagne
Sommer 2019
Grundriss 2, Gerätepaar 2

2. Feldmesskampagne
Winter 2020
Grundriss 2, Gerätepaar 2

3. Feldmesskampagne
Winter 2020
Grundriss 3, Gerätepaar 3

4. Feldmesskampagne
Sommer 2020
Grundriss 3, Gerätepaar 3



Theorie: Lüftungswirksamkeit

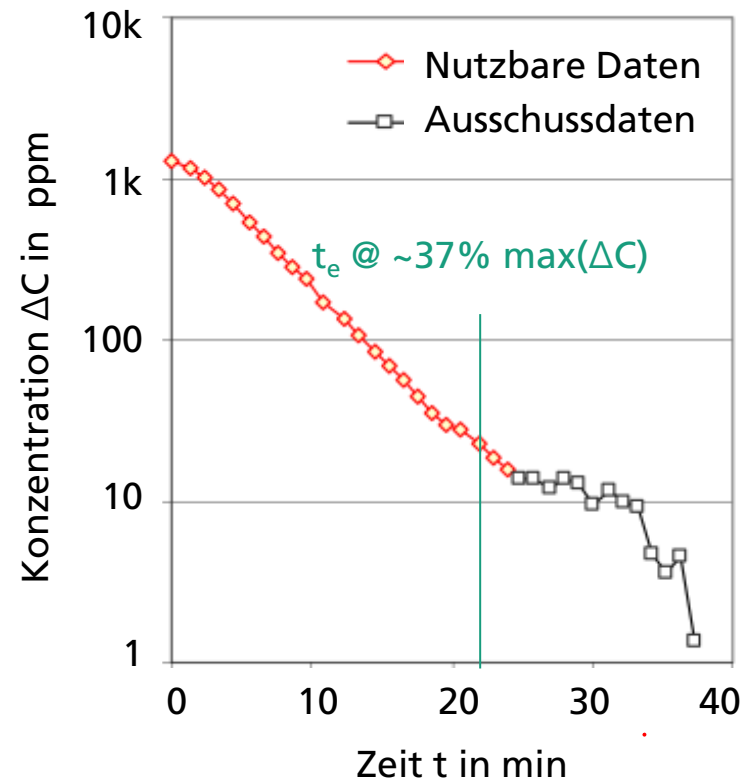
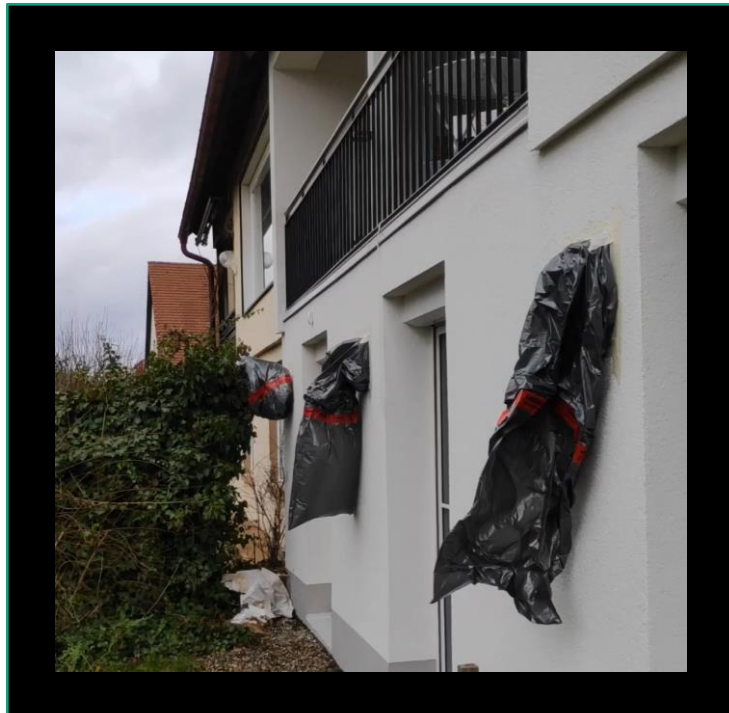
Luftaustauschwirkungsgrad auf Basis der Luftalterbestimmung



1. Anreichern

2. Abklingkurve messen

3. Luftalter berechnen



■ Definition: Lokales Luftalter $\bar{\tau}_i$

$$\bar{\tau}_i = \frac{1}{\Delta C(t_0)} \cdot \int_{t_0}^{t_e} \Delta C(t) dt + \frac{\Delta C(t_e)}{\lambda_{\text{tail}}}$$

■ $\Delta C = C_{\text{acc}} - C_{\text{nat}}$

C_{acc} ... Angereichert

C_{nat} ... natürliche Hintergrundkonzentration

Methodik: Lüftungswirksamkeit

Grundrisse & Sensorpositionen

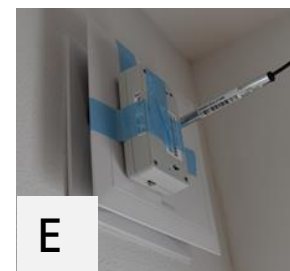
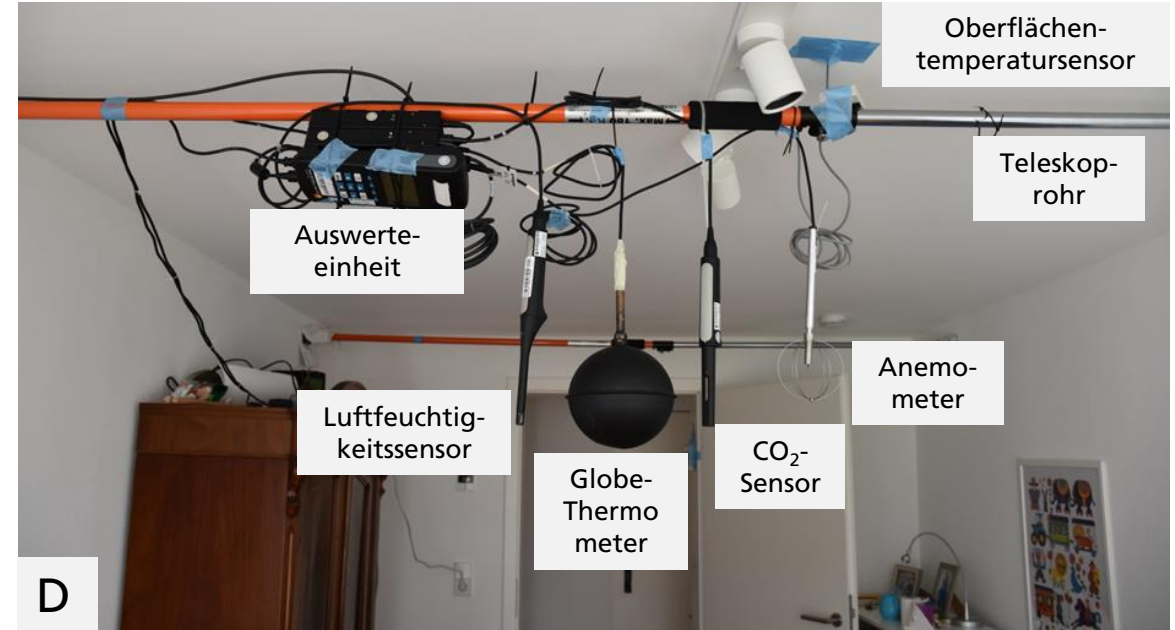
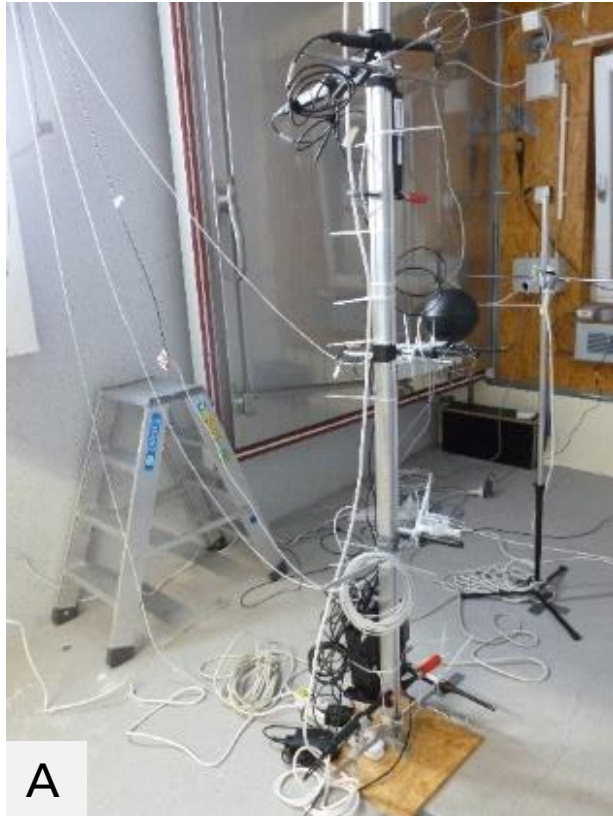
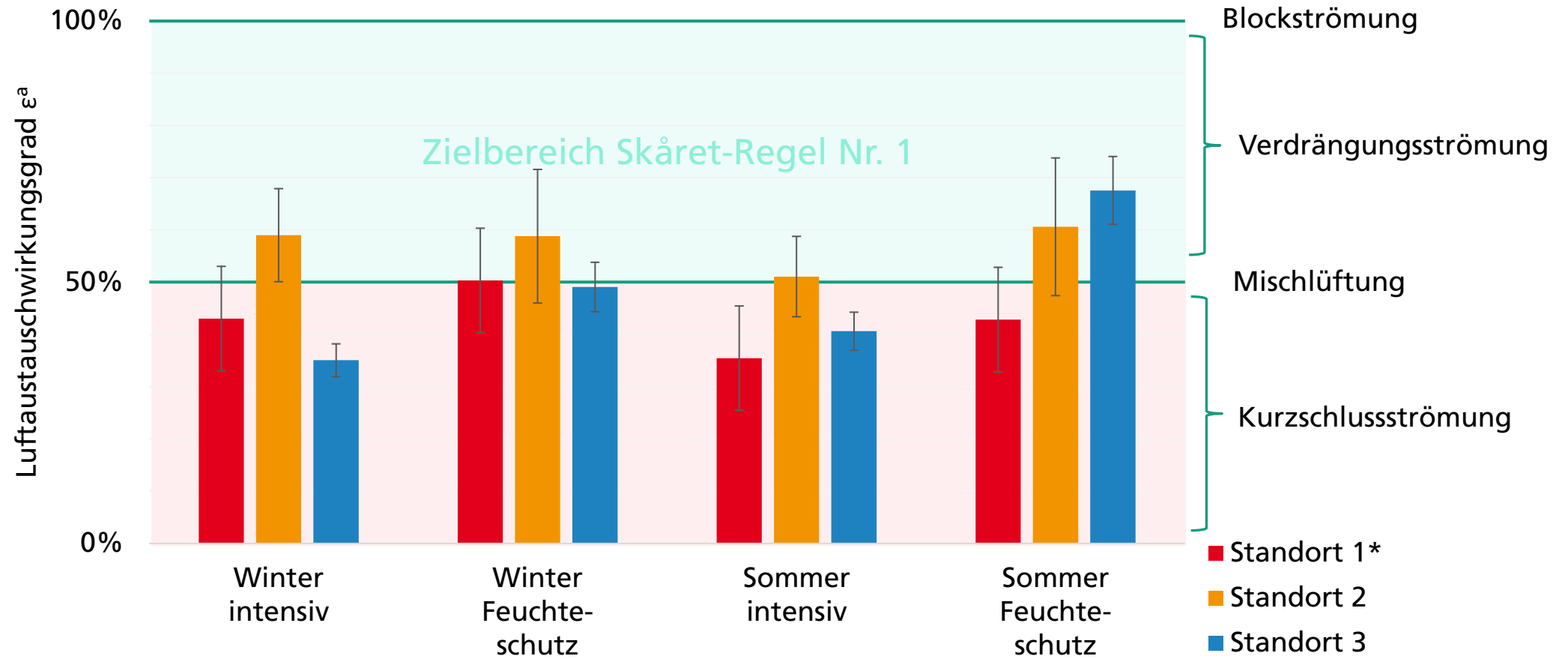


Abb. 10. Kollage von Eindrücken aus den Feldmessungen

Ergebnisse – Aller Messkampagnen

Globaler Luftaustauschwirkungsgrad



Quellen:

Auerswald, S. et. al., *MDPI Energies* **2020**, 13, 5817, doi:[10.3390/en13215817](https://doi.org/10.3390/en13215817).

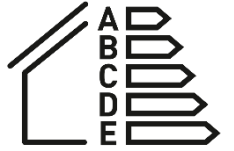
Devineni, R. Master Thesis; Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021.

Anmerkung:

* Die Detailtiefe der Unsicherheitsrechnung für Standort 1 ist nicht vergleichbar mit der, der beiden anderen, daher wird diese hier mit dem Maximum der anderen beiden angegeben.

LABORMESSUNGEN

Energieeffizienz



Herausforderungen:

- Kleine Geräte
 - Platzierung von Sensoren?
- Zeitliche Trennung von Zu- & Abluft
 - Kontinuierliche Energiebilanz?
- Alternierender Betrieb
 - Einstellung stabiler Messbedingungen?

Lösung:

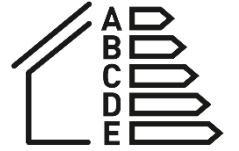
- DIBt Spülluftverfahren
- Ansätze:
 - Verlagerung und Vergrößerung des Bilanzraumes
 - Gleichzeitige Vermessung von min. 2 Geräten in entgegengesetztem Betrieb
 - 2 Geräte ergeben ausgeglichene Massenströme die den neuen Bilanzraum „stören“.

Quellen:

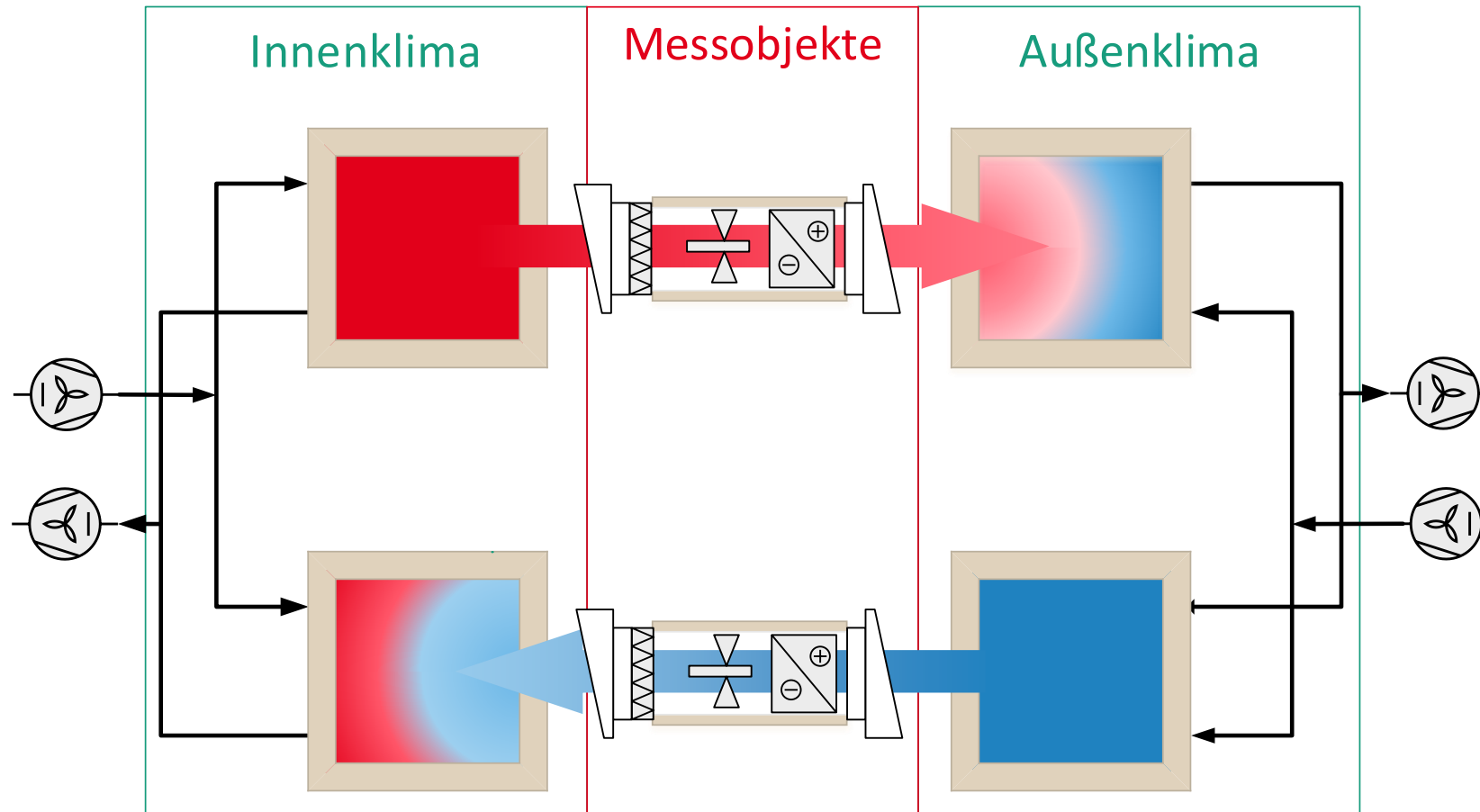
Özbiyik, T., Fraunhofer IRB Verlag: Stuttgart, 2017, ISBN [978-3-8167-9887-3](#).
Klein, B. et. al.. HLH 2018, 69, 33–36.
Mathis, P. et. al. [EwWalt: TGA Report](#), 2019.
DIN EN 13141-8 Entwurf:2021-02, doi:[10.31030/3198406](#).

Messprinzip: Energieeffizienz Pendellüfter

Spülluftverfahren nach DIBt & DIN EN 13141-8

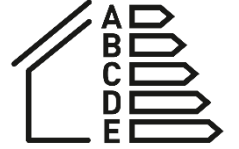


Zu bestimmender stationärer Bezugszustand

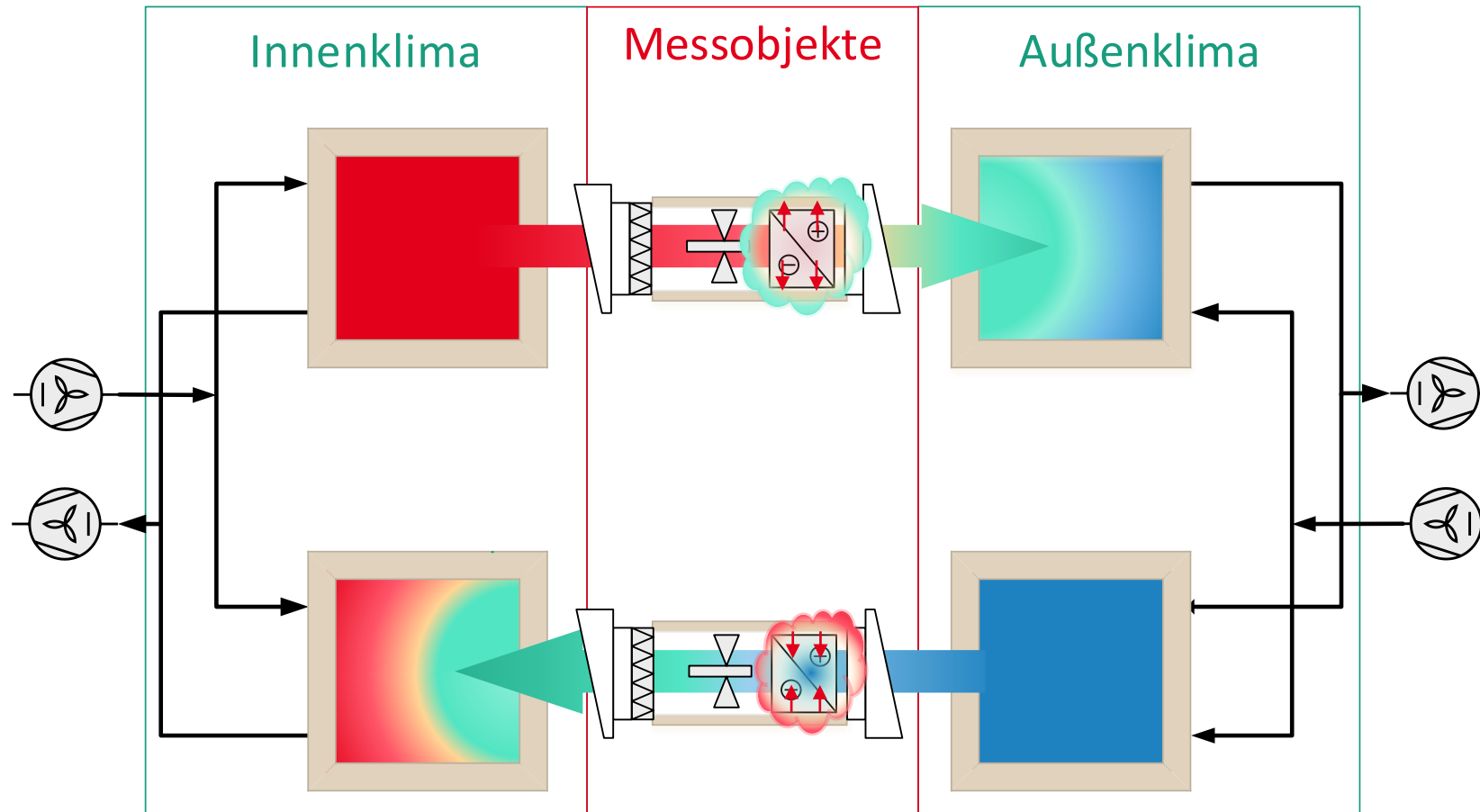


Messprinzip: Energieeffizienz Pendellüfter

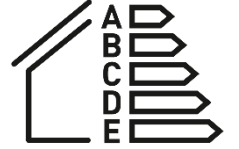
Spülluftverfahren nach DIBt & DIN EN 13141-8



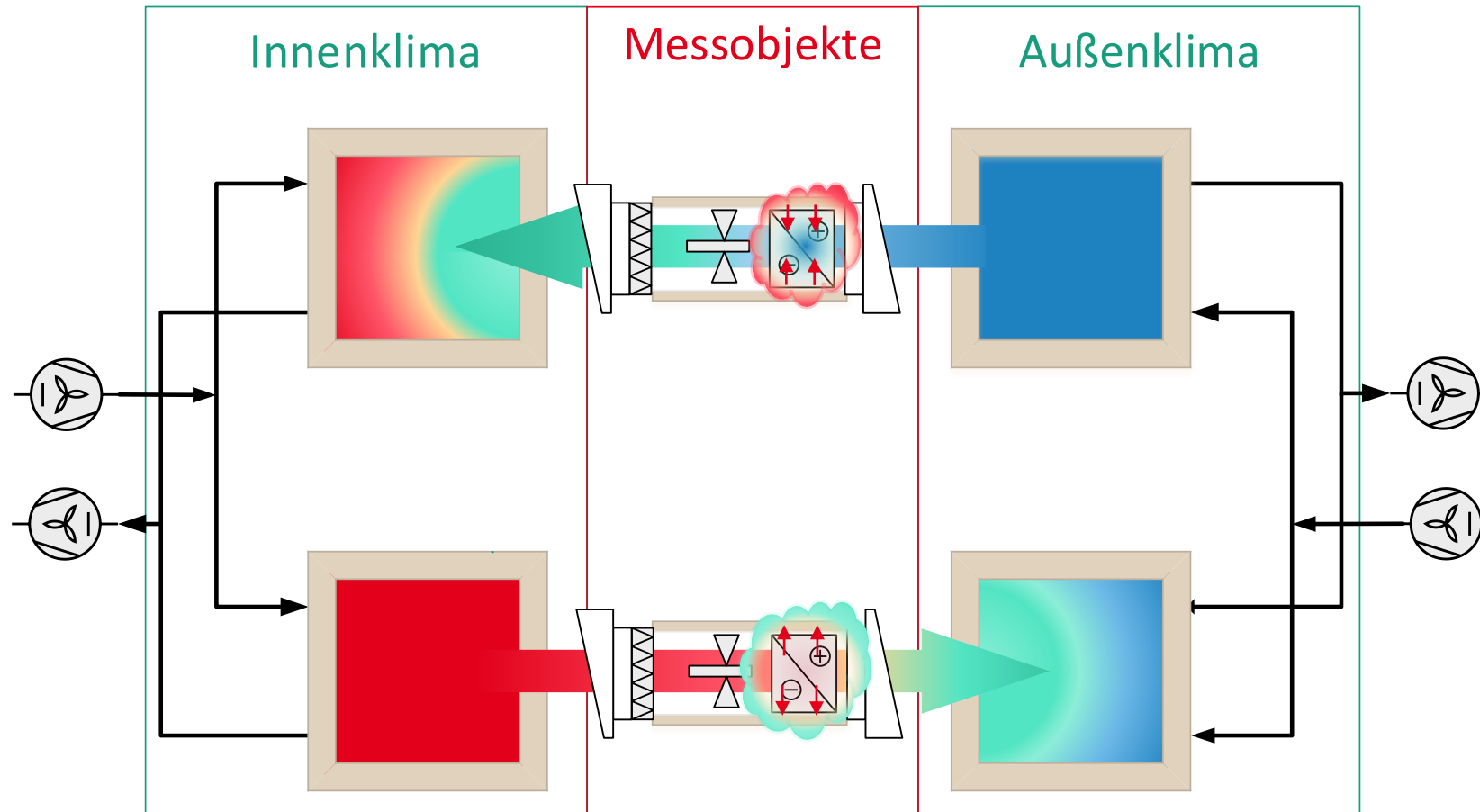
Zu messender alternierender Betrieb – Phase 1



Messprinzip: Energieeffizienz Pendellüfter Spülluftverfahren nach DIBt & DIN EN 13141-8

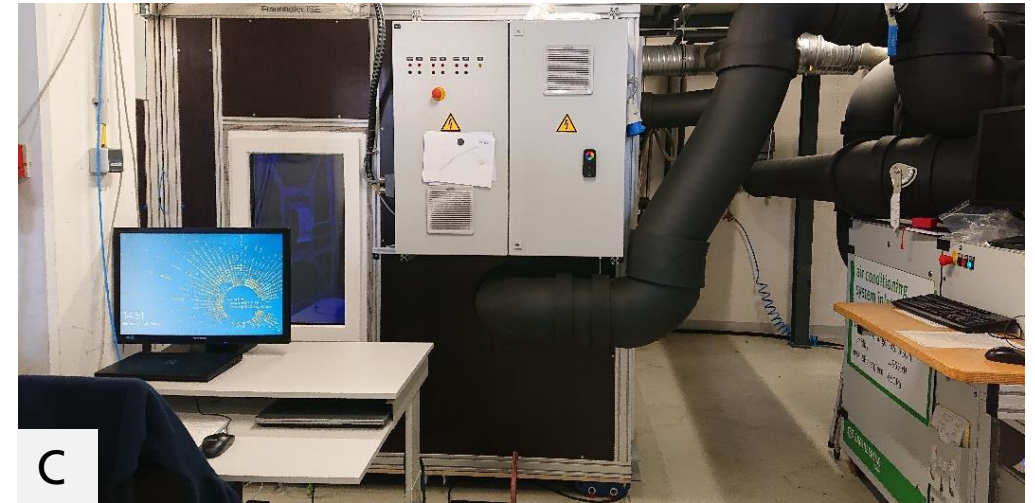
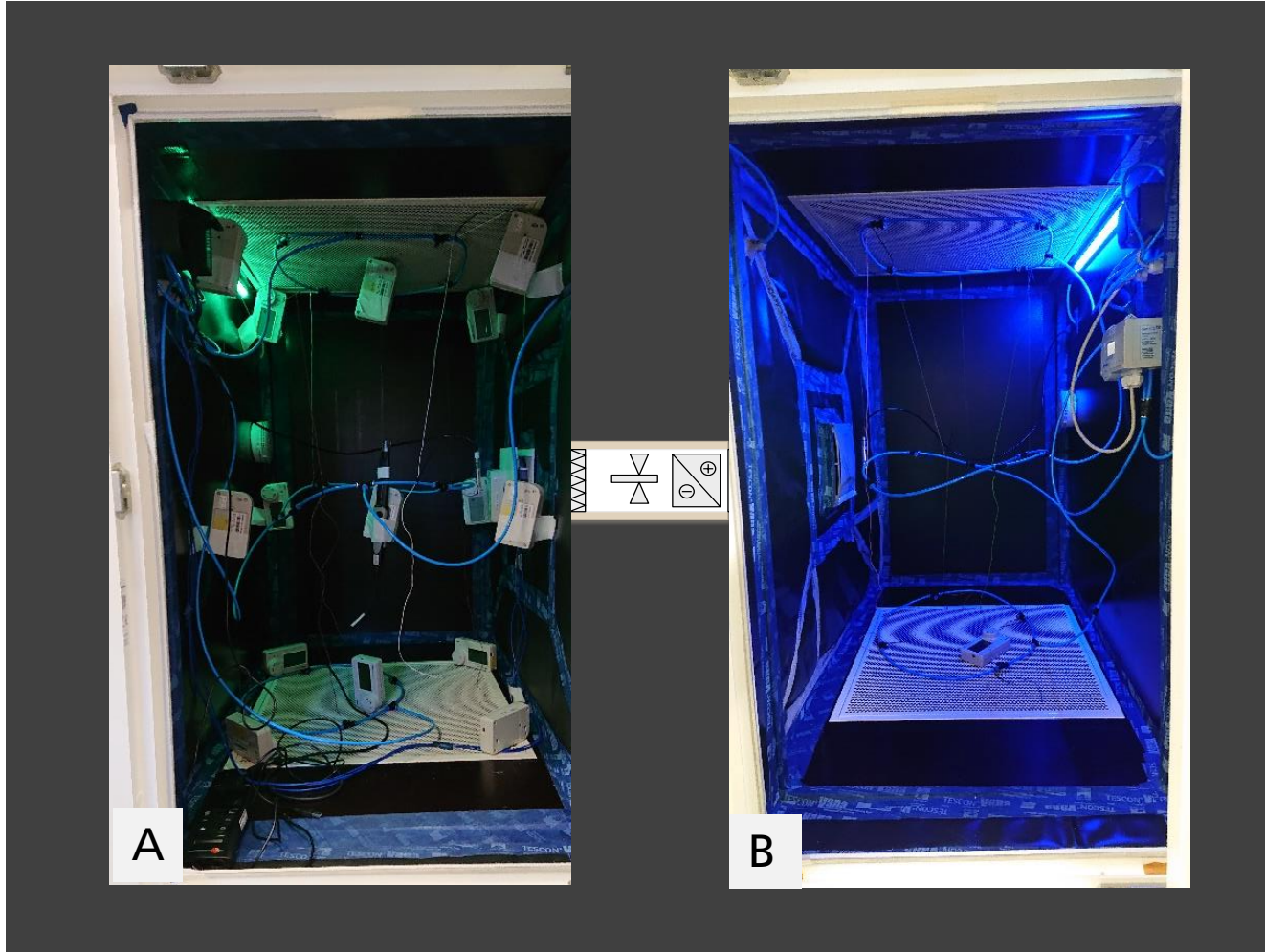
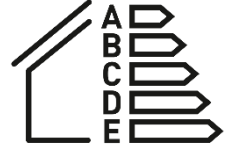


Zu messender alternierender Betrieb – Phase 2



Praxis: Energieeffizienz Lüftungsgeräte

Spülluftverfahren nach DIN EN 13141-8 am Fraunhofer ISE



- A) Eine der beiden Innenluftboxen ausgestattet mit Spurengasmesstechnik
B) Eine der beiden Außenluftmessboxen
C) MSR-System und Anschlussleitungen an das Luftkonditionierungssystem der Außenluftseite.

Praxis: Energieeffizienz Lüftungsgeräte

Kenndaten Spülkammerteststand Fraunhofer ISE

Eigenschaft	Messbereich	Unsicherheit (k=2)
El. Leistung	[17,5; 66,5] W	< ±48 mW (< ±0,11 %v.W.)
Temperatur	[-15; 35] °C	< ±0,12 °C (< ±0,24 %v.B.)
Luftfeuchte	[0; 90] %r.F. & [90; 100] %r.F.	< ±1,1 %r.F. & < ±1,8 %r.F.
Absolutdruck	[80; 120] kPa	< ±40 Pa (< ±0,1 %v.B.)
Differenzdruck	[-60; 60] Pa	< ±0,5 Pa (< ±0,42 %v.B.)
Spülvolumenstrom	[20; 75] m ³ ·h ⁻¹ & [75; 480] m ³ ·h ⁻¹	< ±1,1 m ³ ·h ⁻¹ (< ±5,5 %v.W.) & < ±6,3 m ³ ·h ⁻¹ (< ±2,3 %v.W.)
Temperaturverhältnis*	[0; 80] %v.ΔT (Spülfaktor 1,5)	< ±3 %

- Wärmewiderstand nach DIN EN 13141-8 ✓
- Kammerleckage vernachlässigbar oder korrigierbar ✓
- Reproduktion von ErP-Produktdatenblatt-Werten innerhalb der Unsicherheit ✓

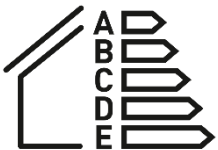


Zusammenfassung

- Die Regulierung von Wohnungslüftungen konzentriert sich auf die Energieeffizienz.
- Dezentrale Lüftungsgeräte erreichen einen zunehmend großen Marktanteil.



- Durch ihren einfachen Aufbau sind Pendellüfter gerade für die Sanierung sehr flexibel und kostengünstig einsetzbar. Herausforderungen in Bezug auf Druckunterschiede bleiben jedoch bestehen.
- Feldversuche zeigen, dass Pendellüftersysteme* nicht immer Mischlüftungsverhältnisse einstellen, diese können auch zu Kurzschlussströmungen führen.



- Bei der Bewertung der Energieeffizienz von Pendellüftern wird erst seit kurzem (DIN EN 13141-8 Entwurf:2021-02) auf deren Besonderheiten eingegangen. Das Fraunhofer ISE kann Energieeffizienzmessungen nach DIBt-Vorgaben durchführen.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen
Bundestages.
FKZ.: 03ET1540B

Projekt:



HEAVEN – Viessmann

Vorgesetzte & Mitarbeiter:

Dr. Constanze Bongs

Dr. Thibault Pflug
Arnulf Dinkel

Gebäudesystemtechnik

Wohnungs- und Bürolüftung

Sven Auerswald

www.ise.fraunhofer.de

Sven.Auerswald@ise.fraunhofer.de

40 JAHRE
FRAUNHOFER ISE
#CreatingTheEnergyFuture