

# Aerosol- und Tracergas- Messungen zur Bestimmung der Lüftungswirksamkeit und des Infektionsrisikos in komplexen Innenräumen

29. WaBoLu-Innenraumtage

**Technik & Architektur**

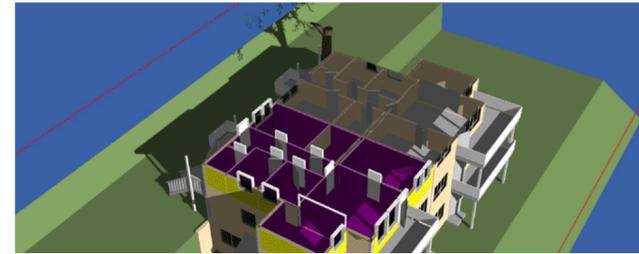
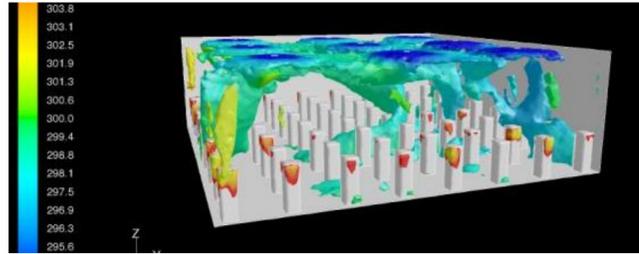
7. Juni 2022



# Übersicht

- Hochschule Luzern, wer sind wir?
- Motivation, Hintergrund
- Methode Spurengasmessungen
- Methode Partikelmessung
- Methode Szenarienbeurteilung
- Anwendungsbeispiel Konzertsaal
- Fazit und Ausblick

# Tätigkeitsfeld der Hochschule Luzern im Bereich Gebäudetechnik



# Motivation, Hintergründe

Ansteckungen von respiratorischen Erkrankungen (darunter auch Covid19) erfolgen primär über Aerosole in Innenräume (Nah- und Fernfeld).

Wie kann ein komplexer Raum in Pandemie-Situation möglichst sicher betrieben werden?

Welches sind sinnvolle organisatorische und bauliche Anpassungen (kurzfristig) für einen sichereren Betrieb (Fokus: Lüftungsstrategie)?

Bei experimentellen Simulationen von Aerosolübertragungen in realen Räumen stellt sich die Frage nach dem „richtigen“ Aerosol (Aufgabe im Raum, Messbarkeit, ...)

Spurengasmessungen ist eine etabliert Methode. Für die Beurteilung des Übertragungsrisikos liefert sie allerdings eher konservative Resultate (keine Haftung an Oberflächen, keine Verdunstung, keine Abscheidung an Filtern, ...).

Liefern künstlich erzeugte Nebel (z.B: Theaternebel) bessere Schätzungen?

# Anwendungen von Spurengasmessungen an der Hochschule Luzern

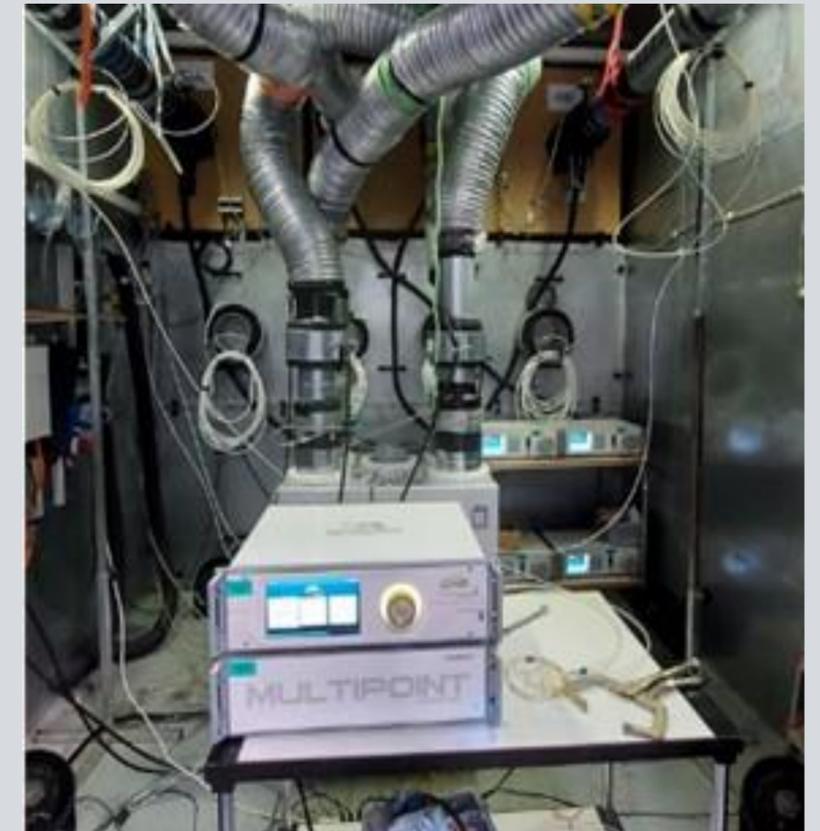
Abluftübertragung in Wärmerückgewinnern (EATR)



Luftströme und Leckagen in Strassentunnels



Interne Leckagen von Wohnungslüftungsgeräten



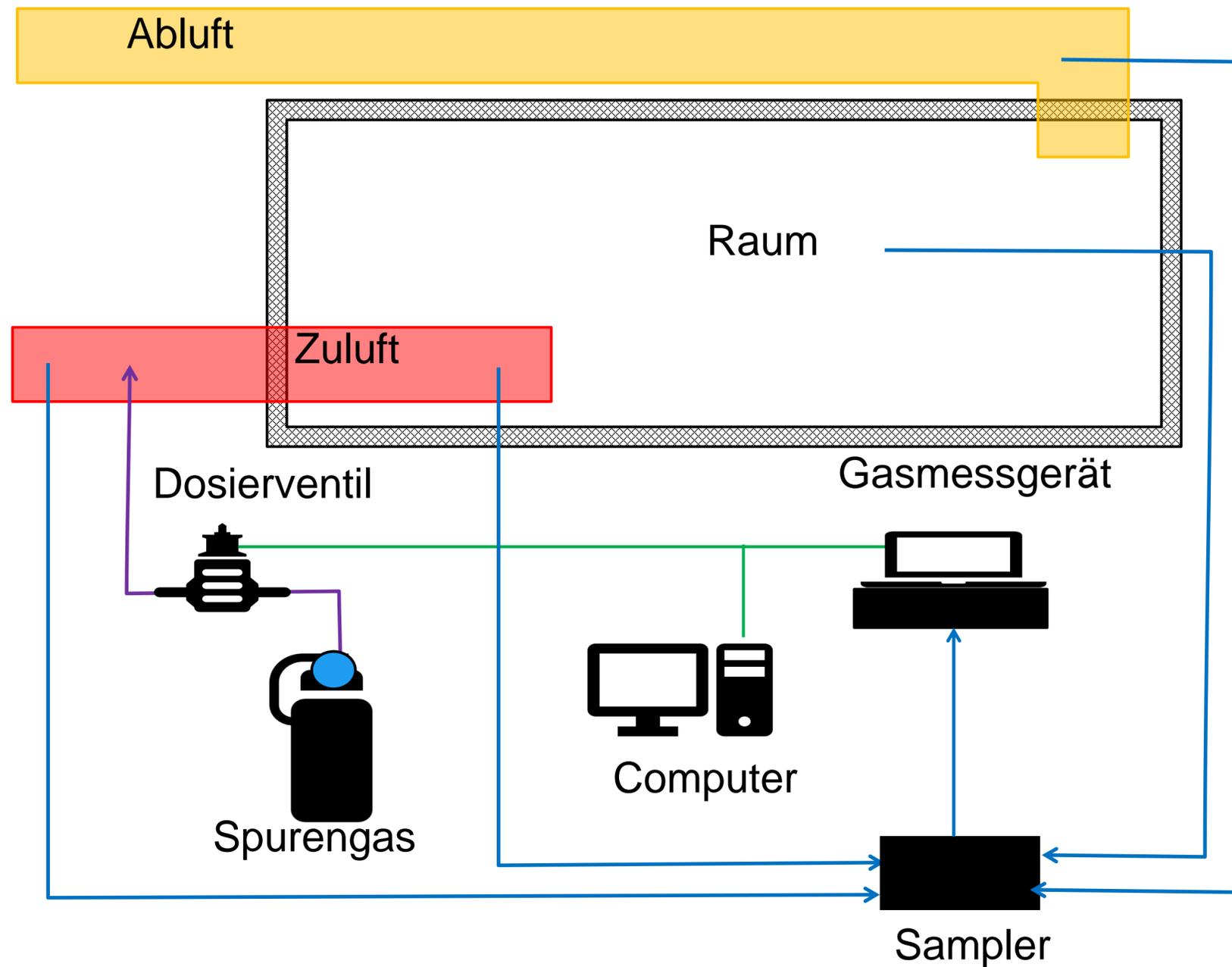
Beurteilung von Raumlufströmungen ....

# Vergleich von Aerosol- und Spurengas-Messungen

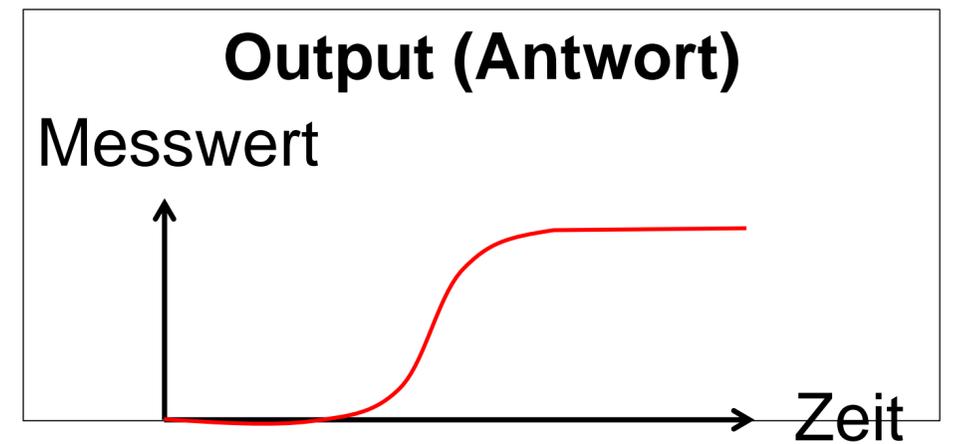
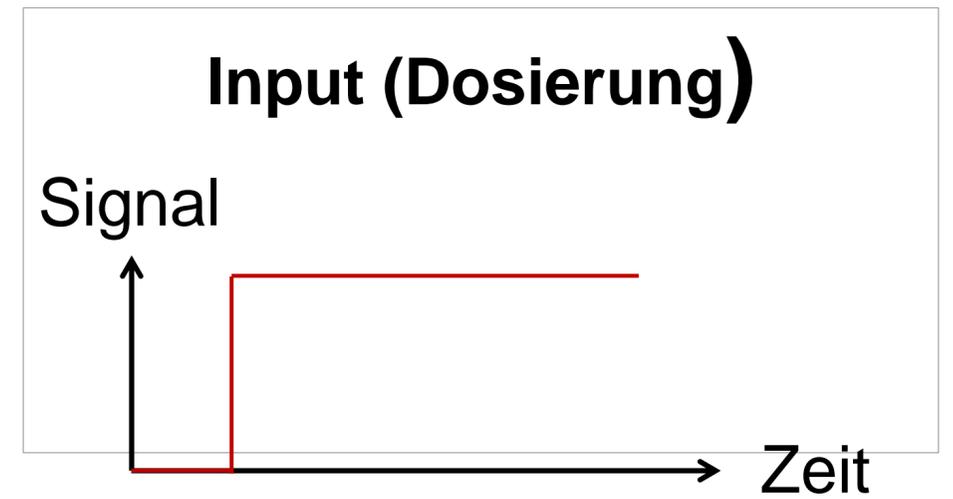
Vergleich	Aerosole (Theaternebel)	Spurengas
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schnell, rel. kostengünstig</li> <li>• Rel. viele Messstellen</li> <li>• Gute qualitative Aussagen</li> <li>• Unproblematischer und realitätsnaher Tracer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gute quantitative Aussagen</li> <li>• Einsatz in real belegten Räumen möglich</li> <li>• Normierte Verfahren</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beschränkte quantitative Aussagen zur Lüftungswirksamkeit</li> <li>• Genaues Verhalten der Aerosole?</li> <li>• Abhängigkeit von bestimmten Partikelsensoren</li> <li>• Kein Einsatz in real genutzten Räumen</li> <li>• Kein normiertes Verfahren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gase (Sicherheit, Treibhausgaspotential, Kosten)</li> <li>• Kosten der Messmittel, resp. Beschränkte Anzahl Messstellen</li> <li>• Beschränkte Vergleichbarkeit mit Aerosolen (spez. im Nahbereich)</li> </ul>

H. Huber: Spurengasmessungen in großen Räumen; AK Klimatechnik, Lingen, 22.10.2021

# Methoden von Dosierung und Messung

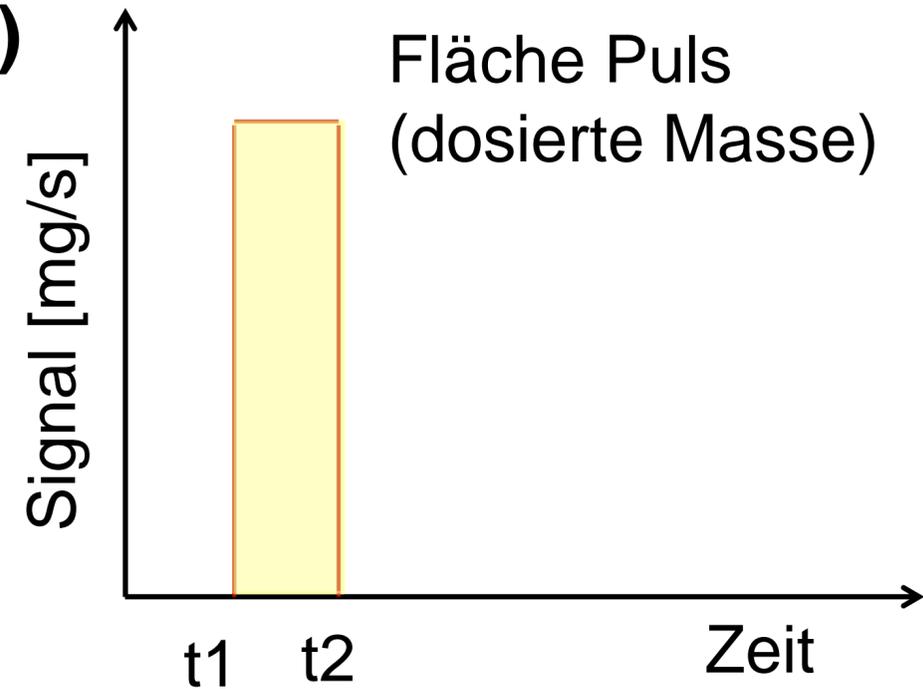


## Beispiel Set-Up und Konstantdosierung

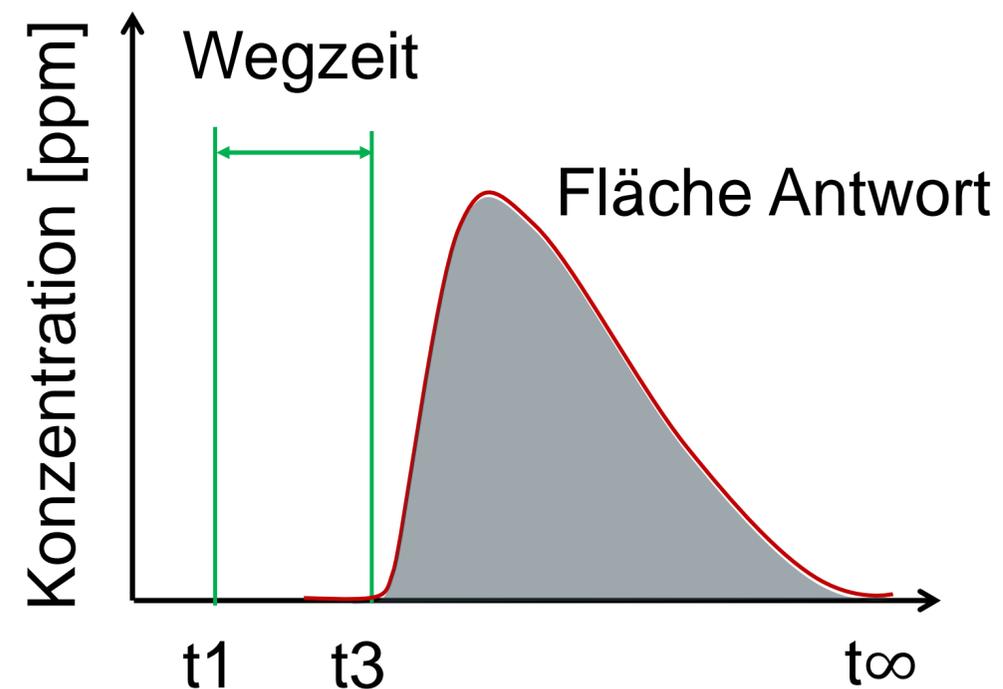


# Pulsdosierung

## Input (Dosierung)



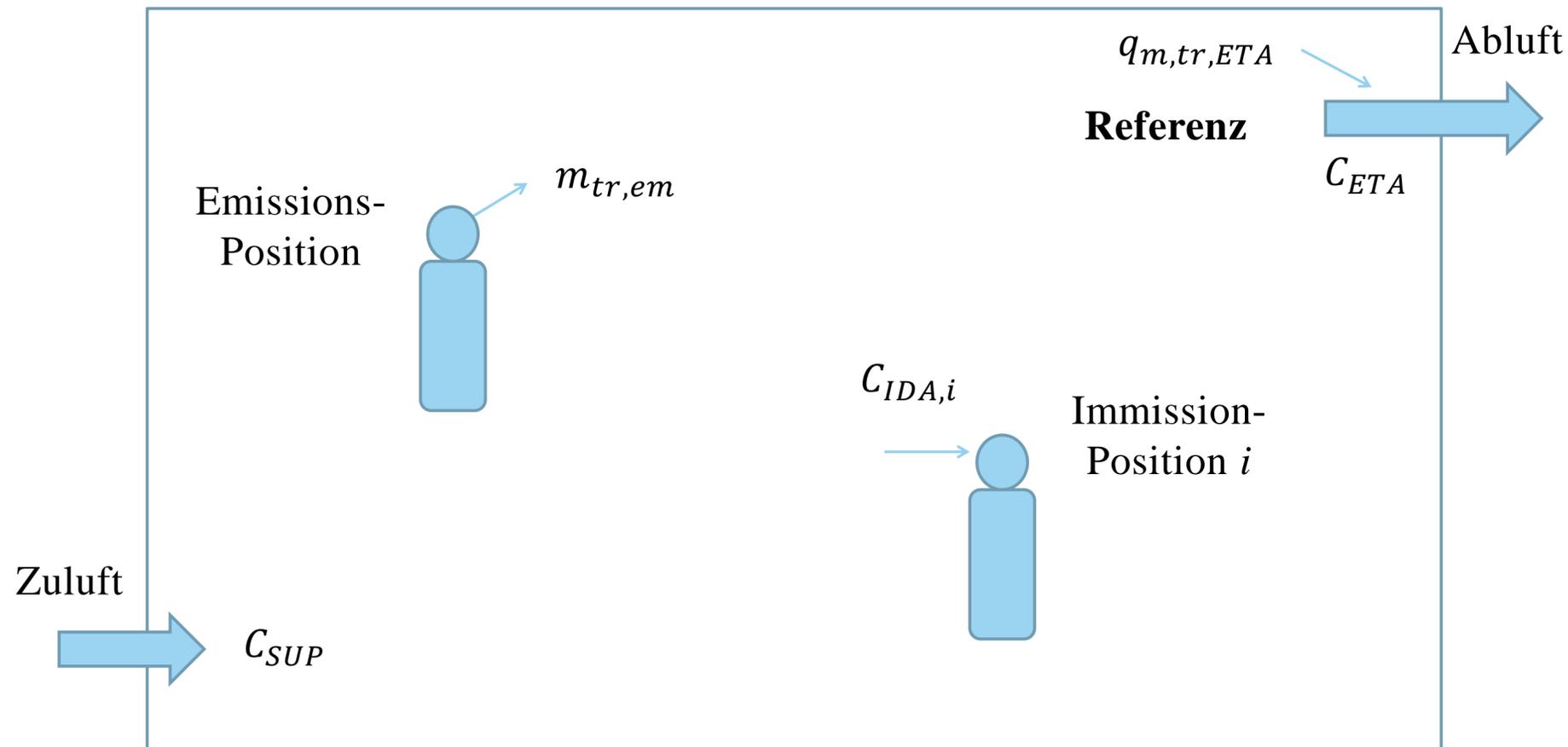
## Output (Antwort)



## Die Pulsdosierung

- ermöglicht einen sparsamen Einsatz von Spurengas,
- liefert zusätzliche Informationen (Wegzeit, Profil der Antwort),
- erfordert schnelle Messgeräte.

# Übertragung von Partikeln von einer Quelle zu einem Immissionspunkt



„Lokale Lüftungswirksamkeit“

$$\varepsilon_{C,i} = \frac{\text{Konzentration in der Abluft im Gleichgewichtszustand (Referenz)}}{\text{Konzentration an der Position } i}$$

Im Gleichgewichtszustand:

$$\varepsilon_{C,i} = \frac{C_{ETA} - C_{SUP}}{C_{IDA,i} - C_{SUP}}$$

Bei Pulsdosierung:

$$\varepsilon_{C,i} = \frac{m_{tr,em}}{q_{m,tr,ETA}} \cdot \frac{C_{ETA} - C_{SUP}}{\sum [(\Delta C_{IDA,i}(t) - C_{SUP}) \cdot \Delta t]}$$

$C_{ETA}$  Spurengaskonzentration der Abluft im Gleichgewichtszustand (bei  $q_{m,tr,ETA}$ ) in ppm

$C_{IDA,i}$  Spurengaskonzentration an der Position  $i$

$C_{SUP}$  Spurengaskonzentration der Zuluft

$m_{tr,em}$  an der Emissionsposition abgegebene Spurengasmasse

$q_{m,tr,ETA}$  Spurengasmassenstrom zur Erreichung von  $C_{ETA}$  in g/s

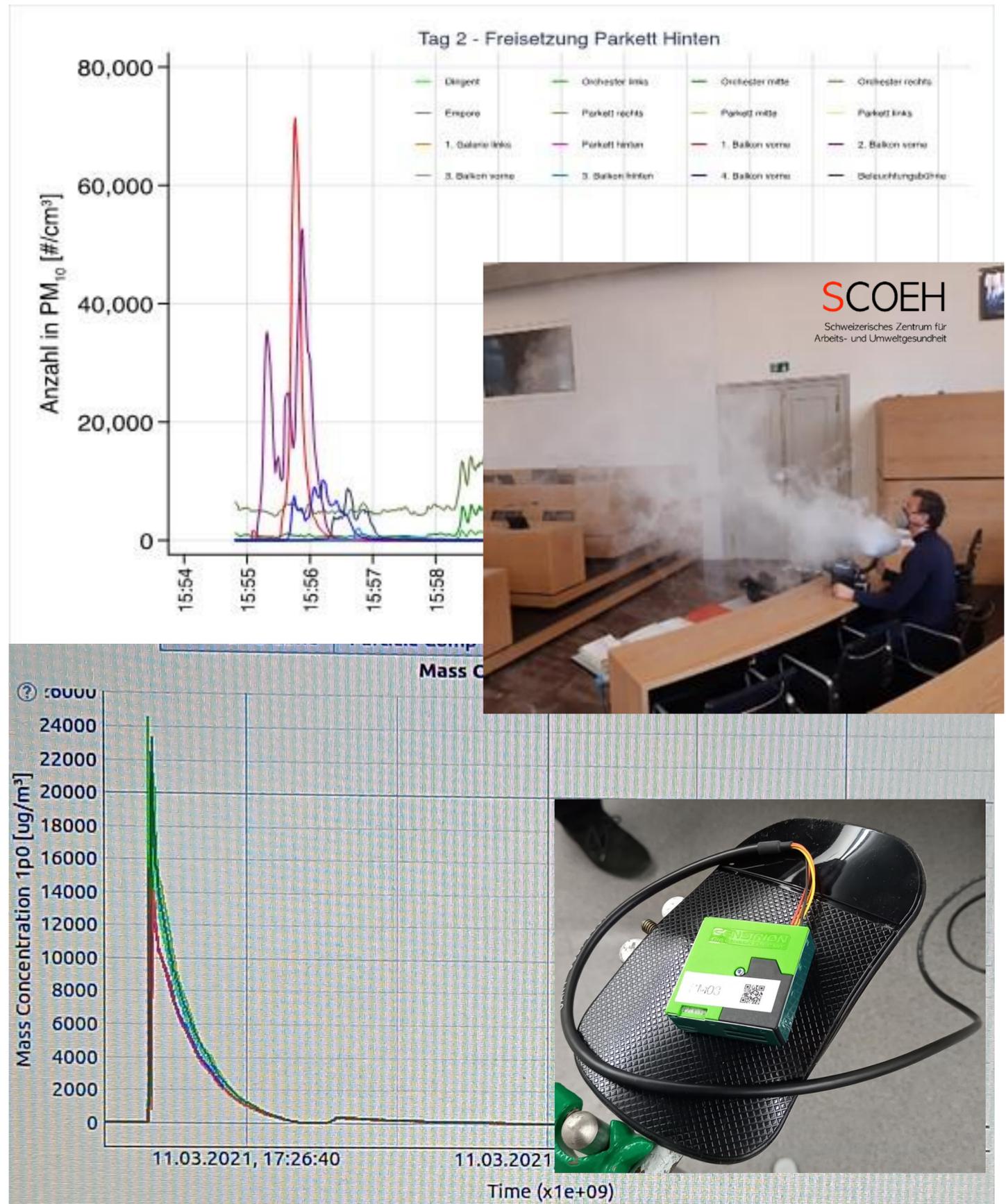
# Aerosolmessungen

Versprühen eines Nebels aus Triethylen Glykol, Monopropylen Glykol, Dipropylen Glykol und Wasser (Theaternebel, vergleichbare Eigenschaften wie Lungenaerosole)

Messung der Partikelanzahl-Konzentration **kleiner als 10 µm (PM10)** mit 12 - 16 Mini-Sensoren, Messbereich **0,3 bis 10 µm**, bis 100'000 Partikel/cm<sup>3</sup>

Vergleich der Peakhöhen, Wegzeiten und teilweise Abklingkurven

Methode: SCOEH (Dr. Michael Riediker)



# Anwendungsbeispiele

Schulzimmer

Vorlesungssaal

Hörsaal

Konzertsaal



Nennbelegung  
20 Personen

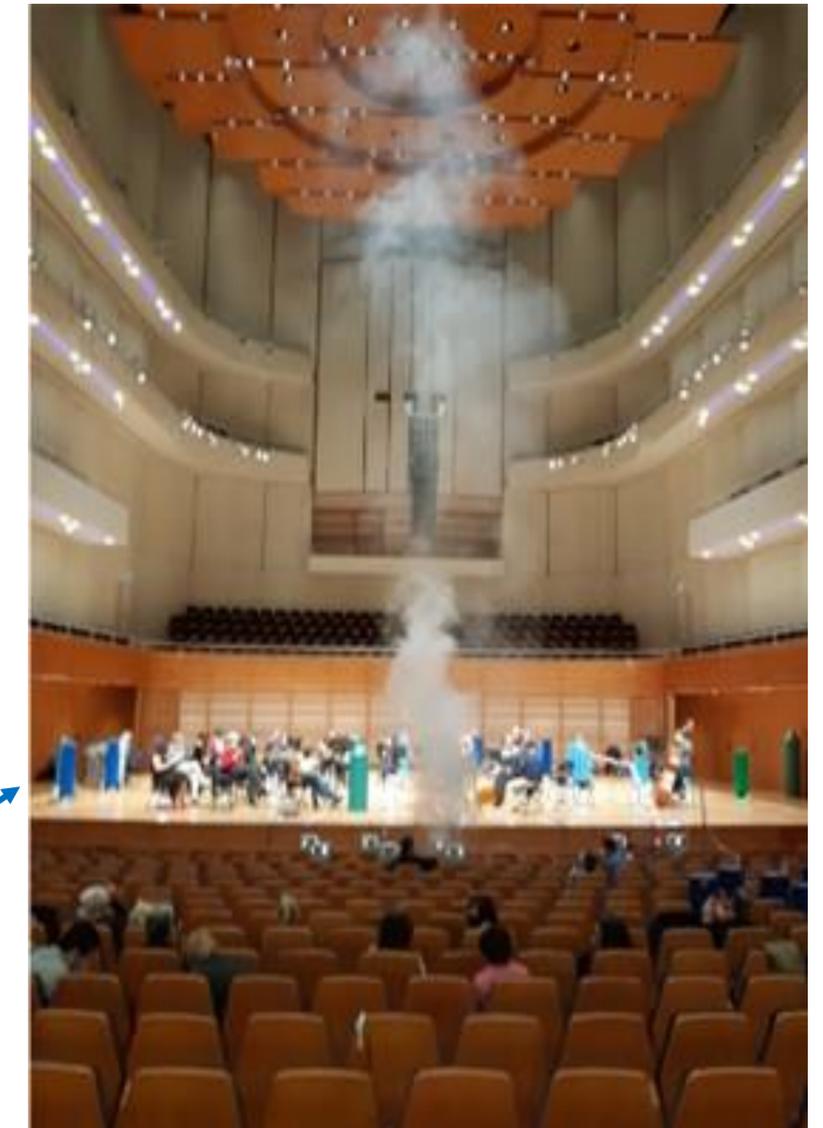


60 Personen



ca. 200 Personen

ca. 1'960 Personen



# Konzertsaal Kongress und Kulturzentrum Luzern



Nennbelegung ca. 1'960 Pers.

- Parkett 725
  - 1. Balkon 228\*
  - 2. Balkon 214\*
  - 3. Balkon 234\*
  - 4. Balkon 314\*
  - Orgelempore (Chor) 124
  - Bühne 120 (Orchester, Chor)
- \* inkl. Galerie

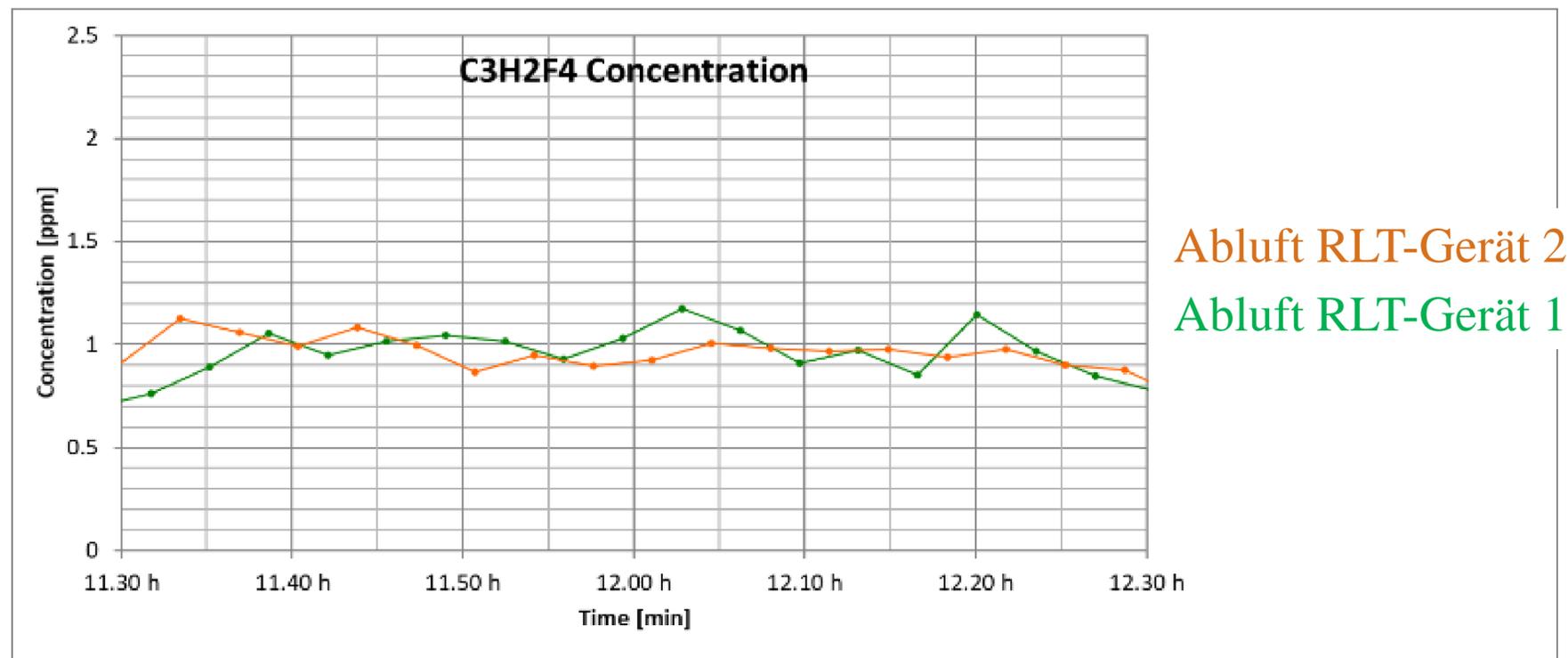
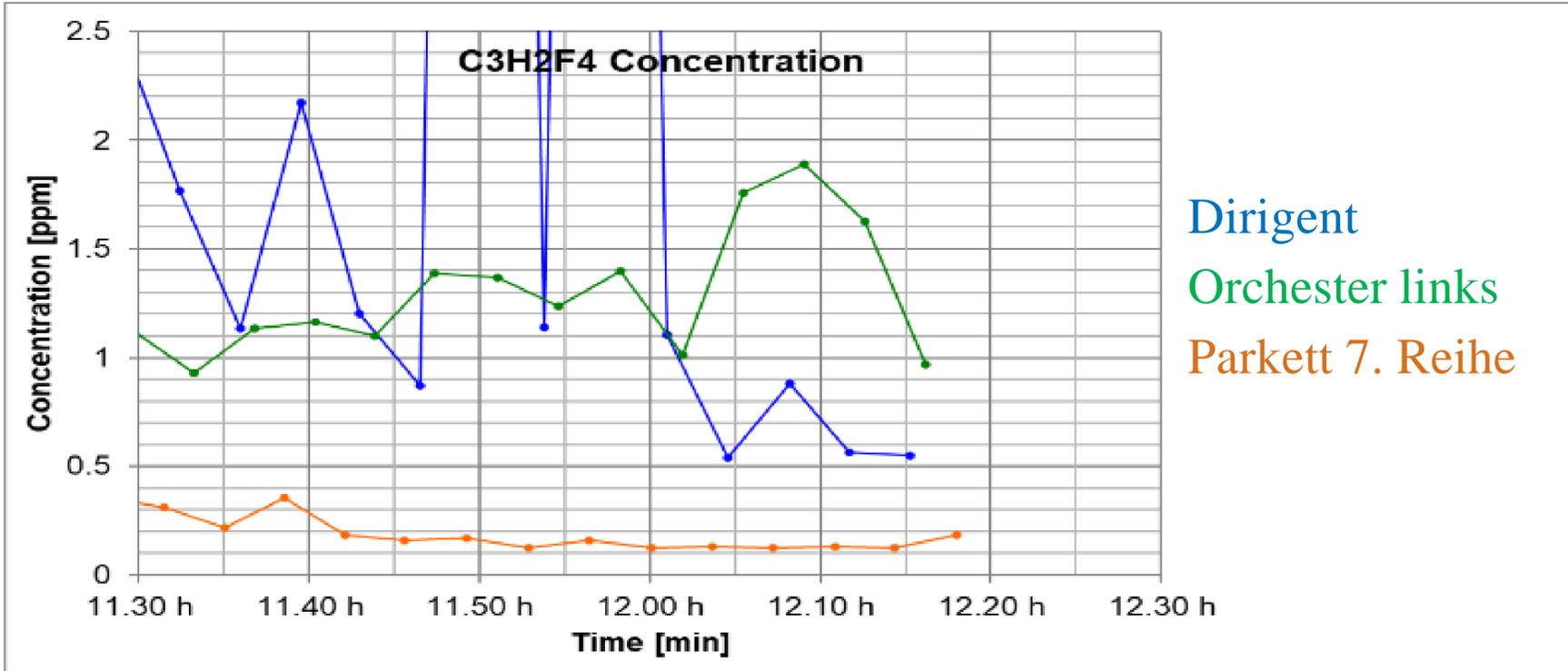
Raumvolumen ohne Echokammer: 19'000 m<sup>3</sup>

Keine Aussenflächen

Klimaanlage im Konzertbetrieb mit 2 x 29'000 m<sup>3</sup>/h,

Zuluft unter den Sitzen: pro Sitz ca. 35 m<sup>3</sup>/h

# Beispiel Bühne: Konstante Dosierung



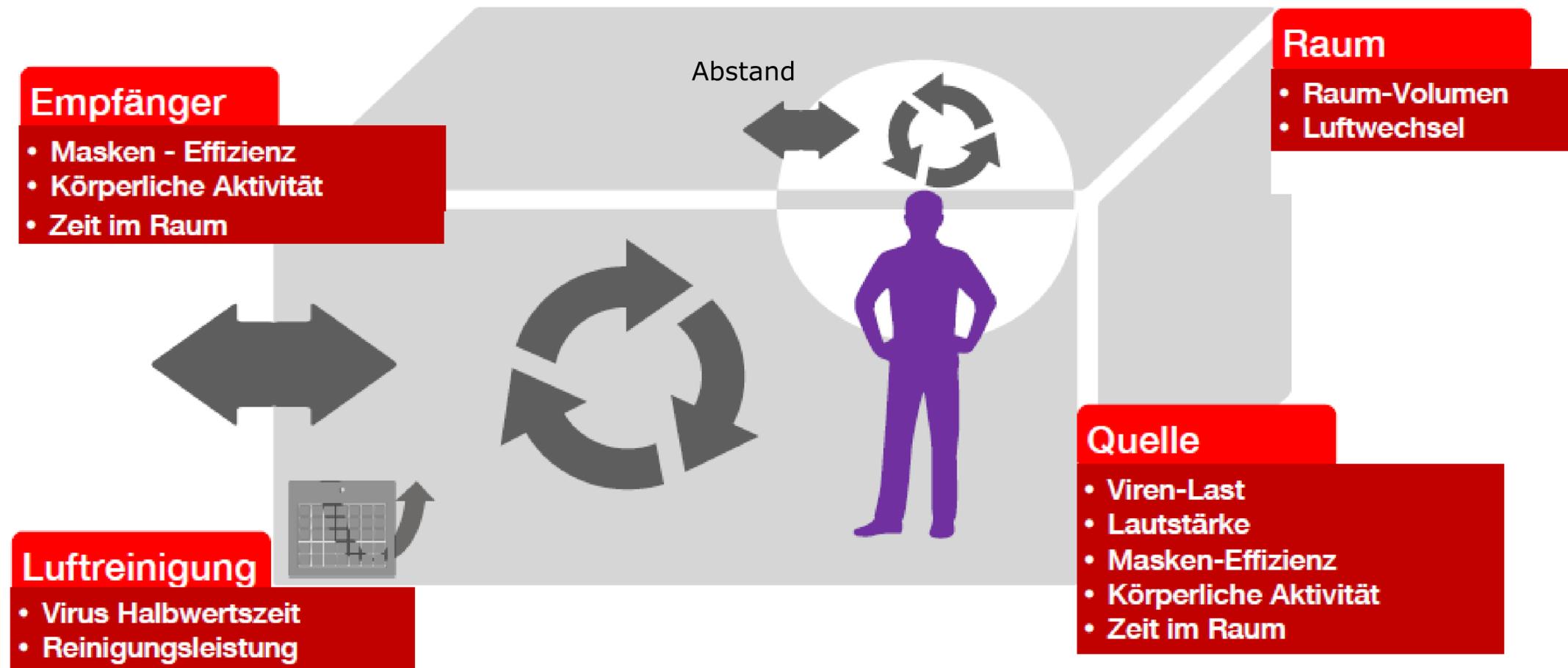
## Mit Personen und Wärmelasten



# Szenarienbeurteilung (Raumsimulation)

Ausschlaggebend: eingeatmete Virendosis

Wesentliche Parameter:



# Fazit der Messungen im Konzertsaal im KKL und Szenarienbeurteilung

Luftbelastungen im Publikumsbereich (Parkett) können nachweislich wirksam abgeführt werden (um Faktoren besser als bei einer Mischlüftung).

Auf der Bühne und den Balkonen ist die lokale Lüftungswirksamkeit teilweise vergleichbar mit Mischlüftung oder gar tiefer.

Die Berechnungen zeigen, dass dank dem grossen Raumvolumen und dem grossen Luftvolumenstrom das Ansteckungsrisiko mit konsequenten Schutzmassnahmen (Masken, Aufführungsdauer: 90 Minuten ohne Pause etc.) erheblich minimiert.

Auch Musizierende mit Maske stellen sowohl für das Publikum als auch für andere Musizierende (mit oder ohne Maske) nur ein sehr kleines Risiko dar.

Musizierende ohne Maske (Gesang, Blasinstrumente) können für Risikopersonen (mit Maske) kritisch sein. Daher sollen sich diese Personen konsequent testen lassen.

## Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

- Bei der Beseitigung von Luftschadstoffen kann die Lüftungstechnik mehr als nur Verdünnen.
- Für die Beurteilung des Infektionsrisikos durch Aerosolübertragung in komplexen Räumen genügt ein Kennwert für den ganzen Raum nicht.
- Bei den untersuchten Sälen haben die Spurengas-Messungen zu den gleichen Aussagen bzgl. Infektionsrisiko geführt wie die Aerosolmessungen.
- Auch hinsichtlich Infektionsschutz (luftübertragene Krankheiten) hat die Lüftungsbranche eine grosse Chance, sich für die Raumluftqualität als Ganzes verantwortlich und kompetent zu zeigen.
- Es ist davon auszugehen, dass «gute» Raumluftqualität zunehmend umfassender definiert und mehr eingefordert wird.
- Das Interesse für die Zertifizierung der Raumluftqualität sollte zunehmen.

**Hochschule Luzern**  
**Technik & Architektur**  
Institut für Gebäudetechnik und Energie IGE  
**Dr. Benoit Sicre** und **Prof. Heinrich Huber**

T direkt +41 41 349 33 97  
benoit.sicre@hslu.ch

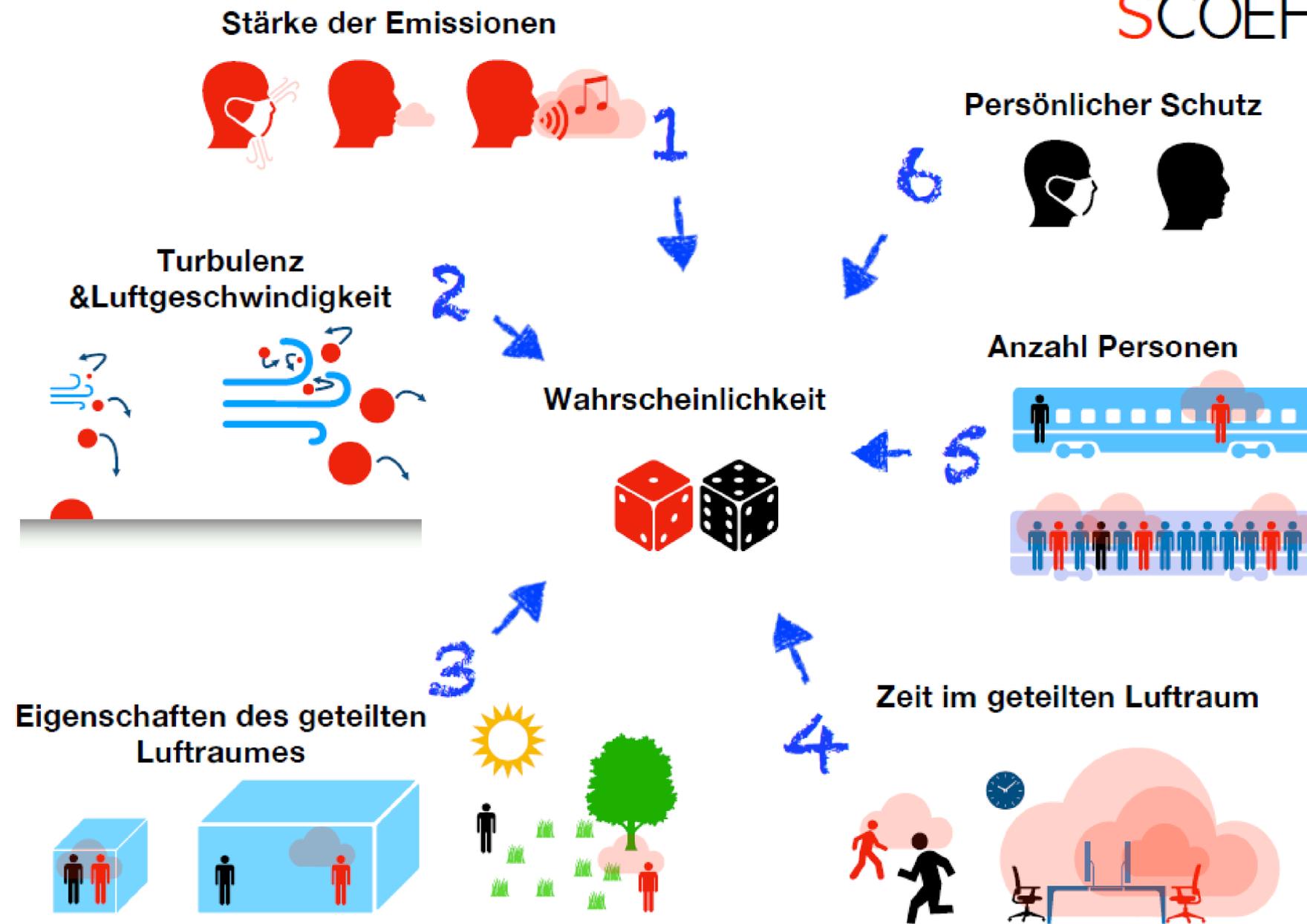


# Reservefolien

**Hochschule Luzern**  
**Technik & Architektur**  
Institut für Gebäudetechnik und Energie IGE  
**Dr. Benoit Sicre** und **Prof. Heinrich Huber**

T direkt +41 41 349 33 97  
benoit.sicre@hslu.ch

# SCOEH



# Formeln für Raumsimulation

SCOEH

## Room

- Room Volume  $V_R$
- Air Exchange Rate AER
- Windspeed  $v_w$

$$k_{tot} = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} + AER \quad F_{IZ} = 2 * \pi * r_{NF}^2 * v_w$$

$$S_{tot} = \sum[(1 - ME_i) \sum(\%RV_{ai} * RV_{ai}) * \sum(ES_{ji} * \%ES_{ji})]$$

## Emitters

- Emitters 1..i
- Voice-E-Strength, % ES 1..j
- Mask Efficiency Exhaled ME
- Activity Volume, % RV 1..a
- Time in room  $t_R$

$$c_{FF}(t) = \begin{cases} \frac{S_{tot}}{V_R * k_{tot}} * (1 - e^{-k_{tot}t}) & , \quad t \leq t_R \\ \frac{S_{tot}}{V_R * k_{tot}} * (1 - e^{-k_{tot}t_R}) * e^{-k_{tot}(t-t_R)} & , \quad t > t_R \end{cases}$$

$$dose_{FF_i} = MI_i * \sum(\%RV_{ai} * RV_{ai}) \int_0^{t_R} c_{FF}(t)$$

## Receivers

- Mask Efficiency Inhaled MI
- Activity Volumes as above

$$c_{NF}(t) = \begin{cases} c_{FF}(t) + \frac{S_i}{F_{IZ}} * (1 - e^{-\frac{F_{IZ} * t}{V_{NF}}}), & t \leq t_R \\ c_{FF}(t) & , \quad t > t_R \end{cases}$$

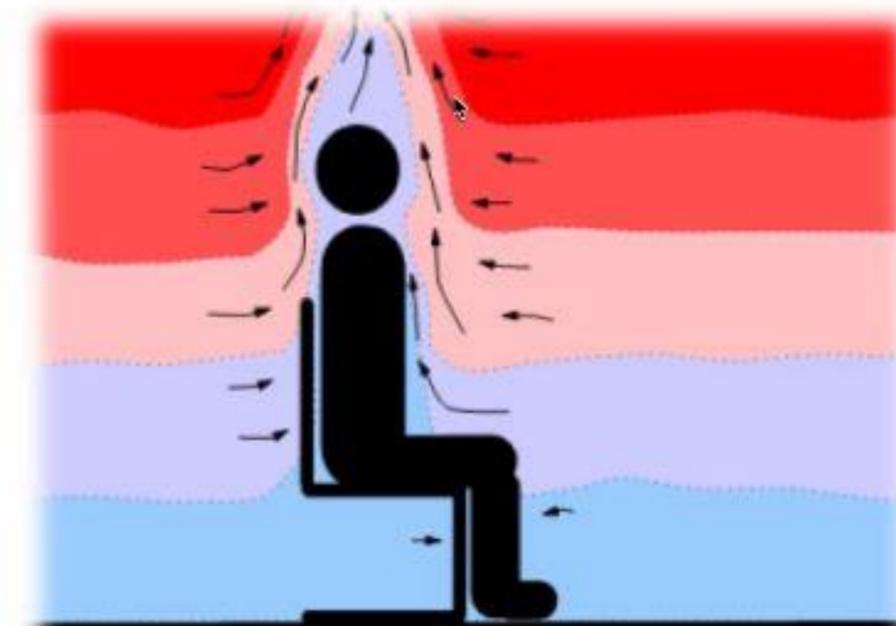
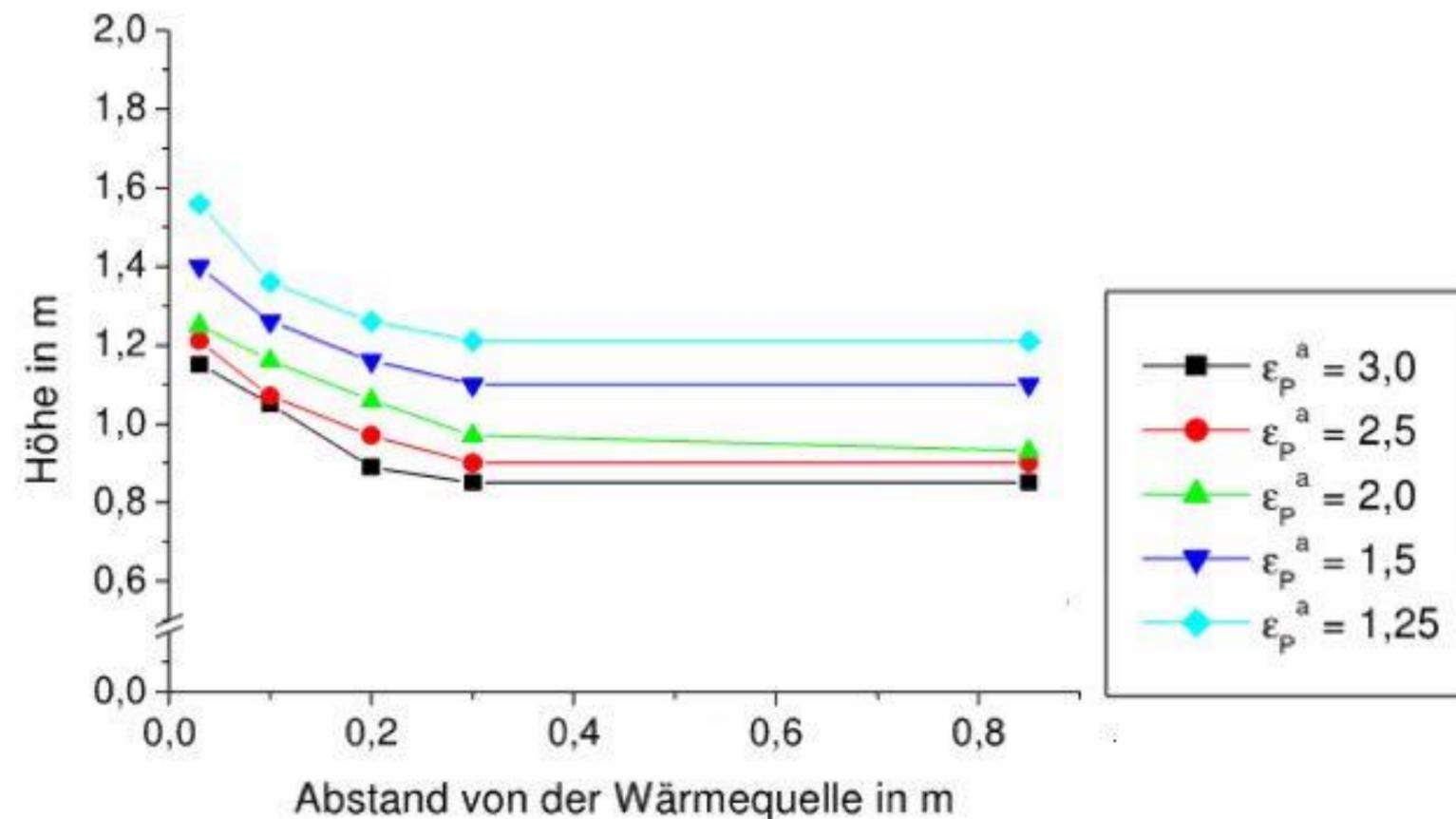
$$dose_{NF_i} = MI_i * \sum(\%RV_{ai} * RV_{ai}) \int_0^{t_R} c_{NF}(t)$$

## Constants

- Virus Half-Life  $t_{1/2}$
- Near-Field Radius, Vol  $r_{NF} V_{NF}$

# Lüftungsart: Quell- / Schichtlüftung

- Zusätzliche Verbesserung der eingeatmeten Luft durch Auftriebseffekte bei einer Quellluftströmung



Quelle: Mundt / Kriegel

Eine Größe, die diese Konzentrationsunterschiede vereinfacht beschreibt, ist die Lüftungseffektivität nach DIN EN 16798-3:2017-11. Sie kann als das Verhältnis des Konzentrationsunterschiedes zwischen Abluft ( $C_e$ ) und Zuluft ( $C_s$ ) und des Konzentrationsunterschiedes zwischen Raumluf ( $C_i$ ) und Zuluft (siehe Gleichung (2)) berechnet werden.

$$\varepsilon_v = \frac{C_e - C_s}{C_i - C_s} \quad (2)$$

In vielen Fällen sind die genauen Werte der Lüftungseffektivität nicht bekannt, aber es können Erfahrungswerte für verschiedene Luftführungssysteme genutzt werden. Typische Werte der Lüftungseffektivität nach VDI 3804: 2009-03 [7] sind:

- Mischlüftung                    1,0            (DIN EN 16798)
- Misch-Quell-Lüftung        1,2
- Quelllüftung                    2,0

Unter der Voraussetzung, dass die zugeführte Außenluft virenfrei ist, kann Gleichung (2) vereinfacht als das Verhältnis der Konzentration in der Abluft zur mittleren Konzentration im Aufenthaltsbereich des Raumes dargestellt werden. Die Konzentration im Atembereich der Personen ist daher um den Faktor der Lüftungseffektivität niedriger als die nach Gleichung (1) berechnete Konzentration. Handelt es sich bei der betrachteten Situation nicht um eine Mischlüftung, kann dies durch Verwendung von Gleichung (2) in Gleichung (1) berücksichtigt werden (siehe Gleichung (3)).

$$PAR_S = 1 - e^{-V_F \cdot \frac{C_R}{\varepsilon_v} \cdot Q_{b,in} \cdot f_M} \quad (3)$$