

Experimentelle Untersuchungen zur Luftführung in Hörsälen im Hinblick auf eine potentielle Infektionsausbreitung

Lukas Siebler M.Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter - IGTE

Dipl.-Ing. Christian Stäbler, Prüf- und Inspektionsingenieur - HLK Stuttgart GmbH

Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos, Institutsleiter - IGTE

Universität Stuttgart

Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)



**Berlin, 28./29. Januar
2021**

Hintergrund und Motivation

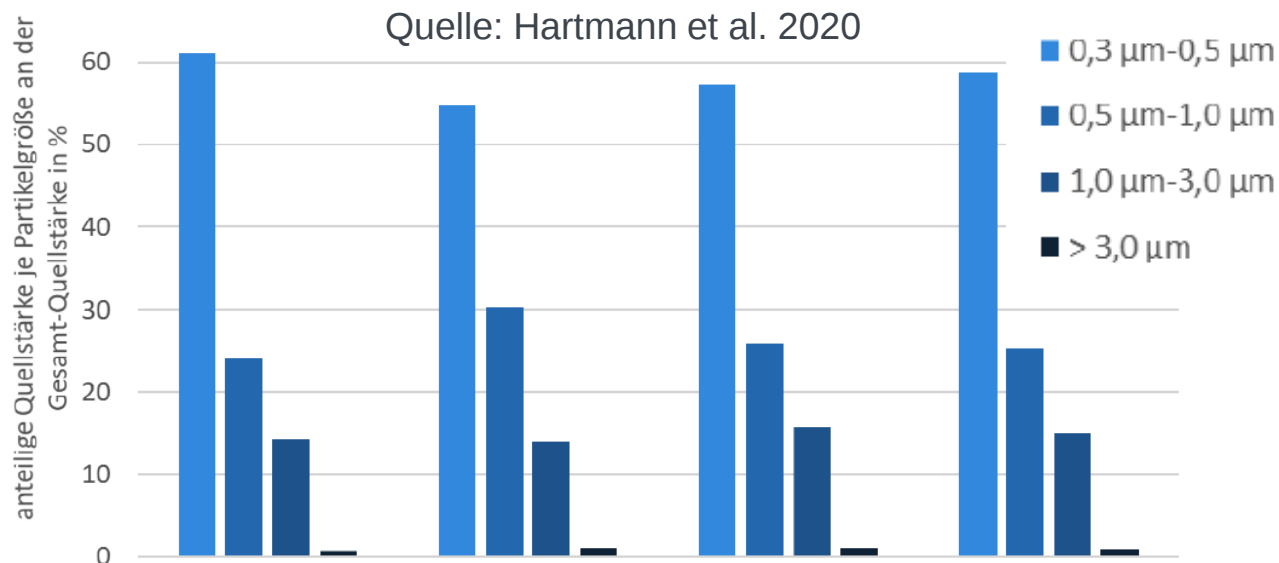
Stellen Prüfungen in Hörsälen eine Gefahr dar?

- Noch immer hohe Fallzahlen von SARS-CoV-2-Infektionen
- Wie hoch ist die Infektionsgefahr in Hörsälen?
- Wie dicht können Hörsäle bei Prüfungen belegt werden?
- Schwachstelle bisheriger Modelle: Nur allgemeine Aussagen meist für ideale Mischlüftung
- Individuelle Aussagen für konkrete Räume und Luftführungen bieten mehr Sicherheit

Das Infektionsgeschehen

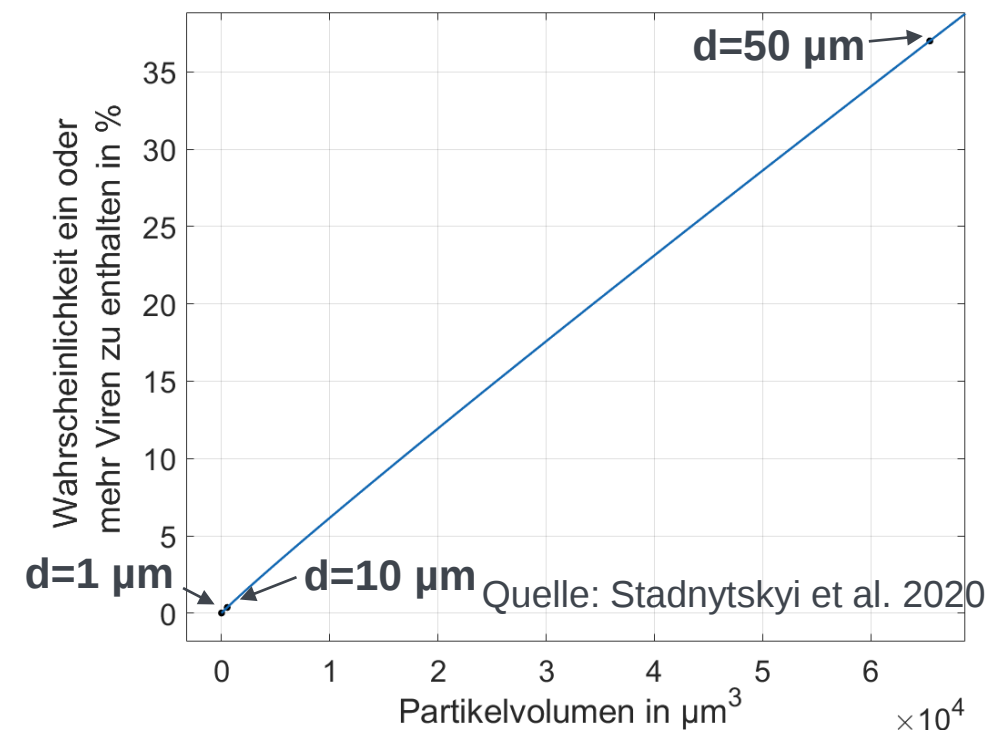
Die Theorie einer Infektion

Partikel, die pro Person und Stunde freigesetzt werden



	Atmen durch die Nase	Atmen durch den Mund	Sprechen	Husten
Mittelwert	23 P/s	134 P/s	195 P/s	13.709 P/Husten
Minimalwert	0 P/s	7 P/s	17 P/s	181 P/Husten
Maximalwert	296 P/s	1018 P/s	626 P/s	287.697 P/Husten
Probandenanzahl	10 (4 w/6 m)	18 (8 w/10 m)	17 (8 w/9 m)	8 (4 w/4 m)

Curvefit zum Anteil virusenthaltener Partikel



Durch eine kombinierte Berücksichtigung der Quellen Hartmann et al. und Stadnytskyi et al. lassen sich im **Schlechtfall (Maximalwert)** folgende virusenthaltene Partikelemissionen berechnen:

- Im Schlechtfall werden beim Atmen durch die Nase $118 \frac{1}{h}$ Partikel emittiert, welche ein Virus enthalten, beim Atmen durch den Mund $409 \frac{1}{h}$ und beim Sprechen $266 \frac{1}{h}$.
- Beim Husten liegt die Emission virusenthaltener Partikel bei $33 \frac{1}{\text{Husten}}$.
- Nach Chia et al. kann bei symptomatischen Personen die Emission ca. doppelt so hoch sein.
- Nach Prentiss et al. erfolgt eine Infektion bei **300 - 2000** eingeatmeten Viren.

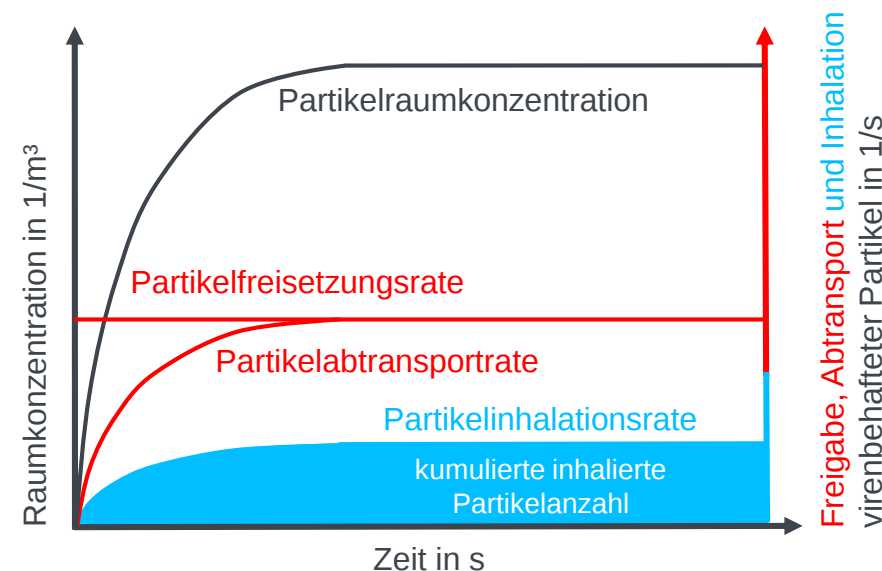
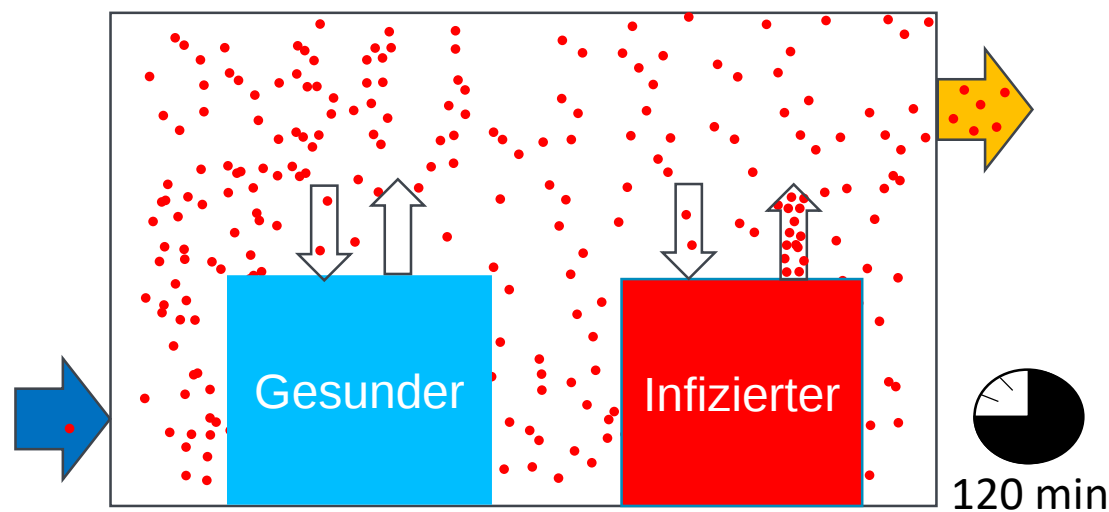
Das Infektionsgeschehen

Instationäre Betrachtung bei idealer Mischlüftung

$$\text{DGL: } \frac{dc(t)}{dt} = \frac{\dot{n}_{\text{Quelle}}}{V_R} - \frac{\dot{V}_{AB} \cdot c(t) \cdot (1 - EATR)}{V_R}$$

$$\text{Spezielle Lsg. der DGL: } c(t) = \frac{\dot{n}_{\text{Quelle}}}{\dot{V}_{AB} \cdot (1 - EATR)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\dot{V}_{LR} \cdot (1 - EATR)}{V_R} \cdot t}\right)$$

$$\text{mit } EATR = \text{Abluftübertrag; } c(\infty) = \frac{\dot{n}_{\text{Quelle}}}{\dot{V}_{AB} \cdot (1 - EATR)}$$



$$\text{Kumulierte inahierte Partikelanzahl: } n = \int_{0 \text{ min}}^{120 \text{ min}} \dot{V}_{\text{Einatmung}} \cdot c(t) dt$$

Kriterium für Infektionsschutz: $n < n_{\text{krit.}}$

Ziele der Studie

Qualitative und quantitative Ergebnisse für individuelle Räume

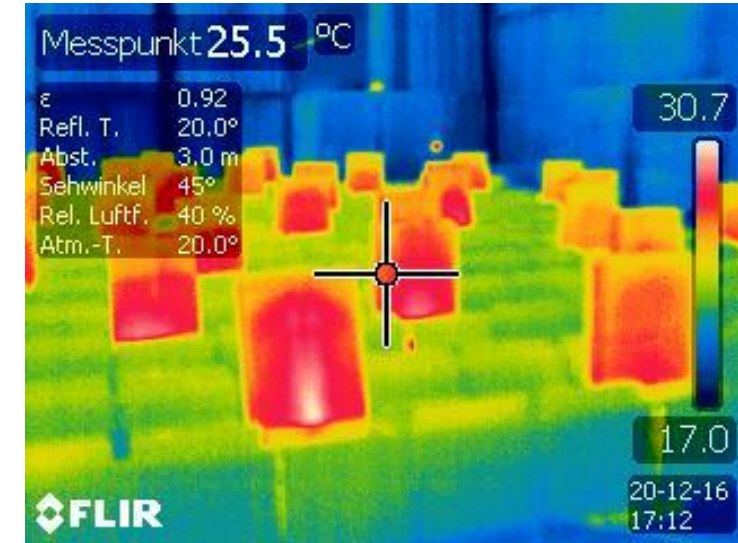
- Qualitative Erkenntnisse über die Luftführungen in vier repräsentativen Hörsälen gewinnen
- Quantitative Identifikation der Stoffausbreitung (Tracergas und Testpartikel) von verschiedenen Quellorten aus (für individuelle Räume)
- Abschätzung einer Gefährdung der Hörsaal-Nachbarn einer infizierten Person

Das Vorgehen

Emulation thermischer Lasten und Visualisierung der Luftströmung

Thermische Dummies (DIN EN 16798):

- 75 W Wärmefreisetzung (met 1,2)
- 1,8 m² Oberfläche
- Positionen gemäß 1/6 oder 1/10 Belegungsdichte (Schachbrettmuster)



Qualitative Analyse der Raumluftrömung:

- Markierung der Zuluft mit Kaltnebel
- Anemometer-Messungen

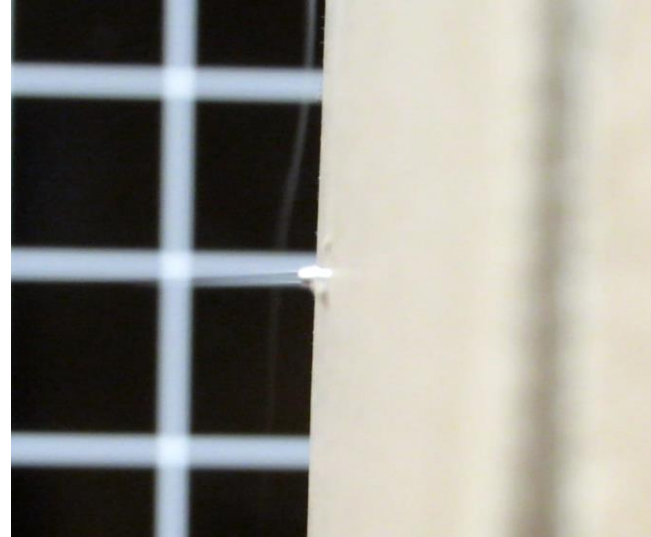


Das Vorgehen

Stofffreisetzung und Detektion

Tracergas SF₆:

- Freisetzung über Düse
- Konzentrationsmessung mit einem FTIR auf benachbarten (belegten) Sitzplätzen

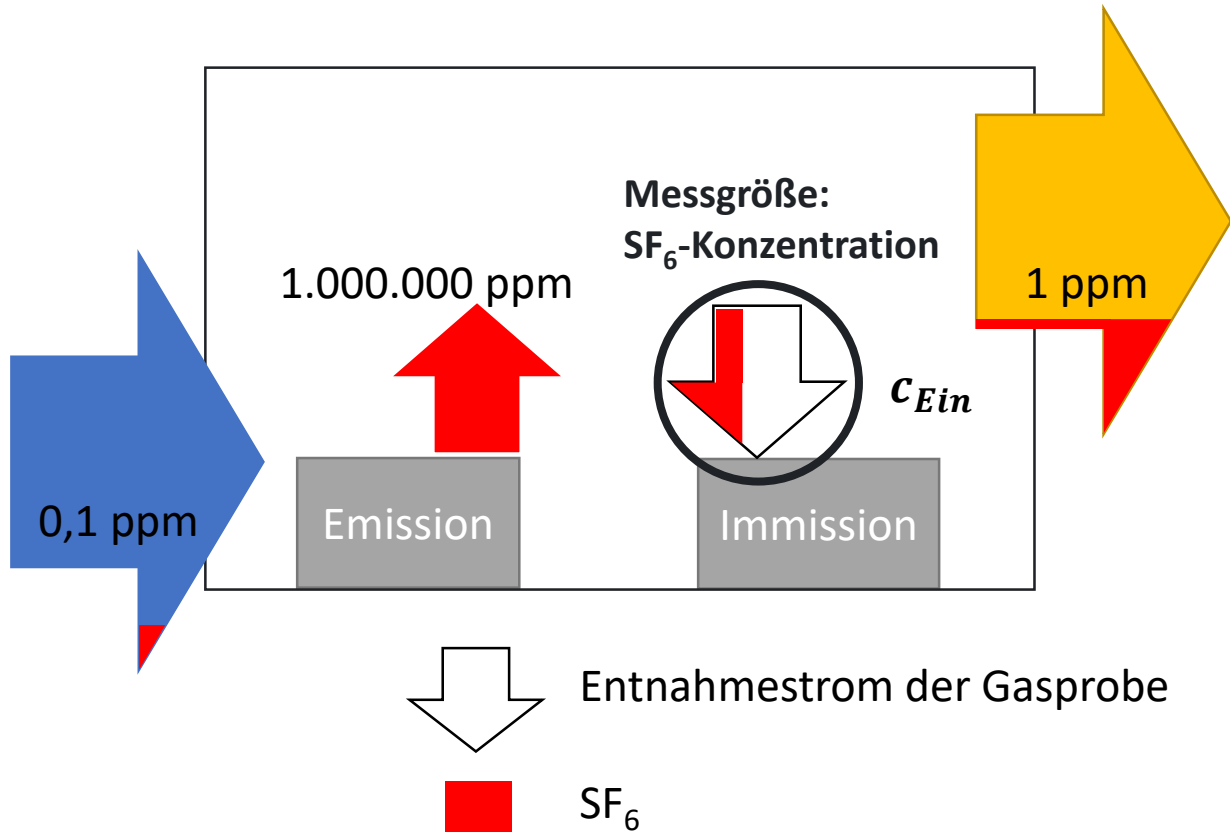


Aerosolpartikel DEHS :

- Freisetzung mit Lösungszerstäuber
- Konzentrationsmessung mit Partikelspektrometern auf benachbarten (belegten) Sitzplätzen



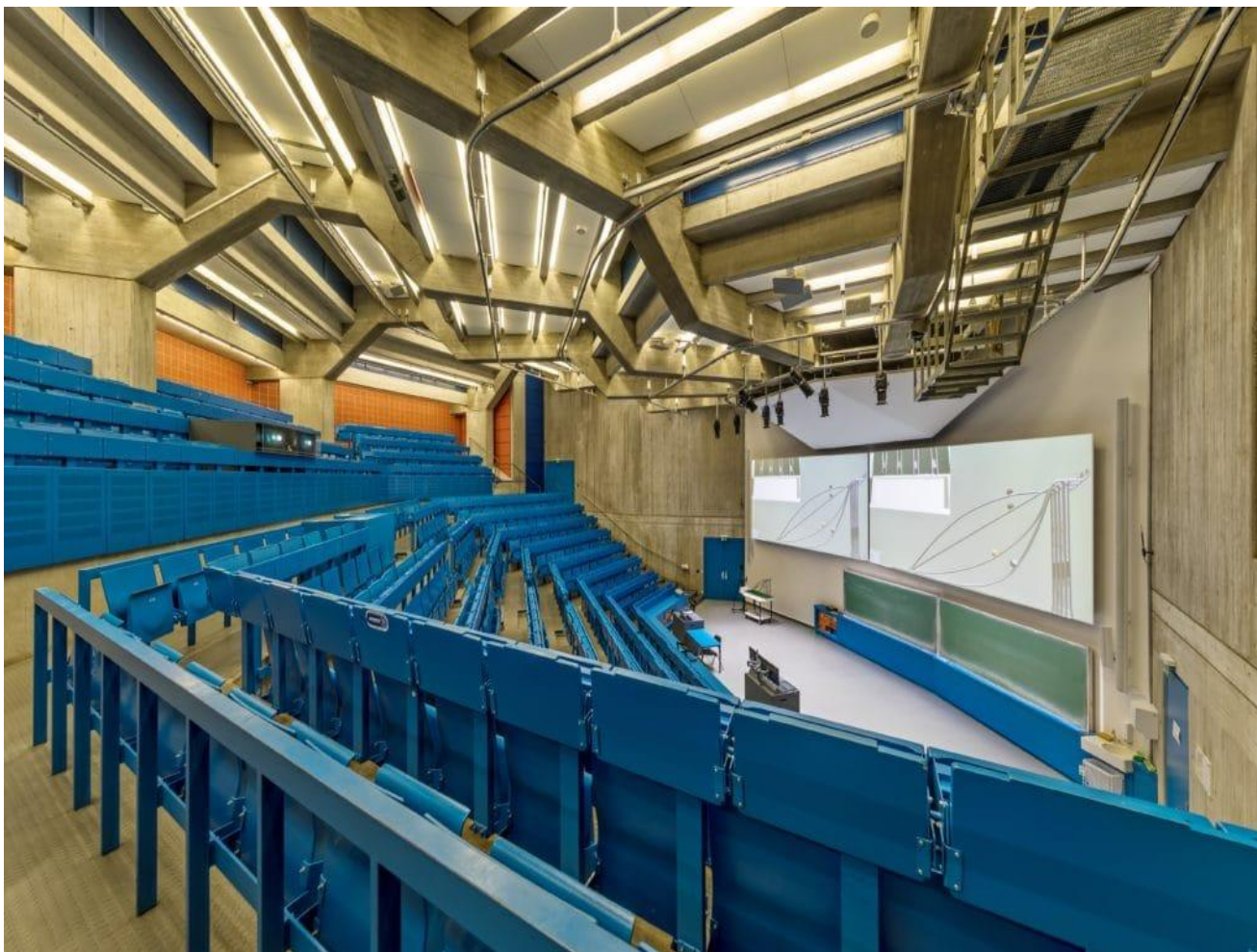
Stationäre Situation als konservative Annahme:



- Freisetzung von 5,0 l/h reinem SF₆ (daher 10⁶ ppm)
- Gedankliche Stoffverdünnung (wird nicht emuliert) mit 0,54 m³/h Atemluft für eine sitzende leichte Tätigkeit bei 1,1 met (Buonanno et al. 2020b)
- Im Ausatemstrom entspräche das einer SF₆-Konzentration von ca. $c_{Aus} = 10.100 \text{ ppm}$.
- Im Einatemstrom käme also eine um Faktor $\frac{c_{Ein}}{c_{Aus}}$ verdünnte Konzentration an.
- Das entspricht einer analog verdünnten virusenthaltenen Partikelimmission.
- Über den Expositionszeitraum: zeitlich kumulierte virusenthaltene Partikelimmission $< n_{krit}$.

Die untersuchten Objekte

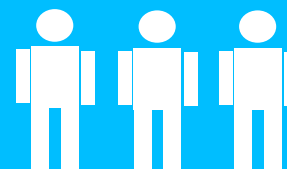
Hörsaal V57.03



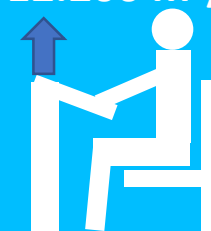
Quelle: www.professional-system.de

Raumvolumen $V = 2.110 \text{ m}^3$
Luftwechsel $\beta = 5,8$

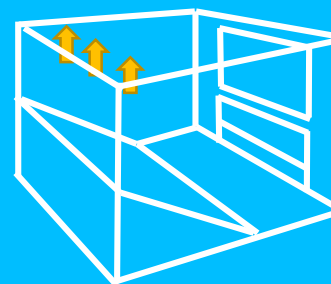
Plätze:
410



Zuluft:
 $12.200 \text{ m}^3/\text{h}$



Abluft:



WRG-System



Abluftübertrag:
 $\text{EATR} = 0,21$

Die untersuchten Objekte

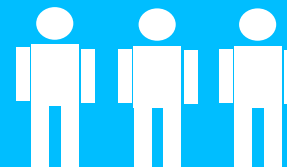
Hörsaal M2.02

1 RLT-Anlage versorgt 3 Hörsäle

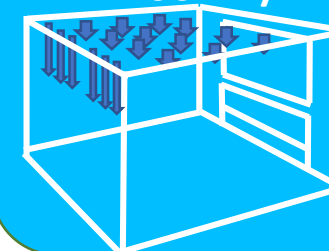


Raumvolumen $V = 2.310 \text{ m}^3$
Luftwechsel $\beta = 3,2$

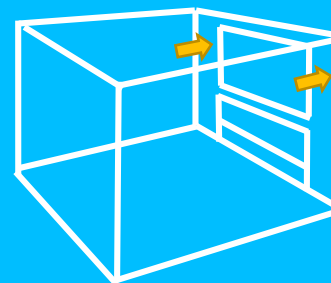
Plätze:
370



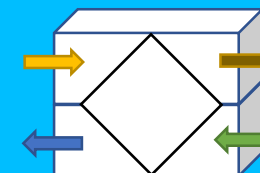
Zuluft:
 $7.400 \text{ m}^3/\text{h}$



Abluft:



WRG-System



Abluftübertrag:
 $\text{EATR} = 0,09$

Ergebnisse

Visualisierung der Luftführung durch Kaltnebel



Ergebnisse

Am Beispiel V57.03 - 1/6-Belegung

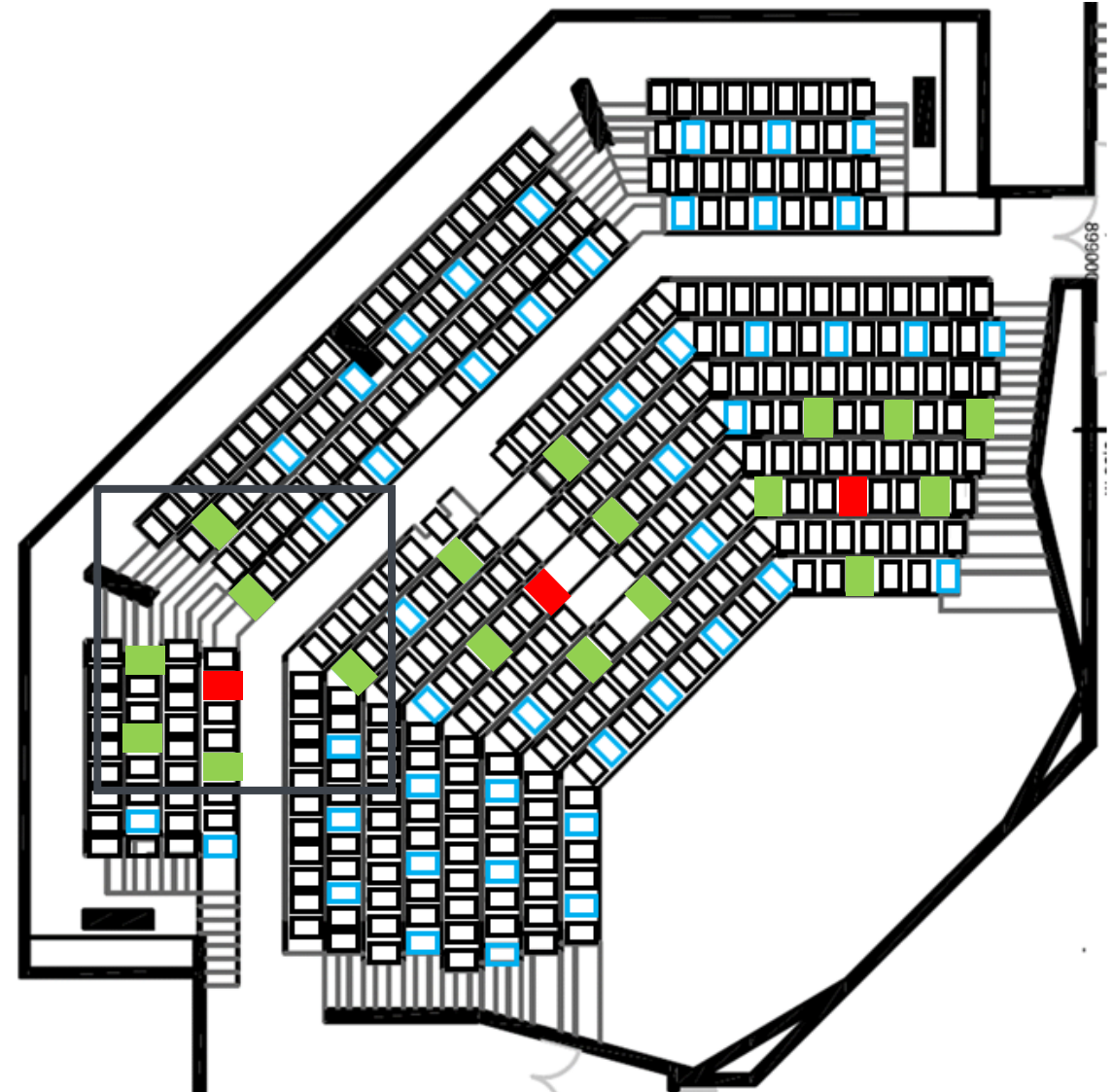
- Belegter Platz
- SF₆-Freisetzung
- Konzentrations-Messstelle

0,1

Mittlere SF₆-Konzentration in ppm und
Verhältnis zur stationären idealen
Mischlüftung (violetter Rahmen)

Theoretische SF₆-Konzentration bei idealer
Mischlüftung im stationären Zustand (V57.03):

$$c_{id,Mischlüftung,stat.}(\infty) = 0,57 \text{ ppm}$$



Ergebnisse

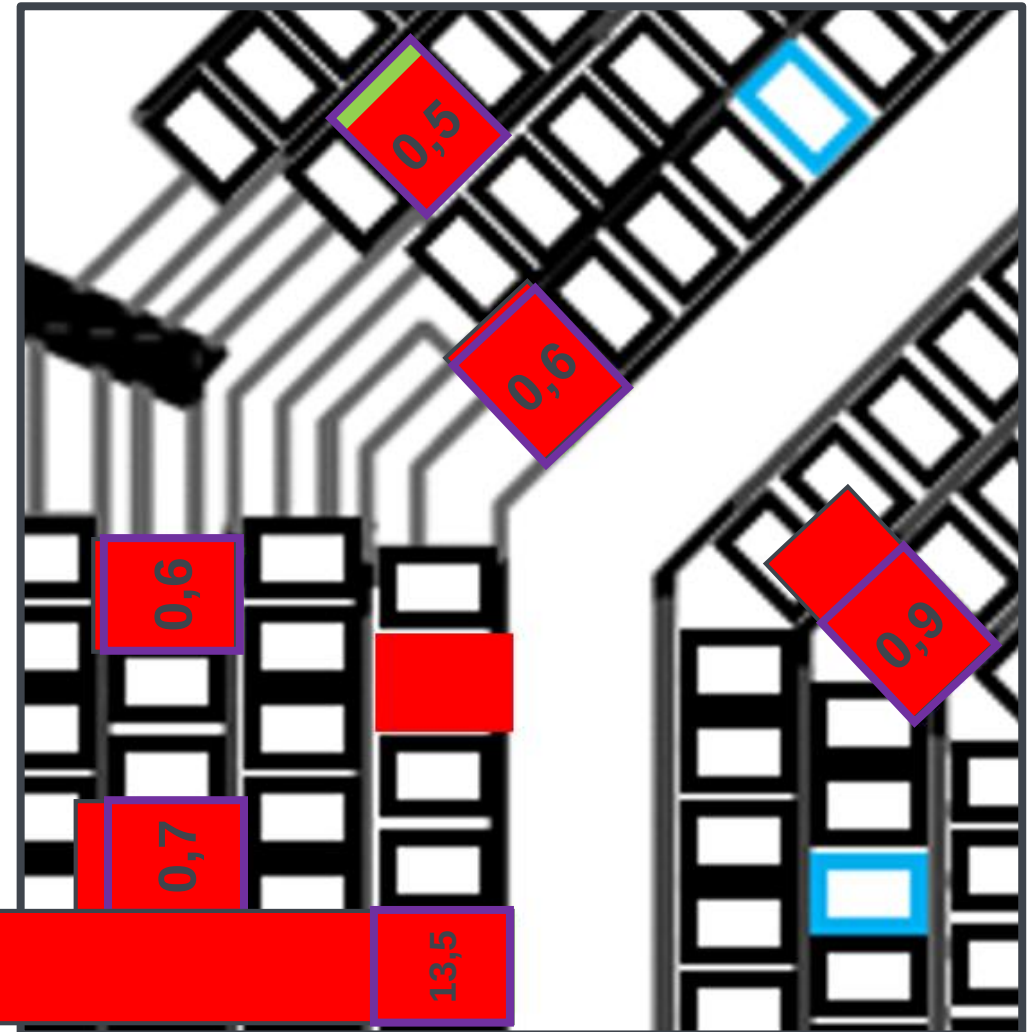
Am Beispiel V57.03 - 1/6-Belegung

- Belegter Platz
- SF₆-Freisetzung
- Konzentrations-Messstelle

0,1 Mittlere SF₆-Konzentration in ppm und Verhältnis zur stationären idealen Mischlüftung (violetter Rahmen)

Theoretische SF₆-Konzentration bei idealer Mischlüftung im stationären Zustand (V57.03):

$$C_{id,Mischlüftung,stat.}(\infty) = 0,57 \text{ ppm}$$



Ergebnisse

Am Beispiel V57.03 - 1/6-Belegung

Die auf vorangegangener Folie 14 vorgestellten Ergebnisse stellen das kritischste Szenario der gesamten Studie (4 Hörsäle) dar:

Selbst bei konservativsten Annahmen eines vermessenen potentiellen „Superspreaders“:

- Er atmet durchgehend durch den Mund
- Er hustet jede Minute 3 Mal
- Aufgrund von Symptomen emittiert er doppelt so viele Partikel je Zeiteinheit.

resultiert für eine 2h Exposition dieses Nachbarn folgende inhalierte Virenanzahl:

$$\frac{13,5}{10.100} \cdot \left(409 \frac{1}{h} + 33 \frac{1}{Husten} \cdot 180 \frac{Husten}{h} \right) \cdot 2 \cdot 2h \approx \mathbf{34 \ll n_{krit.} = 300}$$

Ergebnisse

Am Beispiel M2.02 - 1/6-Belegung

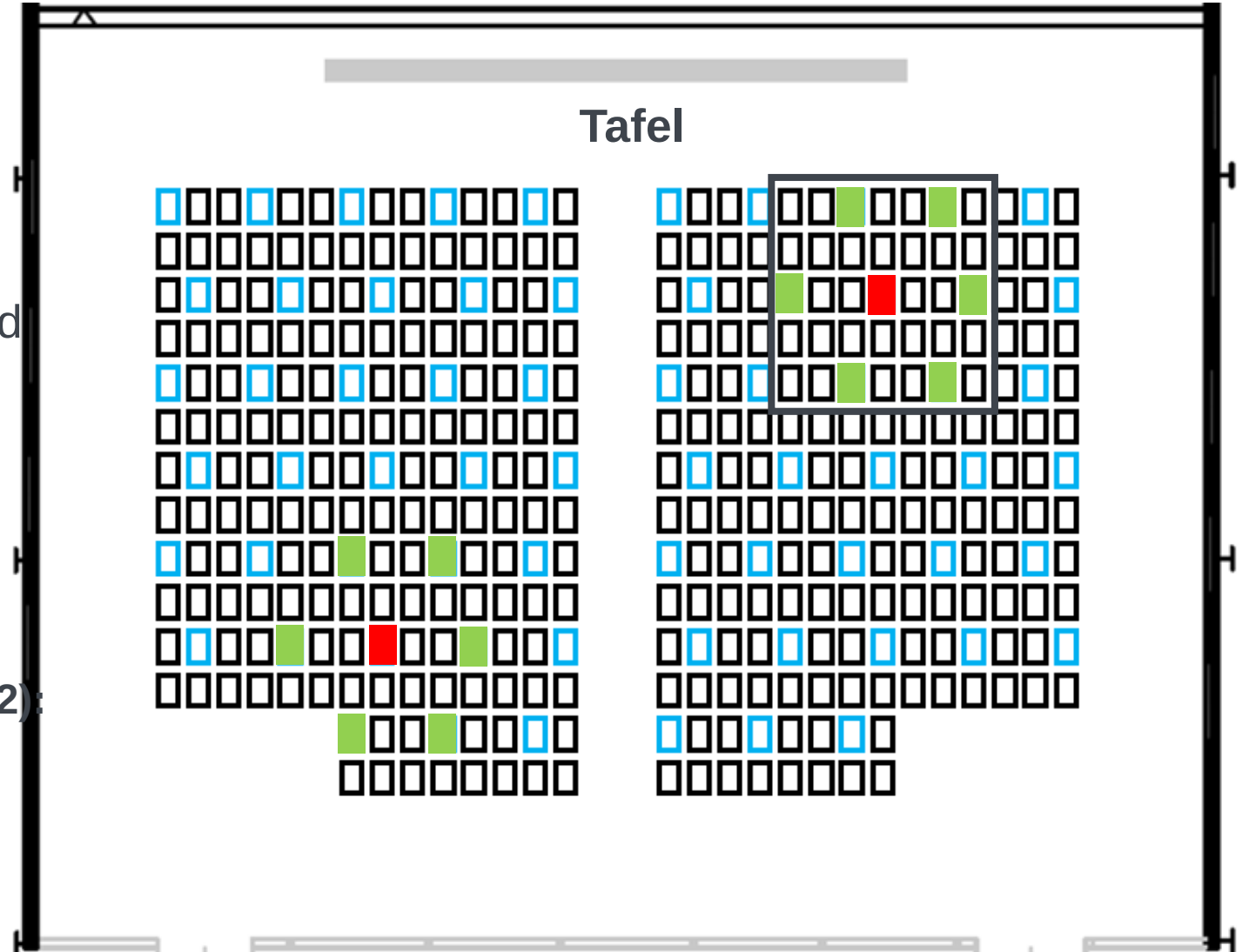
- Belegter Platz
- SF₆-Freisetzung
- Konzentrations-Messstelle

0,1

Mittlere SF₆-Konzentration in ppm und
Verhältnis zur stationären idealen
Mischlüftung (violetter Rahmen)

Theoretische SF₆-Konzentration bei idealer
Mischlüftung im stationären Zustand (M2.02):

$$c_{id,Mischlüftung,stat.}(\infty) = 0,81 \text{ ppm}$$



Ergebnisse

Am Beispiel M2.02 - 1/6-Belegung

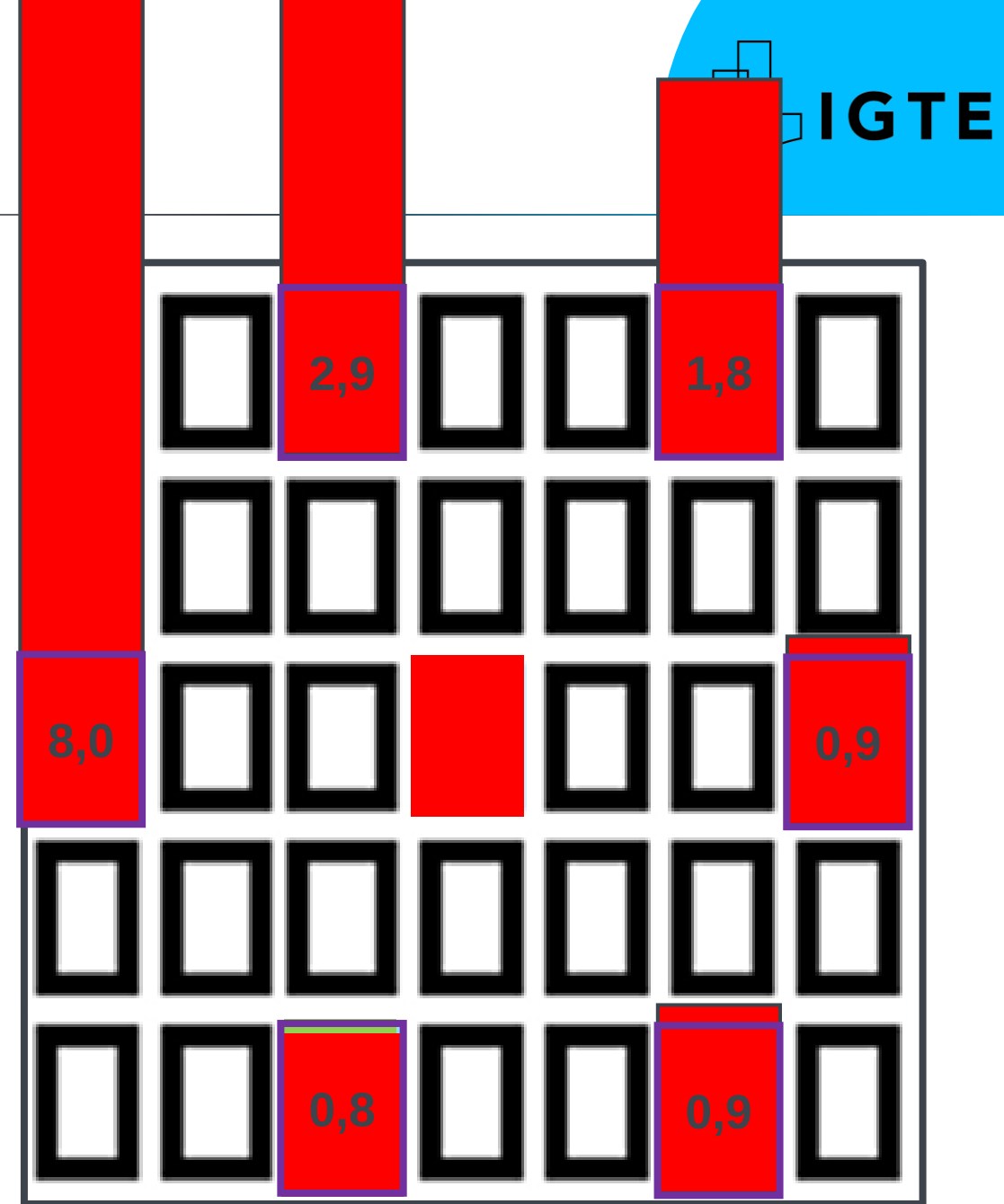
- Belegter Platz
- SF₆-Freisetzung

Konzentrations-Messstelle

0,1 Mittlere SF₆-Konzentration in ppm und Verhältnis zur stationären idealen Mischlüftung (violetter Rahmen)

Theoretische SF₆-Konzentration bei idealer Mischlüftung im stationären Zustand (M2.02):

$$C_{id,Mischlüftung,stat.}(\infty) = 0,81 \text{ ppm}$$



Fazit

Weitere Messungen zur Infektionsgefahr in Innenräumen

- Die Luftführung vier individueller Hörsäle bei verschiedenen Belegungsdichten beurteilt werden.
- Je Hörsaal und Belegung wurde stichprobenartig der schlechteste Fall identifiziert und die Stoffkonzentration mit einer idealen Mischlüftung verglichen.
- Mit den bisher bekannten Daten lassen sich die Hörsäle der Universität Stuttgart für das Infektionsgeschehen als weitestgehend unkritisch bewerten.
- Nur mit mehrfach bestätigten Daten zu emittierten Partikelanzahlen, des Anteils virusenthaltener Partikeln und der Grenzanzahl für ein Infektionsgeschehen kann diese Gefahr bewertet werden.

Ausblick

Weitere Messungen zur Infektionsgefahr in Innenräumen

- Gegenüberstellung der Tracergas- und der Partikelausbreitung
- Messungen beim (unterstützenden) Einsatz von Luftreinigern
- Messungen mit Intervall-Fensterlüftung am Beispiel Schulen (instationäre Betrachtungen)



Universität Stuttgart

Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)

Experimentelle Untersuchungen zur Luft-führung in Hörsälen im Hinblick auf eine potentielle Infektionsausbreitung



Lukas Siebler, M.Sc.

E-Mail Lukas.siebler@igte.uni-stuttgart.de

Telefon +49 (0) 711 685 - 60785

www.igte.uni-stuttgart.de

Universität Stuttgart

Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung

70550 Stuttgart



Back Up Das Infektionsgeschehen

Wie wahrscheinlich ist eine infizierte Person im Hörsaal?

Beispiel Baden-Württemberg: Aktuell 35.005 Erkrankte (275.414 Fälle, 234.191 Genesene, 6.218 Verstorbene) (Stand 19.01.2021) von 11.102.000 Einwohner (Stand 1.HJ 2020)

Konservativste Annahme: 100% davon infektiös und keiner hat Kenntnis über Erkrankung.

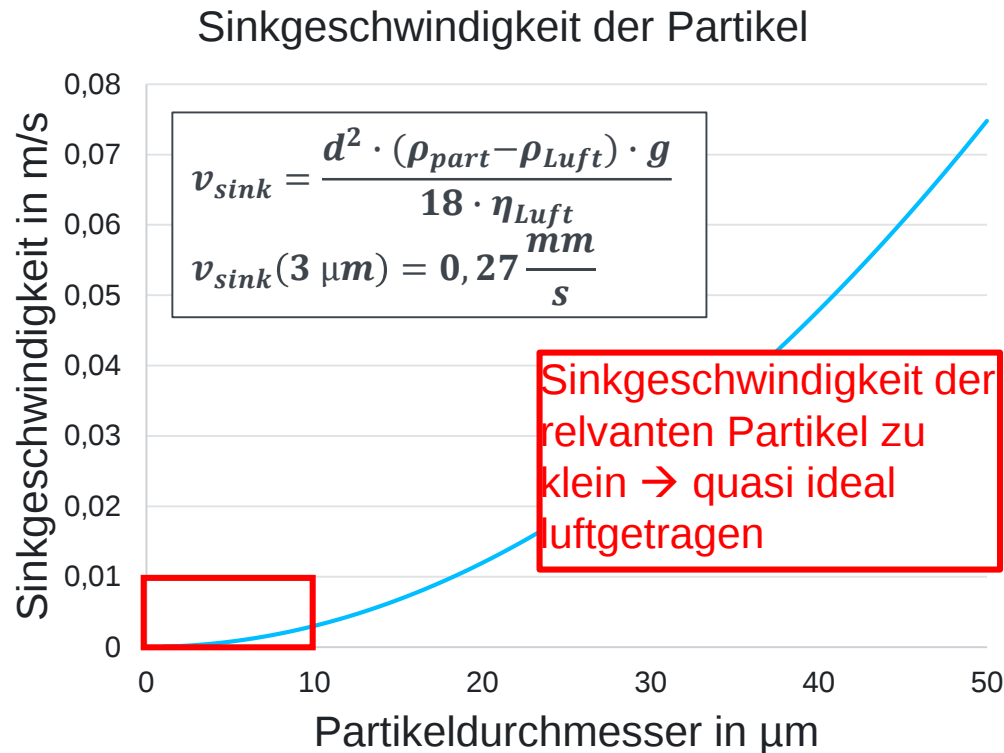
Wahrscheinlichkeit B für k= 0 oder 1 infizierte Personen im Hörsaal mit $n_R = 40, 60 \text{ oder } 80$ anwesenden Personen nach:

$$B(k|p, n_R) = \binom{n_R}{k} \cdot p^k \cdot (1 - p)^{n_R - k}$$

k=	n=	40	60	80
0		88,1 %	82,7 %	77,7 %
1		11,2 %	15,7 %	19,7%
>1		0,7 %	1,6 %	2,6%

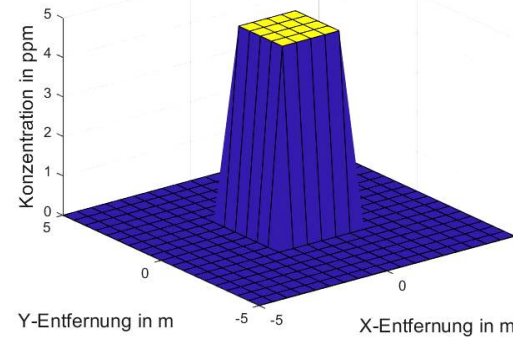
Begründung für die Messungen mit nur einer Quellposition im Hörsaal

Tracergasausbreitung analog zu Partikelausbreitung?



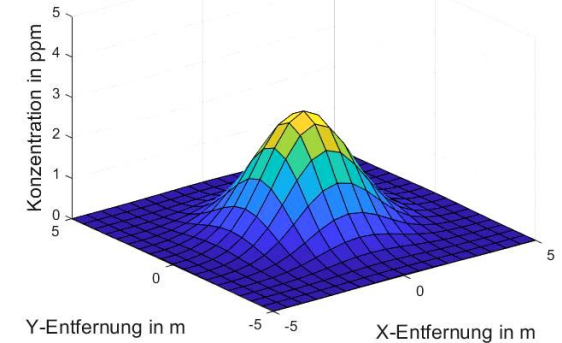
2D-Diffusion von SF₆ - Simulationszeit: 0h

Diffusion Start



2D-Diffusion von SF₆ - Simulationszeit: 24h

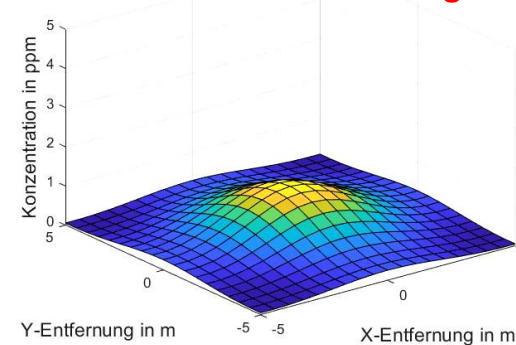
Diffusion nach 1 Tag



Diffusion als zusätzlicher Gastransportvorgang vernachlässigbar

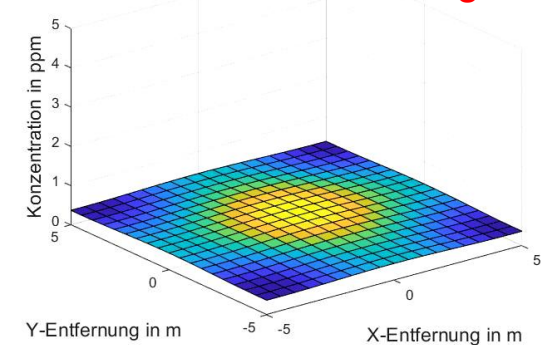
2D-Diffusion von SF₆ - Simulationszeit: 72h

Diffusion nach 3 Tagen



2D-Diffusion von SF₆ - Simulationszeit: 240h

Diffusion nach 10 Tagen



SF₆ verhält sich bis zu einer Anzahlkonzentration von **80 ppm** wie eine ideale Gaskomponente und **verteilt sich homogen in der Luft** (Hahn et al. 2003).

Die untersuchten Objekte

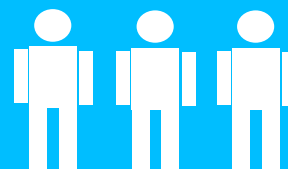
Hörsaal V38.04



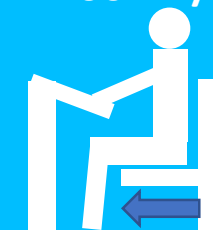
1 RLT-Anlage versorgt 3 Hörsäle

Raumvolumen $V = 1.590 \text{ m}^3$
Luftwechsel $\beta = 4,5$

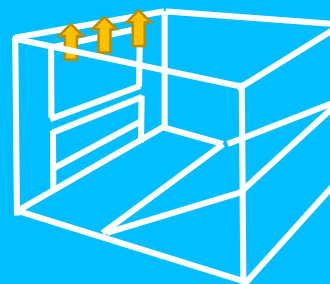
Plätze:
240



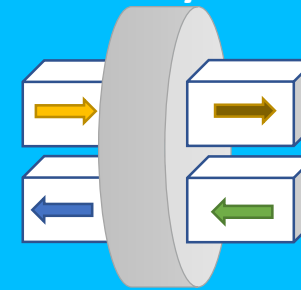
Zuluft:
 $7.200 \text{ m}^3/\text{h}$



Abluft:



WRG-System



Abluftübertrag:
 $\text{EATR} = 0,10$

Quelle: www.piandmore.de

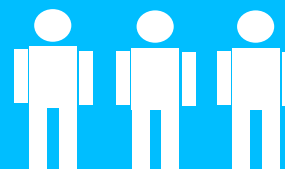
Die untersuchten Objekte

Hörsaal V53.01

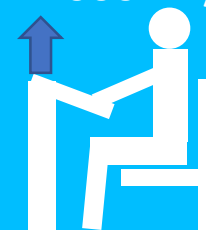


Raumvolumen $V = 2.870 \text{ m}^3$
Luftwechsel $\beta = 8,4$

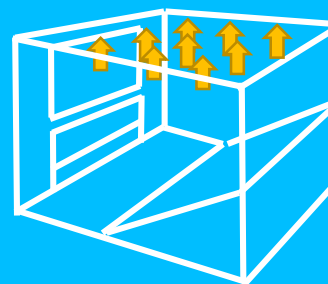
Plätze:
800



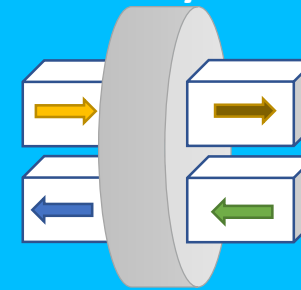
Zuluft:
 $24.000 \text{ m}^3/\text{h}$



Abluft:



WRG-System



Abluftübertrag:
 $\text{EATR} = 0,27$

Quelle: www.professional-system.de

Ergebnisse

Visualisierung der Luftführung durch Kaltnebel



Ergebnisse

Am Beispiel V38.04 - 1/10-Belegung

□ Belegter Platz

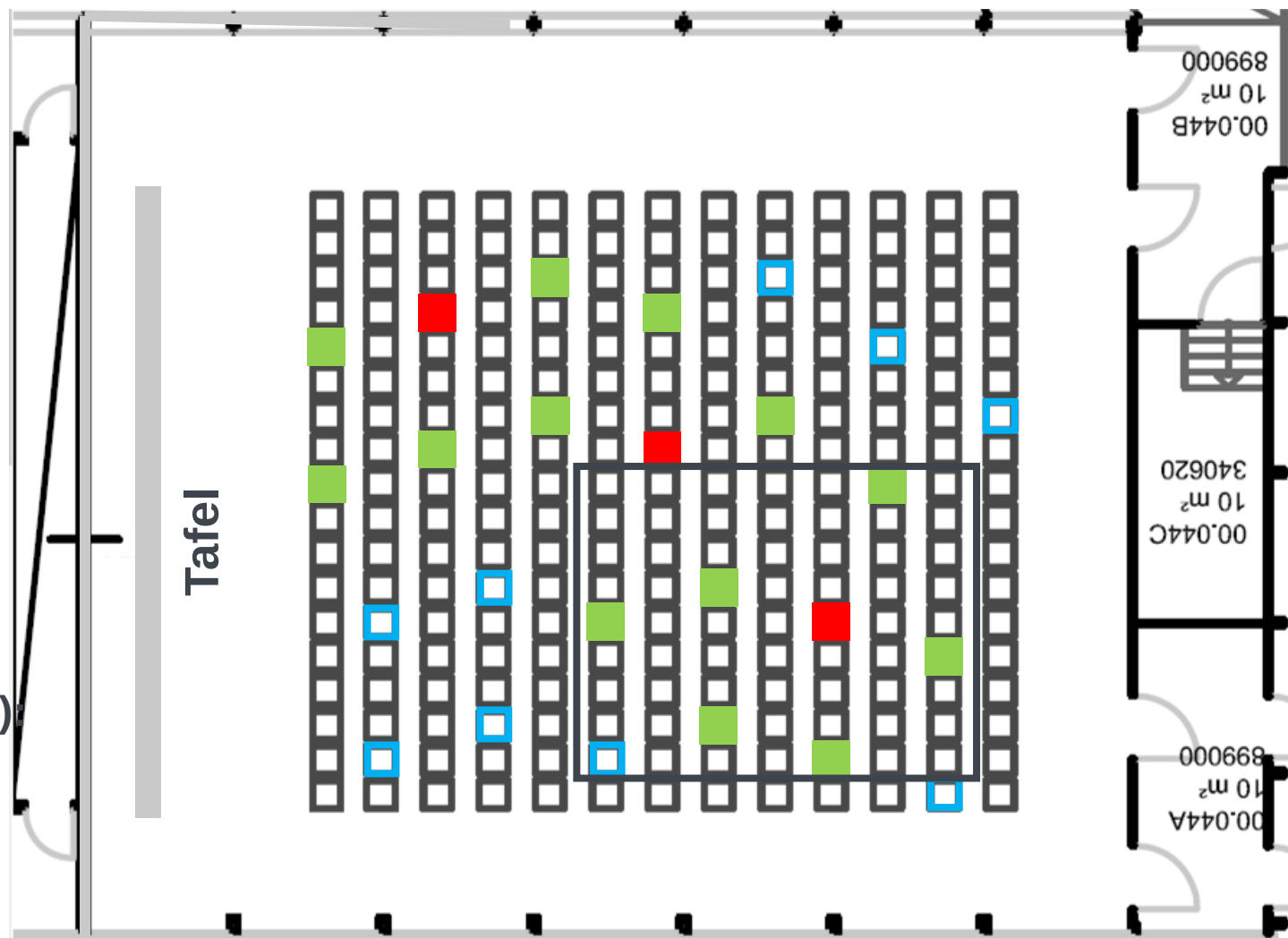
■ SF₆-Freisetzung

■ Konzentrations-Messstelle

0,1
Mittlere SF₆-Konzentration in ppm und
Verhältnis zur stationären idealen
Mischlüftung (violetter Rahmen)

Theoretische SF₆-Konzentration bei idealer
Mischlüftung im stationären Zustand (V38.04)

$$C_{id,Mischlüftung,stat.}(\infty) = 0,85 \text{ ppm}$$



Ergebnisse

Am Beispiel V38.04 - 1/10-Belegung

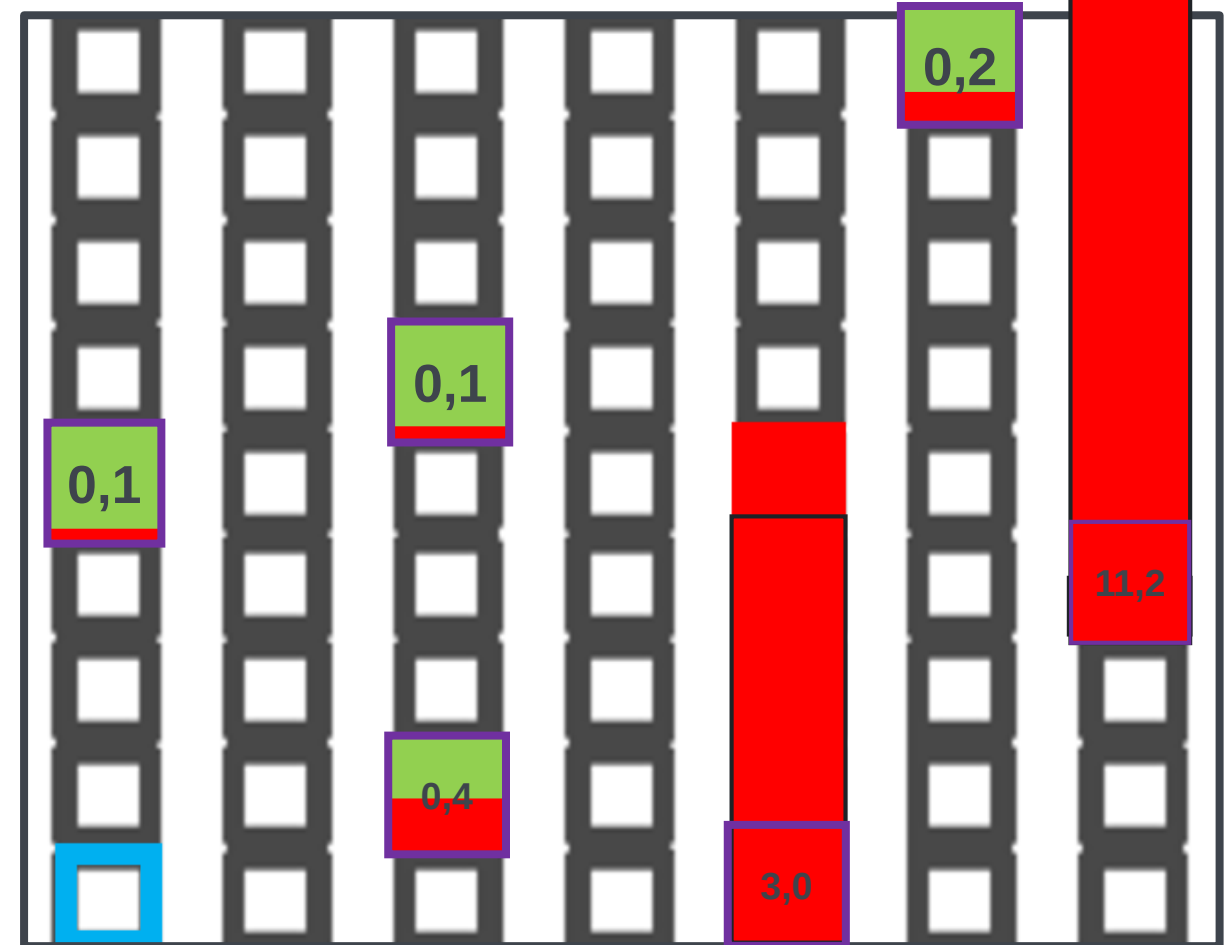
- Belegter Platz
- SF₆-Freisetzung

Konzentrations-Messstelle

0,1 Mittlere SF₆-Konzentration in ppm und Verhältnis zur stationären idealen Mischlüftung (violetter Rahmen)

Theoretische SF₆-Konzentration bei idealer Mischlüftung im stationären Zustand (V38.04):

$$c_{id,Mischlüftung,stat.}(\infty) = 0,85 \text{ ppm}$$



Ergebnisse

Am Beispiel V38.04 - 1/6-Belegung

□ Belegter Platz

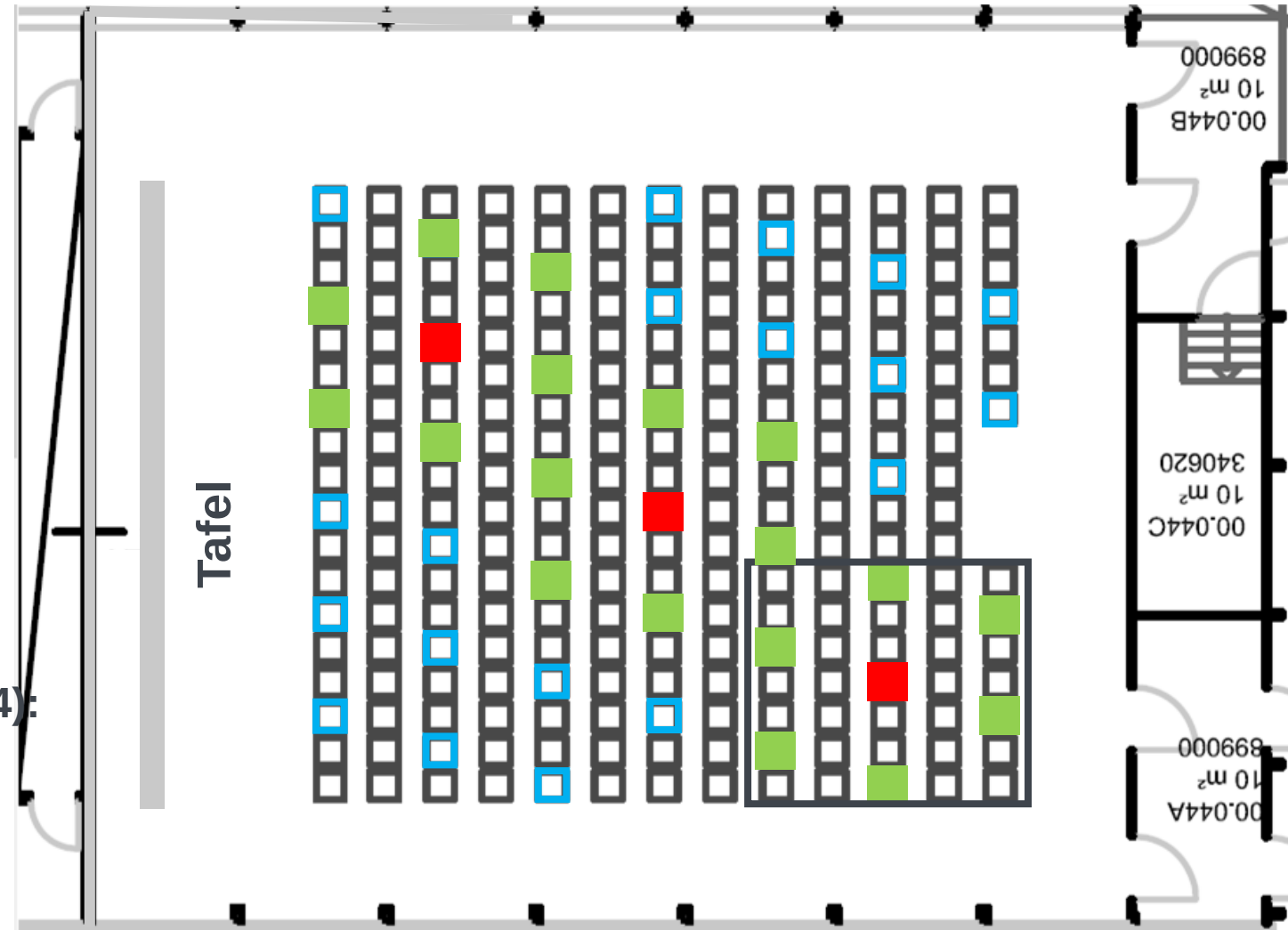
■ SF₆-Freisetzung

■ Konzentrations-Messstelle

0,1
Mittlere SF₆-Konzentration in ppm und
Verhältnis zur stationären idealen
Mischlüftung (violetter Rahmen)

Theoretische SF₆-Konzentration bei idealer
Mischlüftung im stationären Zustand (V38.04):

$$C_{id,Mischlüftung,stat.}(\infty) = 0,85 \text{ ppm}$$



Ergebnisse

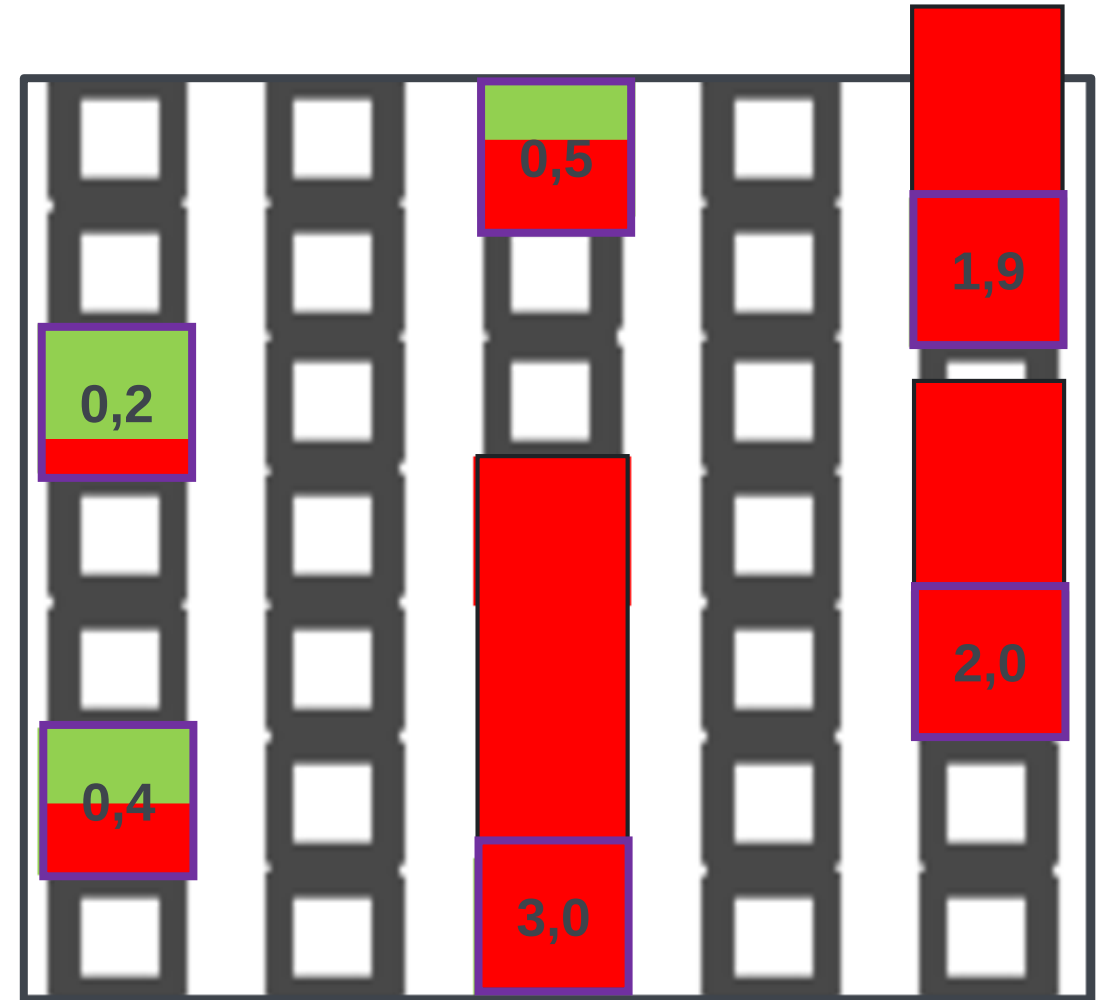
Am Beispiel V38.04 - 1/6-Belegung

- Belegter Platz
- SF₆-Freisetzung
- Konzentrations-Messstelle

0,1 Mittlere SF₆-Konzentration in ppm und Verhältnis zur stationären idealen Mischlüftung (violetter Rahmen)

Theoretische SF₆-Konzentration bei idealer Mischlüftung im stationären Zustand (V38.04):

$$C_{id,Mischlüftung,stat.}(\infty) = 0,85 \text{ ppm}$$



Ergebnisse

Am Beispiel V53.01 - 1/10-Belegung

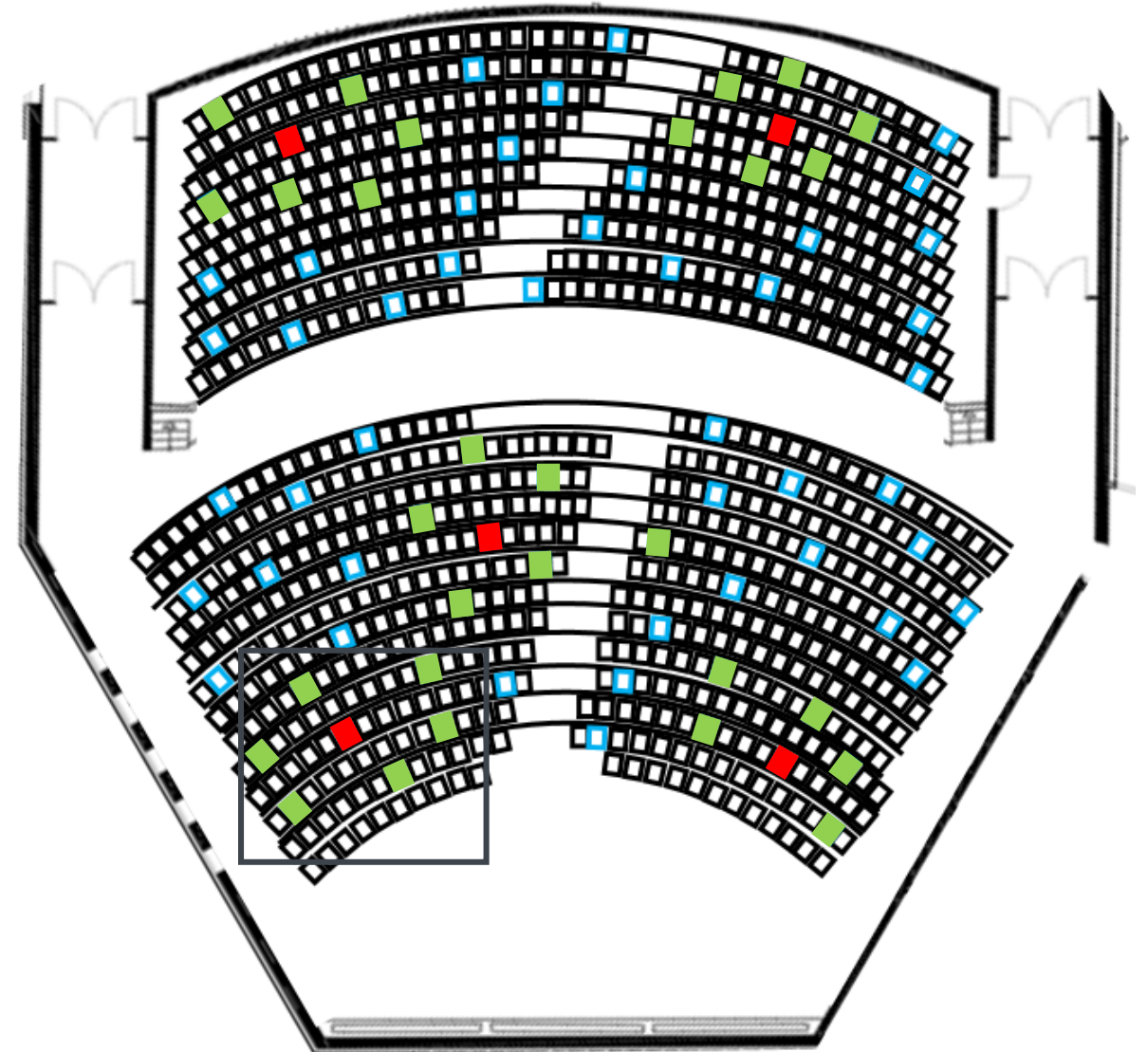
-  Belegter Platz
-  SF₆-Freisetzung
-  Konzentrations-Messstelle

0,1

Mittlere SF₆-Konzentration in ppm und
Verhältnis zur stationären idealen
Mischlüftung (violetter Rahmen)

Theoretische SF₆-Konzentration bei idealer
Mischlüftung im stationären Zustand (V53.01):

$$c_{id,Mischlüftung,stat.}(\infty) = 0,31 \text{ ppm}$$



Ergebnisse

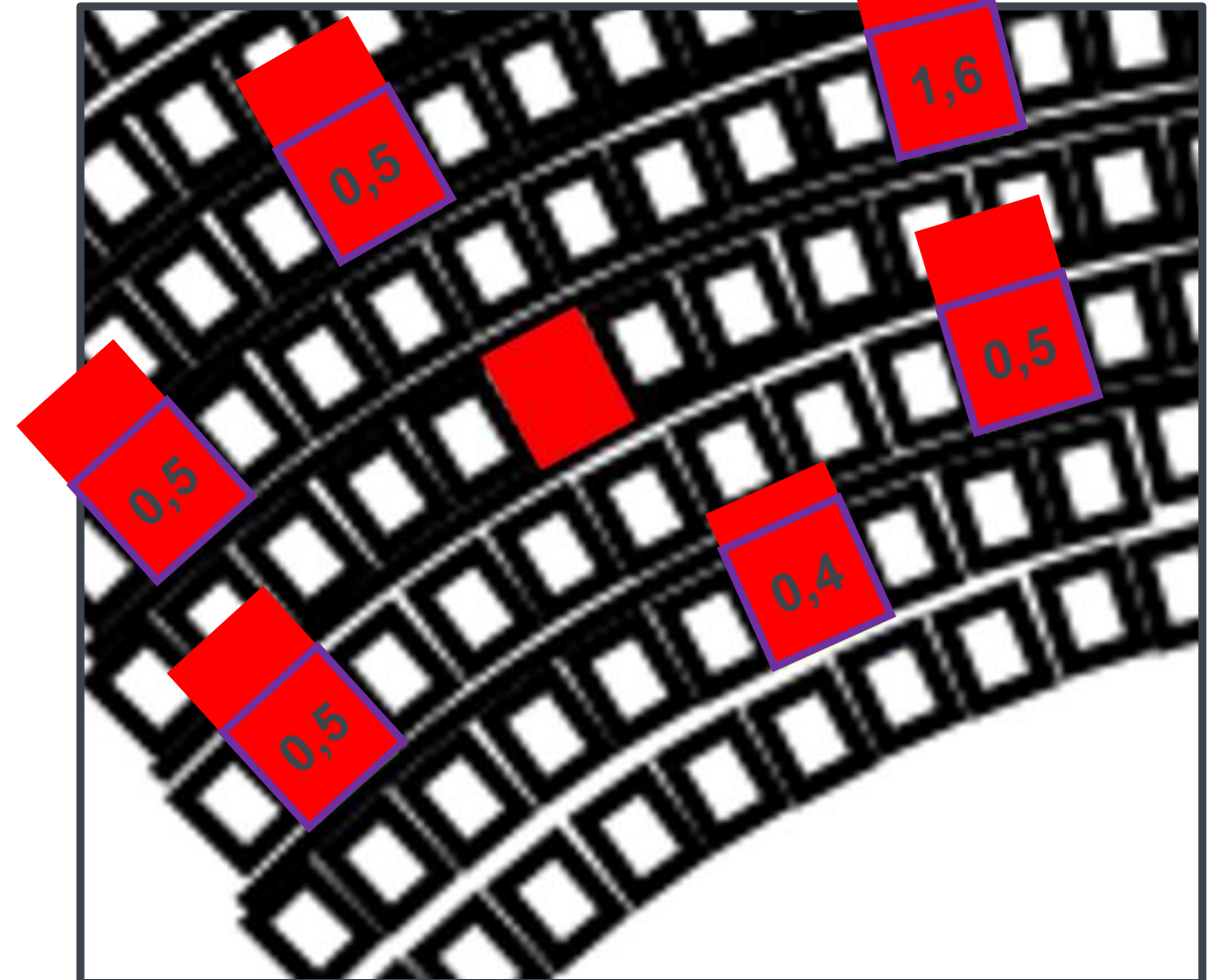
Am Beispiel V53.01 - 1/10-Belegung

- Belegter Platz
- SF₆-Freisetzung
- Konzentrations-Messstelle

0,1 Mittlere SF₆-Konzentration in ppm und Verhältnis zur stationären idealen Mischlüftung (violetter Rahmen)

Theoretische SF₆-Konzentration bei idealer Mischlüftung im stationären Zustand (V53.01):

$$c_{id,Mischlüftung,stat.}(\infty) = 0,31 \text{ ppm}$$



Back Up Ergebnisse

Am Beispiel V57.03 - 1/10-Belegung

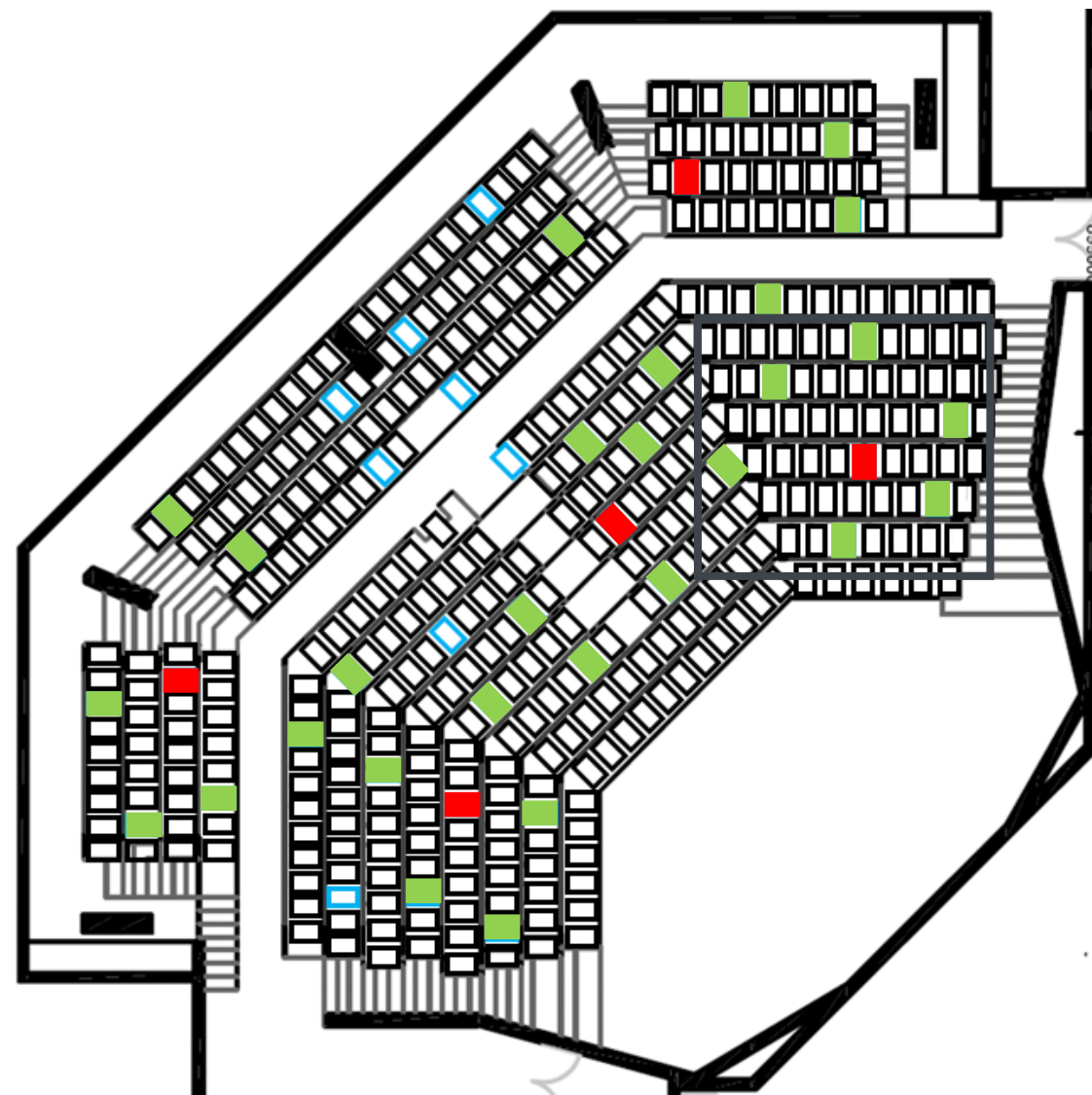
- Belegter Platz
- SF₆-Freisetzung
- Konzentrations-Messstelle

0,1

Mittlere SF₆-Konzentration in ppm und
Verhältnis zur stationären idealen
Mischlüftung (violetter Rahmen)

Theoretische SF₆-Konzentration bei idealer
Mischlüftung im stationären Zustand (V57.03):

$$c_{id,Mischlüftung,stat.}(\infty) = 0,57 \text{ ppm}$$



Back Up Ergebnisse

Am Beispiel V57.03 - 1/10-Belegung

□ Belegter Platz

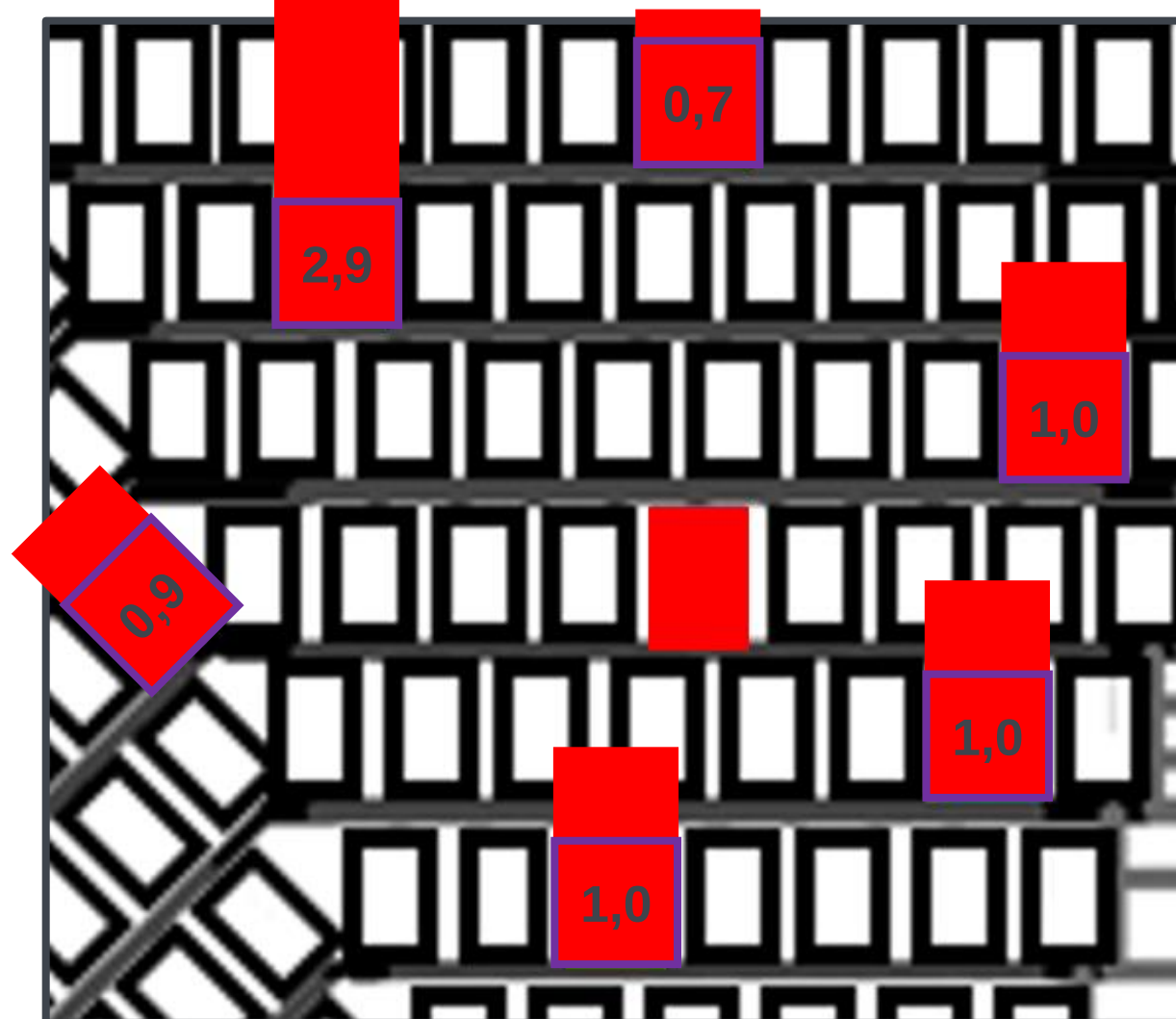
■ SF₆-Freisetzung

■ Konzentrations-Messstelle

0,1 Mittlere SF₆-Konzentration in ppm und Verhältnis zur stationären idealen Mischlüftung (violetter Rahmen)

Theoretische SF₆-Konzentration bei idealer Mischlüftung im stationären Zustand (V57.03):

$$C_{id,Mischlüftung,stat.}(\infty) = 0,57 \text{ ppm}$$



Back Up Ergebnisse

Am Beispiel M2.02 - 1/10-Belegung

- Belegter Platz
- SF₆-Freisetzung
- Konzentrations-Messstelle

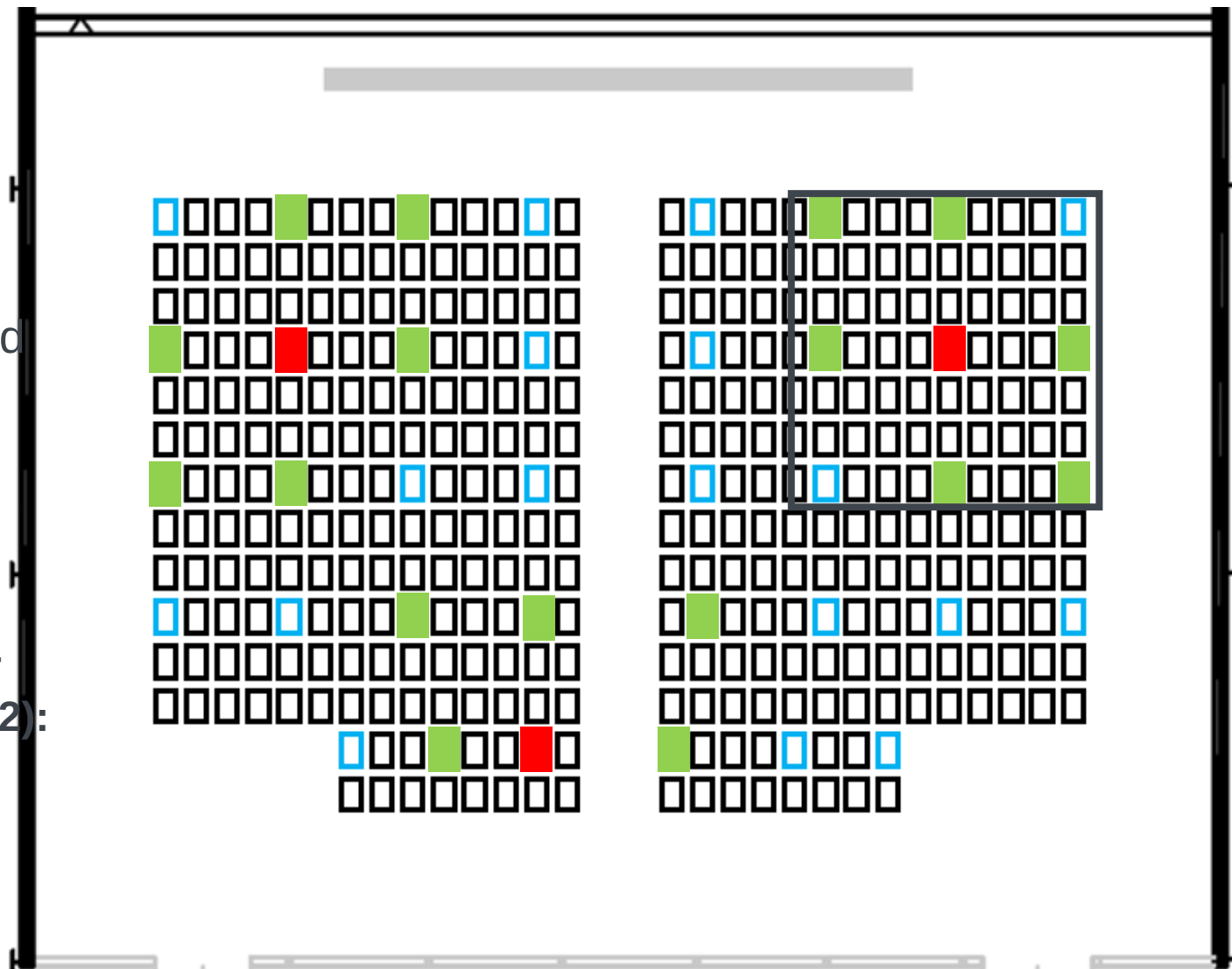
0,1

Mittlere SF₆-Konzentration in ppm und Verhältnis zur stationären idealen Mischlüftung (violetter Rahmen)

Achtung: 5,5 l/h statt 5,0 l/h SF₆-Freisetzung

Theoretische SF₆-Konzentration bei idealer Mischlüftung im stationären Zustand (M2.02):

$$C_{id,Mischlüftung,stat.}(\infty) = 0,89 \text{ ppm}$$



Back Up Ergebnisse

Am Beispiel M2.02 - 1/10-Belegung

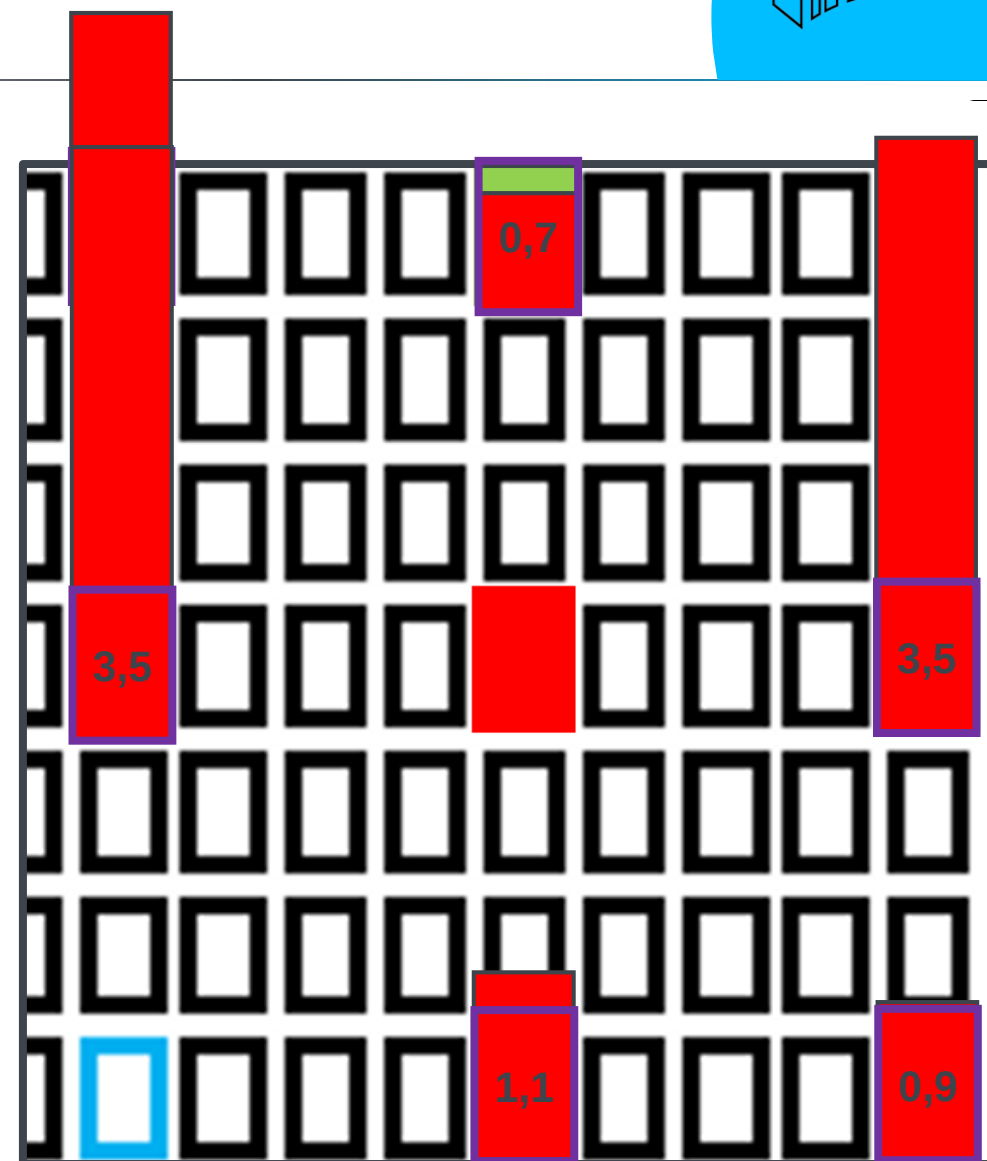
- Belegter Platz
- SF₆-Freisetzung
- Konzentrations-Messstelle

0,1 Mittlere SF₆-Konzentration in ppm und Verhältnis zur stationären idealen Mischlüftung (violetter Rahmen)

Achtung: 5,5 l/h statt 5,0 l/h SF₆-Freisetzung

Theoretische SF₆-Konzentration bei idealer Mischlüftung im stationären Zustand (M2.02):

$$C_{id,Mischlüftung,stat.}(\infty) = 0,89 \text{ ppm}$$



Back Up

Stoffmengen

SF₆ –Konzentration in Ausatemstrom:

$$\frac{\dot{n}_{SF_6}}{\dot{n}_{Ausatmen}} = \frac{\frac{\rho_{SF_6} \cdot \dot{V}_{SF_6}}{M_{SF_6}}}{\frac{\rho_{Luft} \cdot \dot{V}_{Ausatmen}}{M_{Luft}}} = \frac{\frac{6,63 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,005 \frac{m^3}{h}}{0,146 \frac{kg}{mol}}}{\frac{1,20 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,54 \frac{m^3}{h}}{0,0290 \frac{kg}{mol}}} = \frac{0,227 \frac{mol}{h}}{22,5 \frac{mol}{h}} \cdot 1.000.000 \frac{ppm}{1} = \mathbf{10.100 ppm}$$

Theoretische Konzentration bei idealer Mischlüftung (stationär)

Theoretische SF₆-Konzentration bei idealer Mischlüftung
im stationären Zustand ($t = \infty$) am Beispiel für V38.04:

$$c(\infty) = \frac{\dot{n}_{Quelle}}{\frac{\rho_{Luft} \cdot \dot{V}_{AB}}{M_{Luft}} \cdot (1 - EATR)} = \frac{0,227 \frac{mol}{h}}{\frac{1,20 \frac{kg}{m^3} \cdot 7.200 \frac{m^3}{h}}{0,028949 \frac{kg}{mol}} \cdot (1 - 0,101)} \cdot 1.000.000 \frac{ppm}{1} = 0,85 ppm$$

für V53.01:

$$(EATR = 0,27 \quad \dot{V} = 24.000 \frac{m^3}{h})$$
$$c(\infty) = 0,31 ppm$$

für V57.03:

$$(EATR = 0,21 \quad \dot{V} = 12.200 \frac{m^3}{h})$$
$$c(\infty) = 0,57 ppm$$

für M2.02:

$$(EATR = 0,09 \quad \dot{V} = 7.400 \frac{m^3}{h})$$
$$c(\infty) = 0,81 ppm$$

Quelle: DIN EN 308_6:

3.3.7

Fortluftübertragungsverhältnis

EATR

Übertragung von Fortluft in die Zuluftseite der HRC und ein Wert, der das Verhältnis zwischen Fortluft und Zuluft angibt

Anmerkung 1 zum Begriff: Das EATR kann mit Prüfgas gemessen werden. Dieser Wert ist die Differenz der Prüfgaskonzentration zwischen der Ausströmöffnung für die Zuluft (C_{22}) und der Einströmöffnung für die Zuluft (C_{21}) geteilt durch die Differenz der Prüfgaskonzentration zwischen der Einströmöffnung für die Fortluft (C_{11}) und der Einströmöffnung für die Zuluft (C_{12}), angegeben als Prozentsatz.

$$\text{EATR} = \frac{C_{22} - C_{21}}{C_{11} - C_{21}} \quad \text{Exhaust Air Transfer Ratio} \quad (7)$$

Dabei ist

- C_{11} die Prüfgaskonzentration an der Einströmöffnung für Fortluft;
- C_{21} die Prüfgaskonzentration an der Einströmöffnung für Zuluft;
- C_{22} die Prüfgaskonzentration an der Ausströmöffnung für Zuluft;

Back Up

Infektionsumstände

Table 3
Reported airborne transmission cases from the media. HS stands for Helsingin Sanomat, the largest subscription newspaper in Finland, and YLE stands for Finland's national public broadcasting company Yleisradio.

Reference	Case	Present assumptions	Estimated number of inhaled aerosols N
HS 1	Sipoo wedding Mar 7, 2020: 96 persons, 'several' were infected, duration few hours, no symptomatic persons.	$V = 1600 \text{ m}^3$ $\lambda = 1 - 50 \text{ s}^{-1}$ $t = 3 \text{ h}$	$N \sim 50 - 500$
HS 2	Sipoo birthday party Mar 7, 2020. 70 guests, more than 10% got infection, no symptomatic persons.	$V = 800 \text{ m}^3$ $\lambda = 1 - 50 \text{ s}^{-1}$ $t = 3 \text{ h}$	$N \sim 100 - 1000$
Lu et al. (2020)	Restaurant, Guangzhou, China, Jan 24: 91 persons ate at the restaurant, 10 infected. Four infected persons sat in the same table as the asymptomatic index patient, three were in contact for 53 min and two for 73 min. Dining area was 145 m^2 .	$V = 400 \text{ m}^3$ $\lambda = 1 - 50 \text{ s}^{-1}$ $t = 1 \text{ h}$	$N \sim 20 - 200$
HS/YLE 3	Women's Day concert, Mar 8, 2020, Helsinki. <1700 persons, at least 7 infected, duration 2 h.	$V = 10,000 \text{ m}^3$ $\lambda = \log - \text{normal}$ $t = 2 \text{ h}$	$N \sim 30 - 400$

In agreement with our experimentally determined bottle-neck sizes, a recent preprint describing a dose-response modeling study estimated $3 \times 10^2 - 2 \times 10^3$ SARS-CoV-2 virions necessary to initiate an infection (29). The dynamics of super-

29. M. Prentiss, A. Chu, K. K. Berggren, Superspreading Events Without Superspreaders: Using High Attack Rate Events to Estimate N_0 for Airborne Transmission of COVID-19, medRxiv, 2020.10.21.20216895 (2020).

7.2. Estimates on the critical level of aerosol exposure

While the critical dose of the virus-containing particles is not known, order of magnitude estimates on the aerosol exposure can be deduced from incidents reported during the ongoing COVID-19 pandemic. Not all aerosols would carry viruses but part of them could. Table 3 lists a few of such incidents where, according to the media reports, several people were infected.

The coupling between the particle production and the ventilation rate could be modelled using classical methods, such as the Wells-Riley approach (Riley et al., 1978). Here, we use a simplified model assuming a single individual emitting aerosol particles at rate λ . The particles are instantaneously mixing in a space with volume V , very low ventilation exchange rate, and no initial particles. Under such circumstances, the mean particle concentration increases steadily during the gathering, and we can calculate the number of inhaled particles for each person as

$$N_b(t) = \int_0^t V_b c(t') dt' = V_b \int_0^t \frac{\lambda}{V} t' dt' = \frac{V_b \lambda t^2}{2V}. \quad (4)$$

For cases with a pre-symptomatic emitter, we assume $\lambda = 1 - 50 \text{ s}^{-1}$ (Asadi et al., 2019), and for coughing, λ was calculated as discrete releases of N particles every 5 min, where N was picked randomly from a log-normal distribution with parameters (10.74, 0.99) (Lindsley et al., 2012). The breathing rate V_b was assumed to be a uniformly distributed random variable between $8 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$ and $20 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$. Assigning estimated space volume and event duration and using the 10% and 90% fractiles as the lower and upper bounds, we get the range $10 \leq N_b \leq 1000$ for the number of inhaled particles in the considered four cases. In the following analyses, we assume a critical number of inhaled particles $N_{b,cr} = 100$. The above assumptions should be refined if official investigations become available, and the inherent uncertainty of this estimate should be kept in mind when evaluating the results.

7.3. Flow visualization of exhaled air and droplet size effects

To give an overall impression on the dispersion evolution of the cough-released aerosol cloud, Fig. 6 depicts concentration isosurfaces at two different time instances obtained from PALM simulations where the Lagrangian particles have been assigned (a) no mass, (b) $10 \mu\text{m}$ diameter and (c) $20 \mu\text{m}$ diameter with 1000 kg m^{-3} density. The left column images are at $t = 20 \text{ s}$, which is relatively early in the cloud

Back Up

Partikelemission

Quelle: Hartmann et al.

	Atmen durch die Nase	Atmen durch den Mund	Sprechen	Husten
Mittelwert	23 P/s	134 P/s	195 P/s	13.709 P/Husten
Minimalwert	0 P/s	7 P/s	17 P/s	181 P/Husten
Maximalwert	296 P/s	1018 P/s	626 P/s	287.697 P/Husten
Probandenanzahl	10 (4 w/6 m)	18 (8 w/10 m)	17 (8 w/9 m)	8 (4 w/4 m)

Quelle: Stadnytskyi et al.

been firmly established. For COVID-19, with an oral fluid average virus RNA load of 7×10^6 copies per milliliter (maximum of 2.35×10^9 copies per milliliter) (7), the probability that a 50- μm -diameter droplet, prior to dehydration, contains at least one virion is $\sim 37\%$. For a 10- μm droplet, this probability drops to 0.37%, and the probability that it contains more than one virion, if generated from a homogeneous distribution of oral fluid, is negligible. Therefore, airborne droplets pose a significant risk

Quelle: Stadnytskyi et al.

areas (8). Estimates using an average sputum viral load for SARS-CoV-2 indicate that 1 min of loud speaking could generate >1000 virion-containing aerosols (9). Assuming viral titers for infected super-emitters (with 100-fold higher viral load than average) yields an increase to more than 100,000 virions in emitted droplets per minute of speaking.

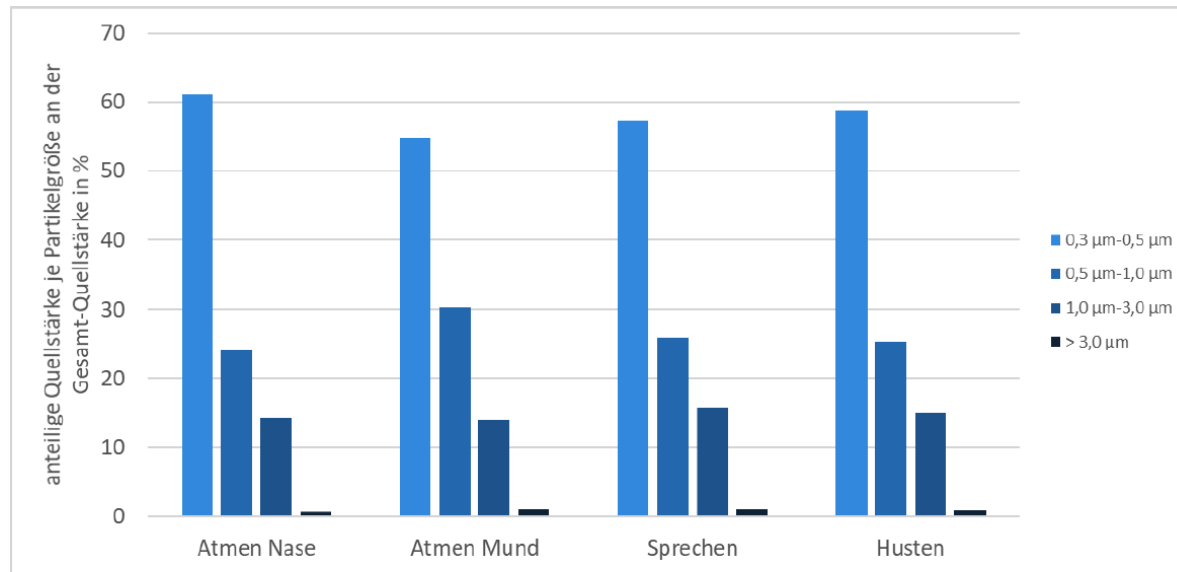
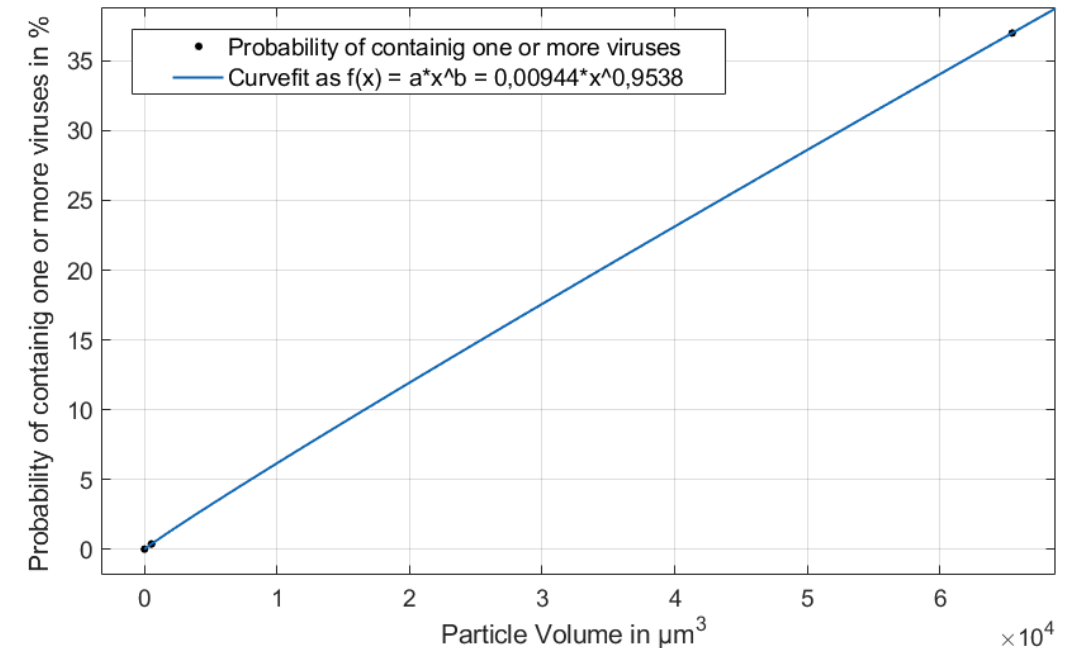
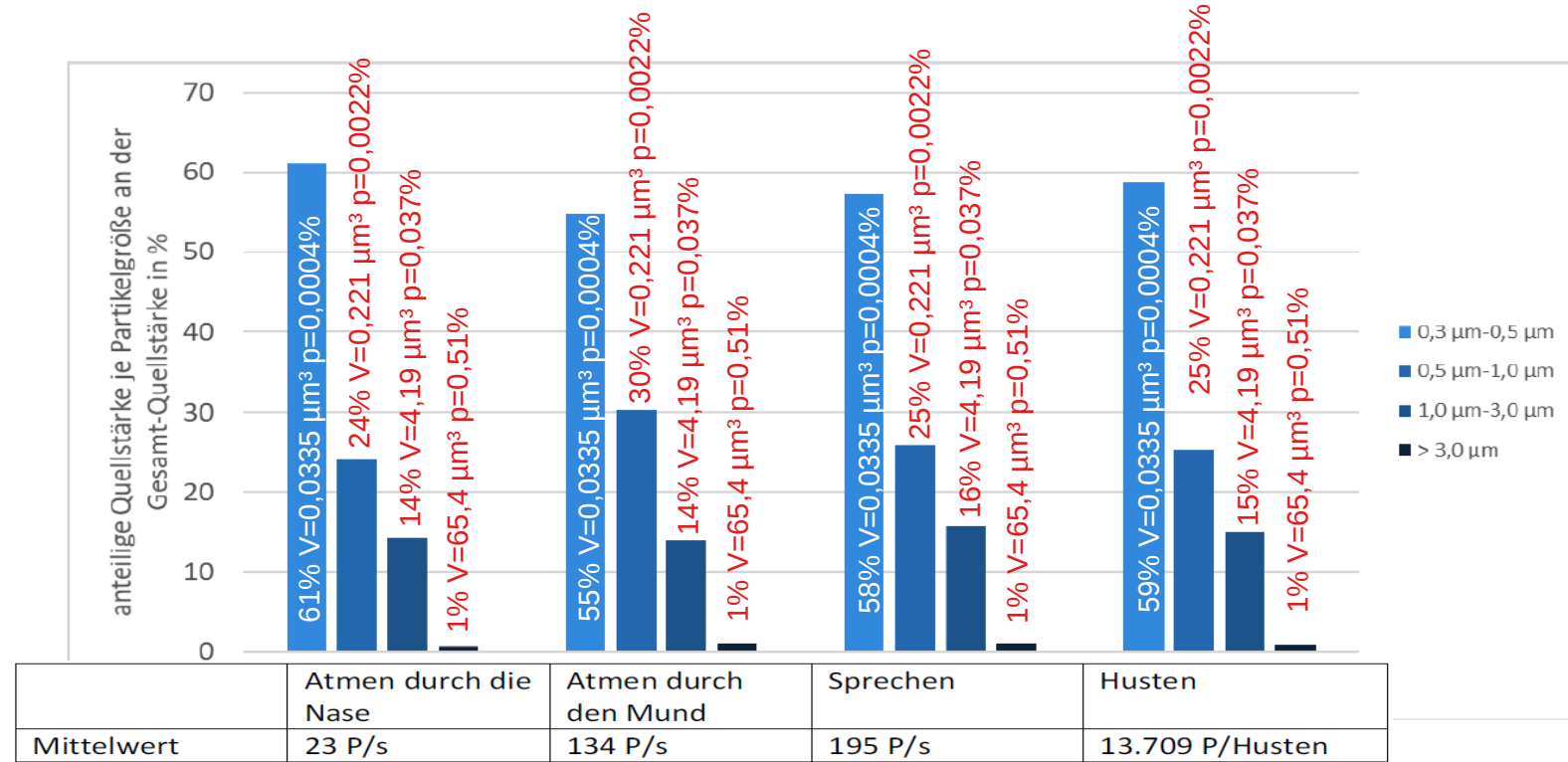


Abbildung 4: Größenverteilung der von den Testpersonen emittierten Aerosolpartikel.





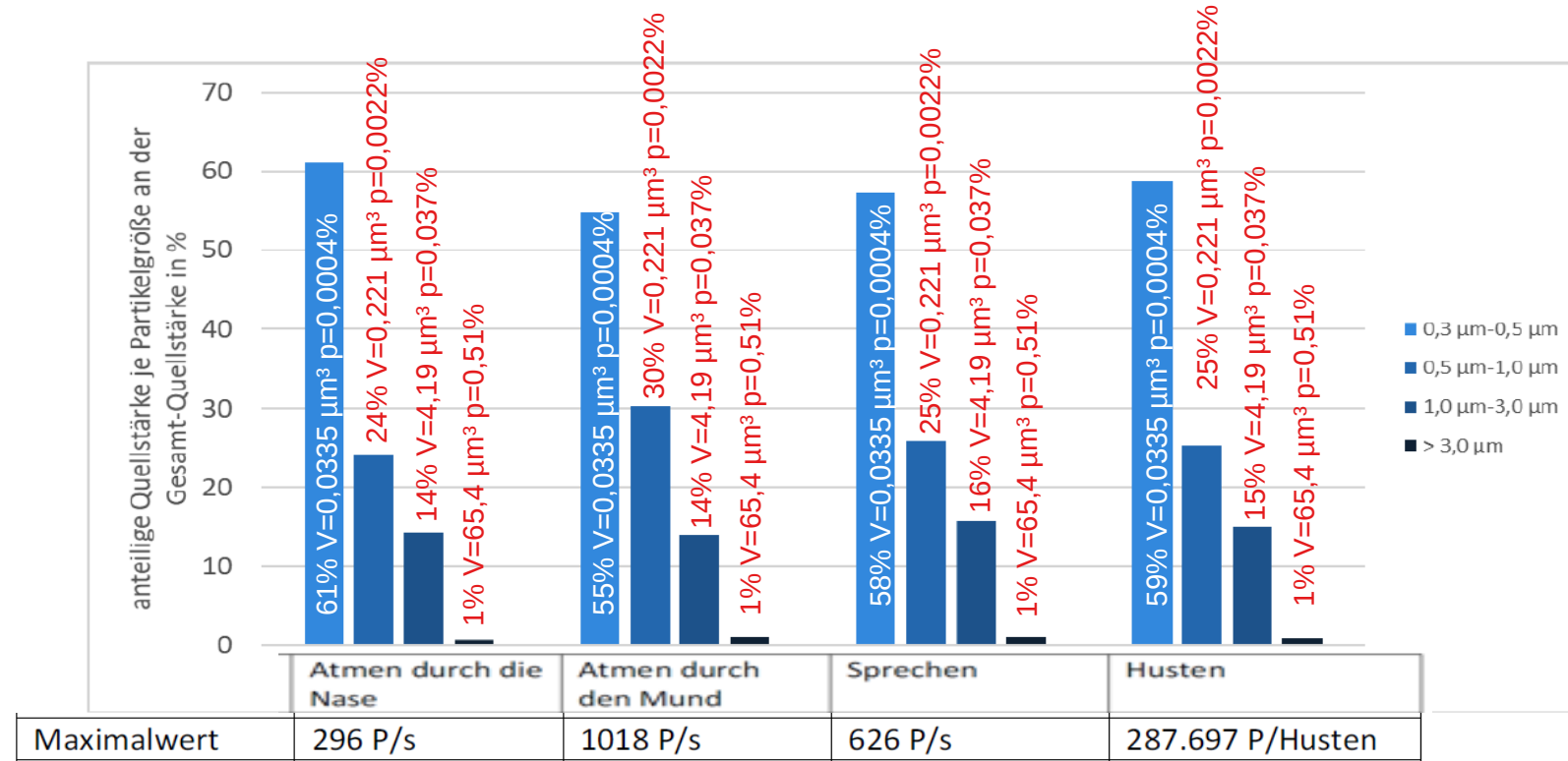
Atmen durch Nase: $23 \frac{1}{s} \cdot 3600 \frac{s}{h} \cdot (0,61 \cdot 0,000004 + 0,24 \cdot 0,000022 + 0,14 \cdot 0,00037 + 0,01 \cdot 0,0051) = 9,15 \frac{1}{h}$

Atmen durch Mund: $134 \frac{1}{s} \cdot 3600 \frac{s}{h} \cdot (0,55 \cdot 0,000004 + 0,3 \cdot 0,000022 + 0,14 \cdot 0,00037 + 0,01 \cdot 0,0051) = 53,8 \frac{1}{h}$

Sprechen: $195 \frac{1}{s} \cdot 3600 \frac{s}{h} \cdot (0,58 \cdot 0,000004 + 0,25 \cdot 0,000022 + 0,16 \cdot 0,00037 + 0,01 \cdot 0,0051) = 82,9 \frac{1}{h}$

Husten: $13.709 \frac{1}{Husten} \cdot x \frac{Husten}{h} \cdot (0,59 \cdot 0,000004 + 0,25 \cdot 0,000022 + 0,15 \cdot 0,00037 + 0,01 \cdot 0,0051) = 1,57 \cdot x \frac{1}{h}$

Freigesetzte virenbeladene Partikel - Worst Case – „Superspreader“



Atmen durch Nase: $296 \frac{1}{s} \cdot 3600 \frac{s}{h} \cdot (0,61 \cdot 0,000004 + 0,24 \cdot 0,000022 + 0,14 \cdot 0,00037 + 0,01 \cdot 0,0051) = 117,9 \frac{1}{h}$

Atmen durch Mund: $1018 \frac{1}{s} \cdot 3600 \frac{s}{h} \cdot (0,55 \cdot 0,000004 + 0,3 \cdot 0,000022 + 0,14 \cdot 0,00037 + 0,01 \cdot 0,0051) = 408,7 \frac{1}{h}$

Sprechen: $195 \frac{1}{s} \cdot 3600 \frac{s}{h} \cdot (0,58 \cdot 0,000004 + 0,25 \cdot 0,000022 + 0,16 \cdot 0,00037 + 0,01 \cdot 0,0051) = 266,1 \frac{1}{h}$

Husten: $13.709 \frac{1}{Husten} \cdot x \frac{Husten}{h} \cdot (0,59 \cdot 0,000004 + 0,25 \cdot 0,000022 + 0,15 \cdot 0,00037 + 0,01 \cdot 0,0051) = 32,9 \cdot x \frac{1}{h}$

Theorie der Intervall-Fensterlüftung unter den Annahmen einer ständig idealen Durchmischung im Raum und keines Kurzschlusses bei Fensterlüftung:

$$t < t_{Fen.}: c(t) = \frac{\dot{n}_{Quelle}}{V_R} \cdot t$$

$$t > t_{Fen.}: c(t) = \frac{\dot{n}_{Quelle}}{\dot{V}_{Fen.}} - \left(\frac{\dot{n}_{Quelle}}{\dot{V}_{Fen.}} - c(t_{Fen.}) \right) \cdot e^{-\frac{\dot{V}_{Fen.}}{V_R} \cdot t}$$

