



Universität Stuttgart

Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)

Anlage 3_Vorlage 152/21

Zwischenstand: Pilotprojekt zu Luftreinigern an Schulen in Stuttgart

13.04.2021

Prof. Dr.-Ing.
K. Stergiaropoulos



Inhalt

Übersicht

- Einleitung und Theorie
- Klassenraum: Vorgehen am Beispiel der Uhlandschule
- Messkonzept Stoffausbreitung im Raum (Spurengas/Testaerosol)
- Messkonzept Behaglichkeit
- Messkonzept Schall (Schalldruckpegel)
- Auswertung
- Erkenntnisse

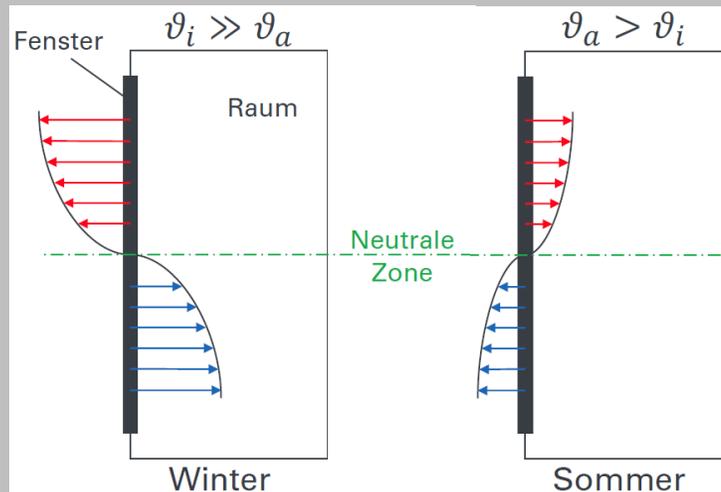
Einleitung

Warum eine Messkampagne in Schulen?

- Noch immer hohe Fallzahlen von SARS-CoV-2-Infektionen
- Wie hoch ist die Infektionsgefahr in Klassenräumen?
- Welche Maßnahmen sind wirkungsvoll?
- Bewertung von Luftreinigern, Fensterlüftung und des Betriebs von Lüftungsanlagen hinsichtlich der Infektionsgefahr.

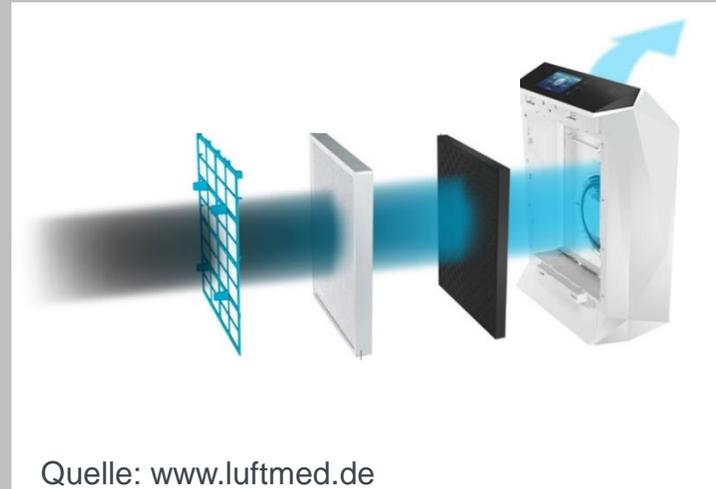
Fensterlüftung

- Außenluftzufuhr
- Wetterabhängiger Lufttransport aufgrund eines thermisch bedingten Dichteunterschieds und Winddrücken
- Lüftungswärmeverluste



Mobiler Luftreiniger

- **Keine** Außenluftzufuhr
- Sekundärluft wird im Raum umgewälzt und dabei von Partikeln befreit
- kontinuierlicher Volumenstrom



Festverbaute Lüftungsanlage (RLT)

- Außenluftzufuhr
- Wetterunabhängiger Lufttransport aufgrund einer Druckerhöhung in einem Ventilator
- Reduzierter Lüftungswärmeverlust aufgrund Wärmerückgewinnung



Theorie

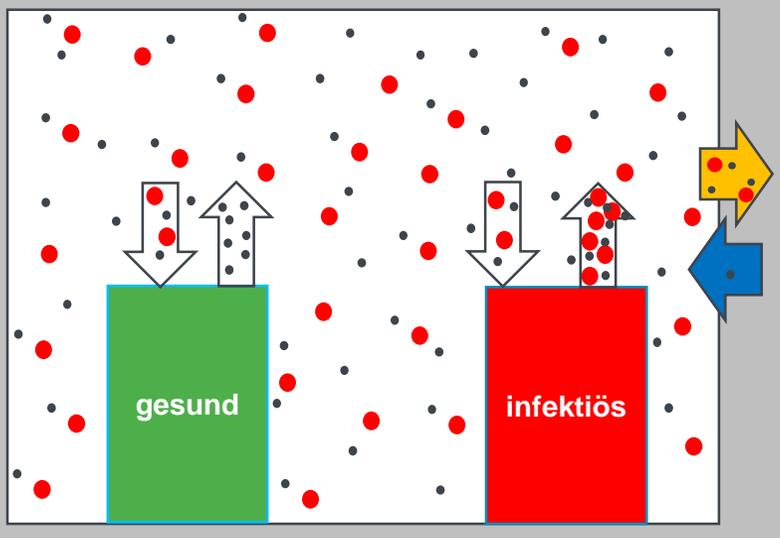
Kriterium zur Beurteilung der Infektionsgefahr

Fensterlüftung

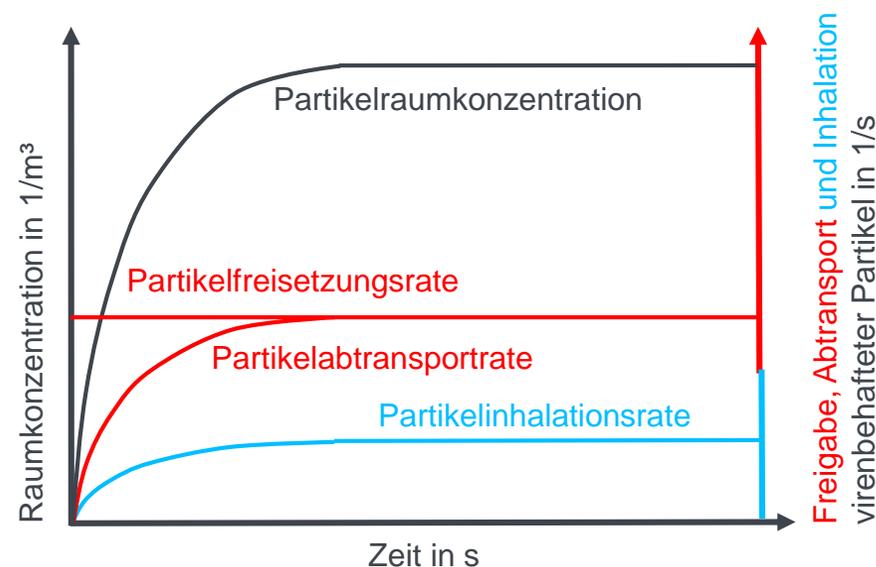
Luftreiniger (LR)

Lüftungsanlage (RLT)

Stoffliche Lastabfuhr sowohl von Partikeln als auch Gasen (z.B. CO₂)



- virusbeladener Partikel
- CO₂
-  Zuluft
-  Abluft
-  Außenluft
-  Fortluft



Theorie

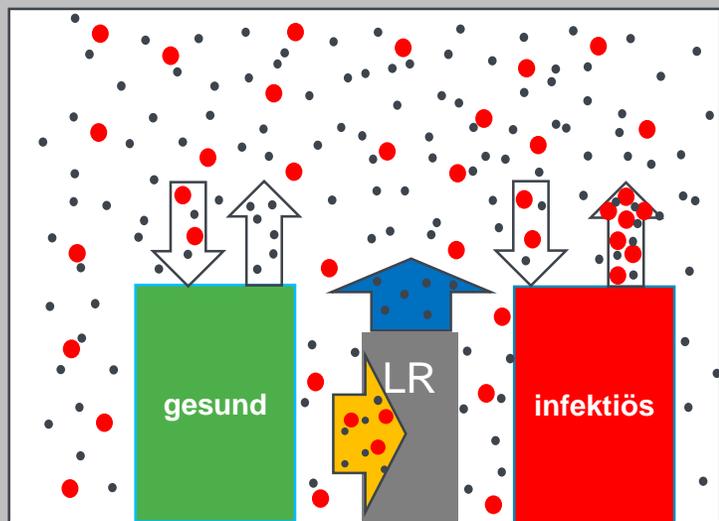
Kriterium zur Beurteilung der Infektionsgefahr

Fensterlüftung

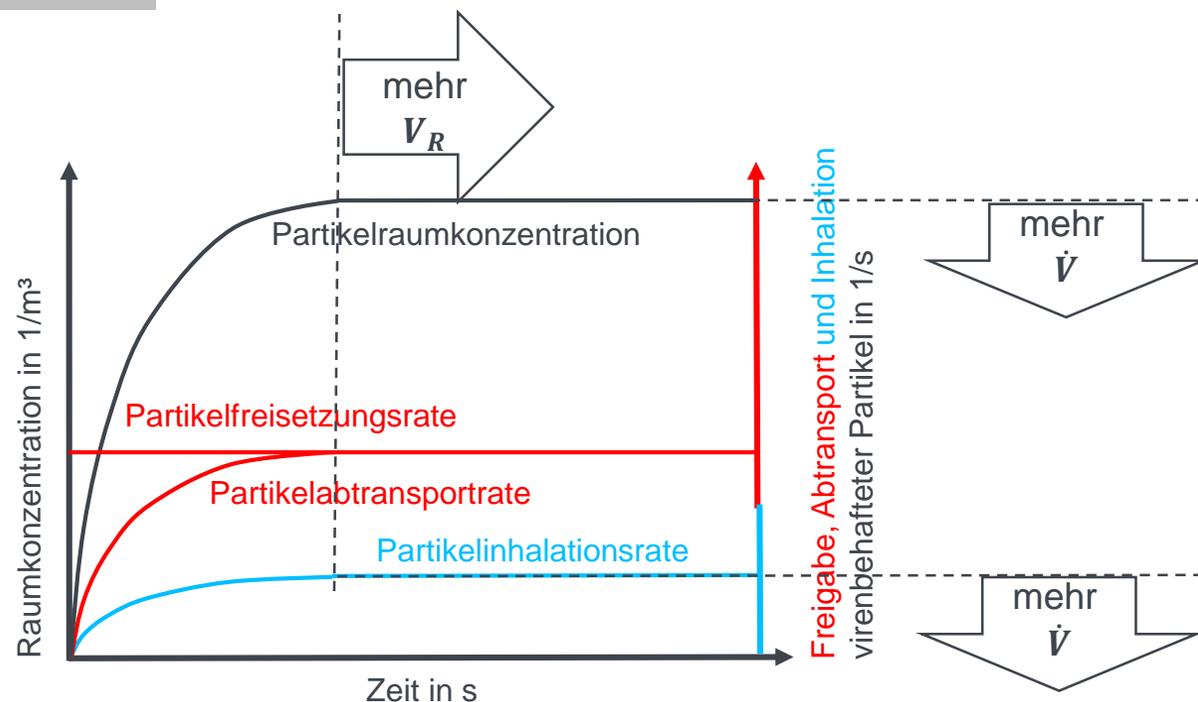
Luftreiniger (LR)

Lüftungsanlage (RLT)

Stoffliche Lastabfuhr nur von Partikeln

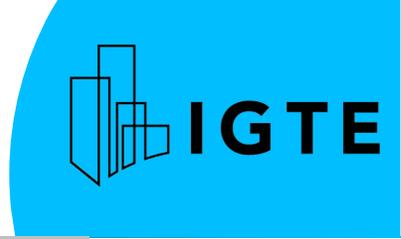


- virusbeladener Partikel
- CO₂
-  Zuluft
-  Abluft
-  Außenluft
-  Fortluft



Theorie

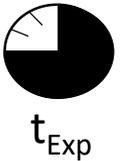
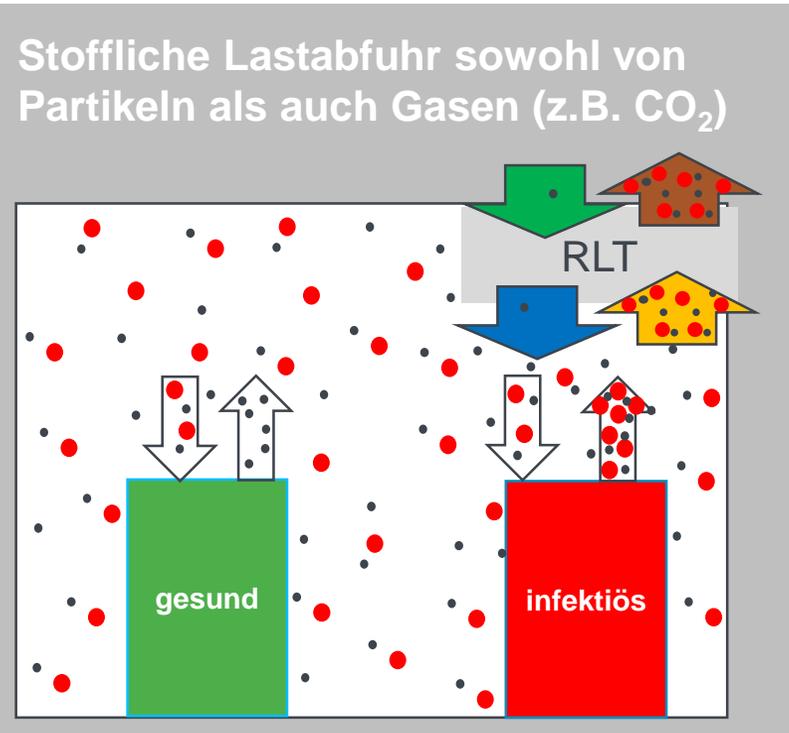
Kriterium zur Beurteilung der Infektionsgefahr



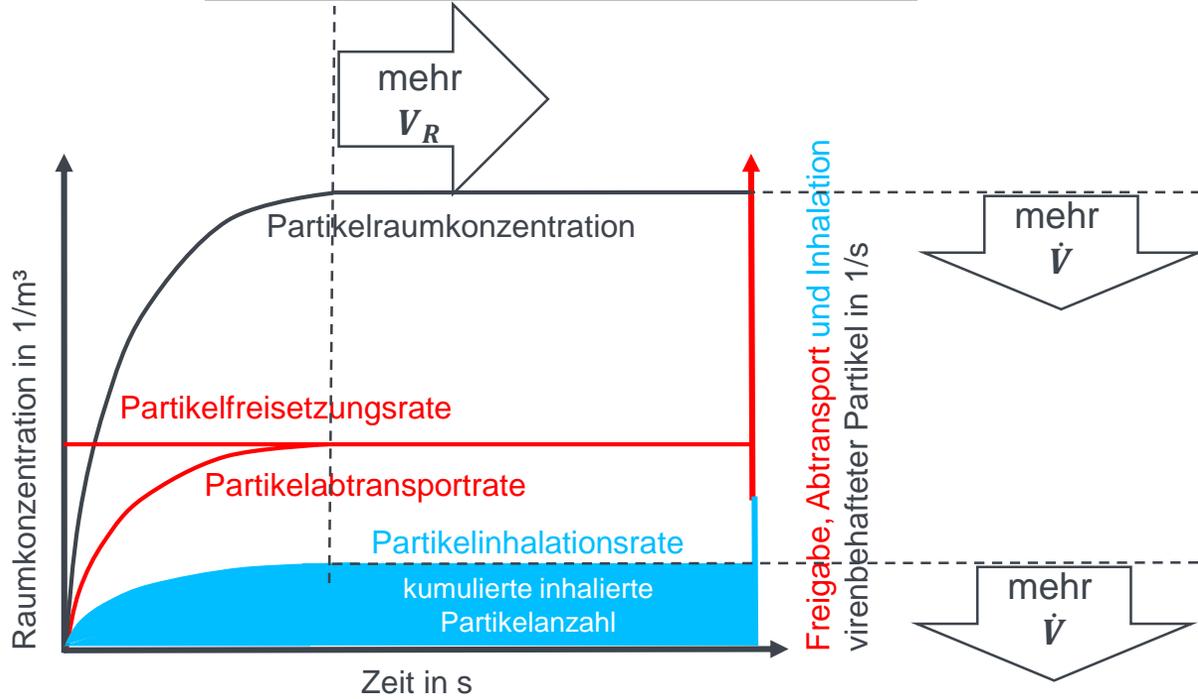
Fensterlüftung

Luftreiniger (LR)

Lüftungsanlage (RLT)



- virusbeladener Partikel
- CO₂
- ➡ Zuluft
- ➡ Abluft
- ➡ Außenluft
- ➡ Fortluft



Kumulierte inhalede virenbeladene Partikelanzahl: $n = \int_0^{t_{Exp}} \dot{V}_{Einatmung} \cdot c(t) dt$
 Kriterium für Infektionsschutz: $n < n_{krit.}$

Untersucher Klassenraum in der Uhlandschule

Übersicht

Uhlandschule	
Raumdaten	
Raumvolumen	210 m ³
Raumfläche	66 m ²
Gesamtöffnungsfläche der Fenster	5,6 m ²
Drehfenster	3,3 m ²
Kippfenster	2,3 m ²
Kippwinkel	17,4°
Luftreiniger	
Hersteller	Trox
Typ	TAP-SPC/L
Volumenstrom	1000~1050 m ³ /h
n _{Sekundär} ¹⁾	5 h ⁻¹



1) Der Sekundärluftwechsel ist eine im Rahmen der Studie entwickelte Kennzahl zur Bewertung eines Luftreinigers für einen bestimmten Raum. Er gibt an, wie groß der Volumenstrom der gefilterten Luft bezogen auf das Gesamtvolumen des Raumes ist.

Messkonzept (1/3)

Varianten für Tracergas-/Testpartikel-Messungen

Beschreibung

Fenster**stoß**lüftung mit Lüftungsintervall 20 min / 5 min / 20 min

Fenster**stoß**lüftung mit Lüftungsintervall 10 min / 2,5 min / 10 min

Dauerlüftung mit Kippfenster

Luftreinigerbetrieb

$\dot{V} = 1000 \dots 1050 \text{ m}^3/\text{h}$

$n_{\text{Sekundär}} = 4,8 \dots 5 \text{ h}^{-1}$

Uhlandschule

Messkonzept (2/3)

Stoffausbreitung im Raum (Tracergas und Testaerosol)

Tracergas (Schwefelhexafluorid (SF₆))

Vorteile:

- nicht vorkommend in der Natur
- Sehr präzise Messung
- Einfache Auswertung

Nachteile:

- Ein Luftreiniger kann keine Gase filtern
- Messprinzip nicht geeignet für den Wirksamkeitsnachweis von Luftreinigern

Einsatz:

Ideal geeignet zur Identifikation der Wirkung einer Fensterlüftung oder einer Lüftungsanlage im Hinblick auf eine Infektionswahrscheinlichkeit

Testaerosol (Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat, DEHS)

Vorteile:

- Wirkung des Luftreinigers kann unmittelbar in den Messdaten erkannt werden.
- Auswertung kann auf Größenklassen der Partikel spezifiziert werden

Nachteile:

- Es kommen reichlich Feinstäube in der Natur vor, welche Messungen verfälschen oder unbrauchbar machen können.

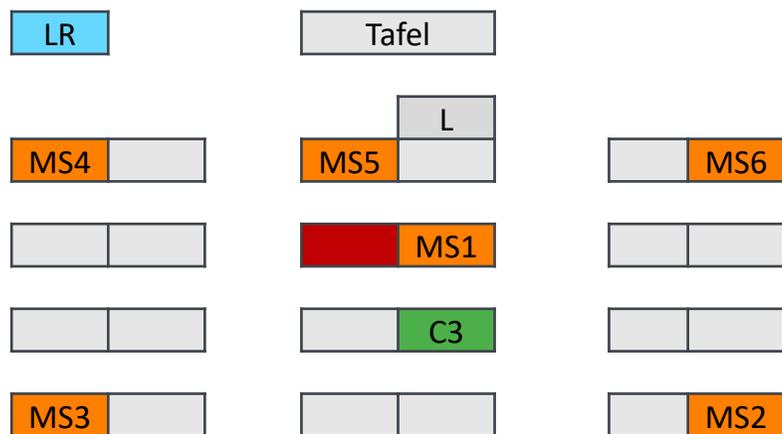
Einsatz:

Ideal geeignet zur Identifikation der Wirkung eines Luftreinigers im Hinblick auf eine Infektionswahrscheinlichkeit

➤ **Beide Stoffe werden nie in Anwesenheit von Schülern freigesetzt!**

Messkonzept (3/3)

Messstellenanordnung

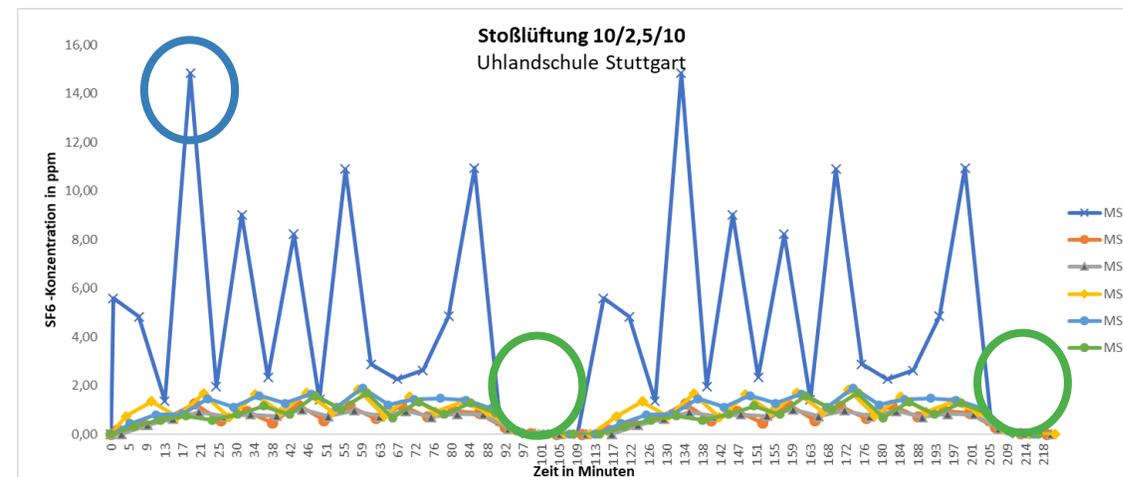
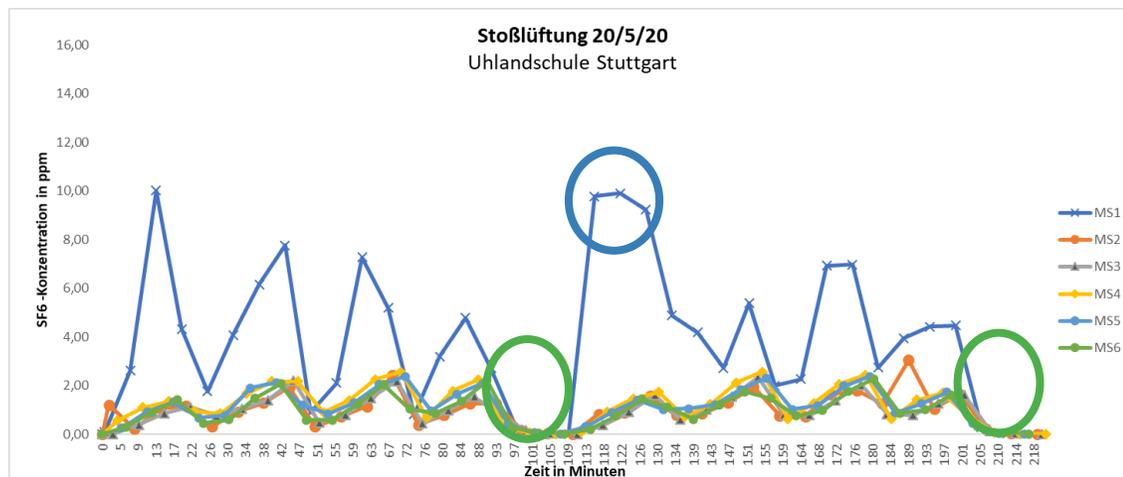


- LR Trox TAP-SPC/L/1000m³/h
- SF6/DEHS-Freisetzung
- SF6 und OPC-Messstellen 1-6
- ... belegte Plätze, L = Lehrer
- ... nicht belegte Plätze
- 1 Tisch
- SMPS/Frog/DiscMini Messstellen



Auswertung (1/7)

Vergleich Tracergas-Konzentrationsverlauf bei Fensterlüftung



Die vorliegende Tracergas-Konzentration kann mittels Stoßlüftung in der Pause zwischen zwei Schulstunden abgeführt werden.

Der direkte Nachbar zur infizierten Person ist bei der Fensterlüftung dem höchsten Risiko ausgesetzt.

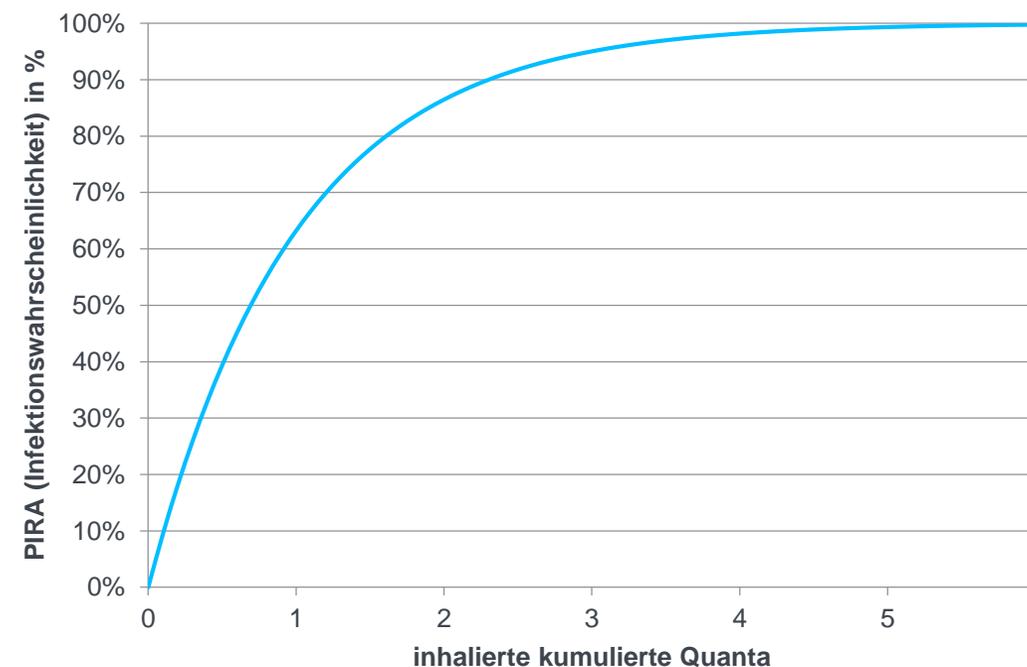
Zwischenfazit

- Das Lüften in den Pausen zwischen den Doppelstunden ist zwingend erforderlich, um die Ausgangsbedingungen für den darauffolgenden Unterricht wieder nahezu herzustellen!

Auswertung (2/7)

Ansatz zur Infektionsbeurteilung

- Nach Wells et al. und Riley et al. erfolgt die Infektionsbeurteilung nach dem Prinzip, dass eine bestimmte Menge eingeatmeter Viren mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zu einer Infektion führt.
- 1 Quanta (Q) ist die Menge an eingeatmeten Viren, die zu 63,2% zu einer Infektion führen.
- Für eine infektiöse Person ist die Quanta-Emissionsrate (q) (beruhend auf der Basisreproduktionszahl) bei SARS-CoV-2 (R-Wert=3,35) bei **139 1/h bzw. 0,0386 1/s.** (Mutationen werden höher geschätzt)
- Das tatsächliche Infektionsrisiko **PIRA (Predicted infection risk via aerosols)** steigt exponentiell und berechnet sich mit folgender Formel: $PIRA = 1 - e^{-Q}$

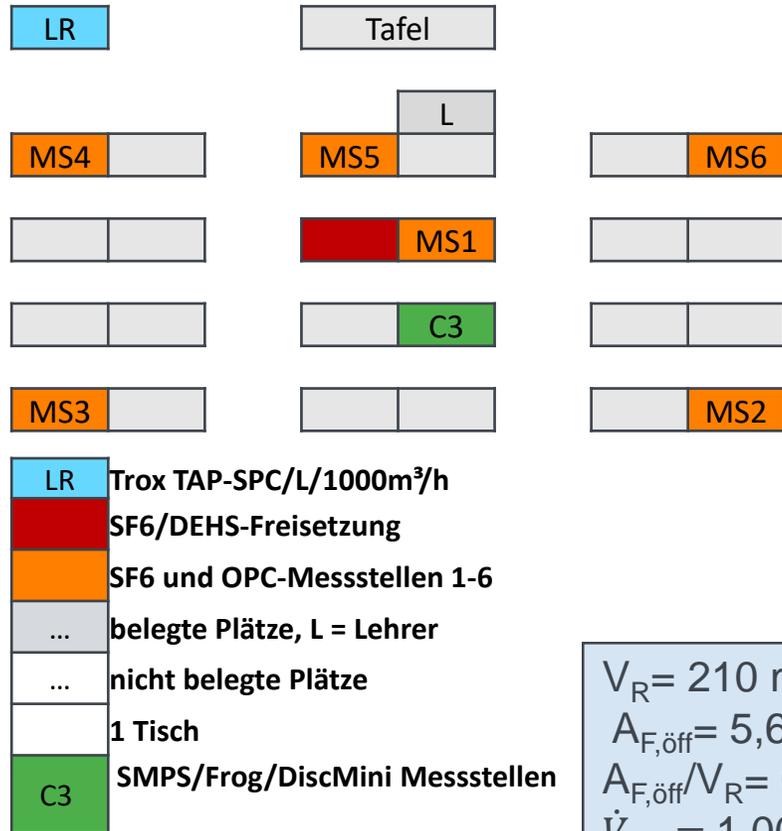


Auswertung (3/7)

Stoffliche Exposition über eine Doppelstunde



Messstellenanordnung



$$\begin{aligned}
 V_R &= 210 \text{ m}^3 \\
 A_{F,\text{öff}} &= 5,6 \text{ m}^2 \\
 A_{F,\text{öff}}/V_R &= 0,026 \text{ 1/m} \\
 \dot{V}_{LR} &= 1.000 \text{ m}^3/\text{h}
 \end{aligned}$$

Mess- stelle	Stoßlüftung 20/5/20		Stoßlüftung 10/2,5/10		Dauerlüftung Kippfenster		Betrieb Luftreiniger	
	Inhalierte kumulierte Quanta (Q)	PIRA in %						
MS 1	0,39	32	0,47	37	0,44	35	-	-
MS 2	0,12	11	0,10	9	0,08	8	-	-
MS 3	0,10	9	0,07	7	0,05	5	-	-
MS 4	0,15	14	0,12	11	0,07	7	-	-
MS 5	0,14	13	0,12	11	0,08	7	-	-
MS 6	0,11	10	0,10	9	0,08	8	-	-
C3 Frog	-	-	-	-	-	-	0,08	7

$$PIRA = 1 - e^{-Q}$$

➤ Je geringer die Zahl, desto geringer das Infektionsrisiko auf diesem Platz

$n_{\text{Sekundär}}$ = Sekundärluftwechsel

Zwischenfazit

- Die Stoßlüftung mit 10/2,5/10 ist geeigneter als 20/5/20. Die Dauerlüftung erzielt die besten Ergebnisse.
 - Eine Verkürzung des Lüftungsintervalls wirkt sich positiv aus.
- Der Luftreiniger erzeugt eine gute Durchmischung der Luft im Raum
 - Der Aufstellort ist als zweitrangig anzusehen.
- Wirksamkeit des Luftreinigers mit $n_{\text{Sekundär}} = 5,0 \text{ h}^{-1}$ auf gleichem Niveau wie Fensterlüftung.

Hinweise:

- Raumlufthqualität hinsichtlich CO₂ und Feuchte kann durch den Luftreiniger nicht beeinflusst werden!
- Behaglichkeitskriterien (Zugluftrisiko, Akustik) noch nicht berücksichtigt!

Auswertung (4/7)

Behaglichkeit und Schall

Behaglichkeit

Messgrößen:

- **Lufttemperatur**
- **Luftgeschwindigkeit**

Messpositionen:

- Messraster (Schachbrettmuster)
- jeweils auf 4 verschiedenen Höhen

Schall

Messgrößen:

- **Schalldruckpegel** in dB (A)

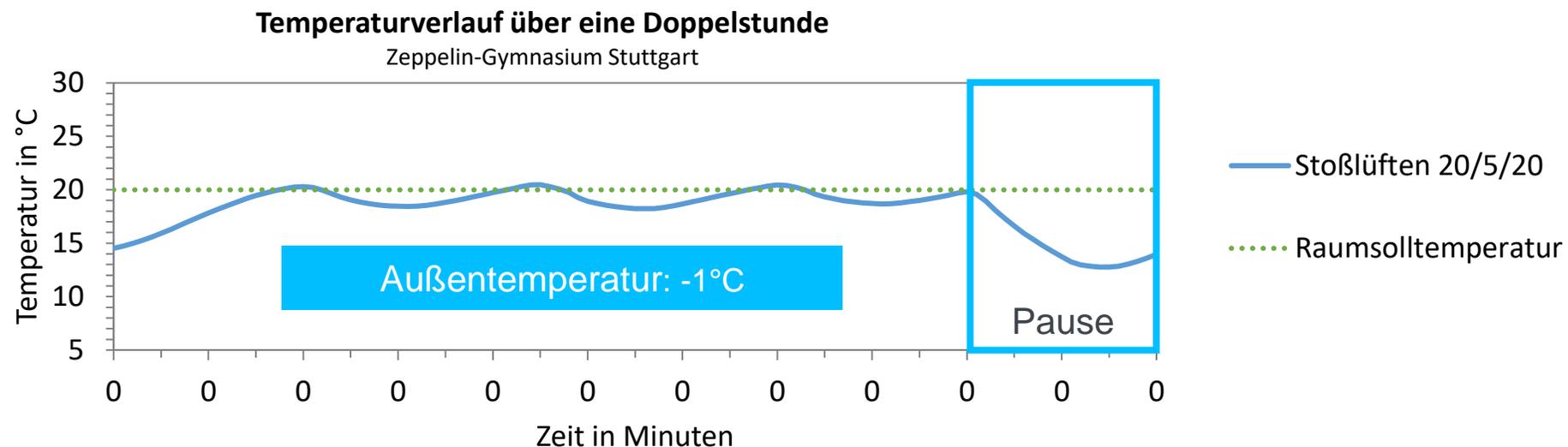
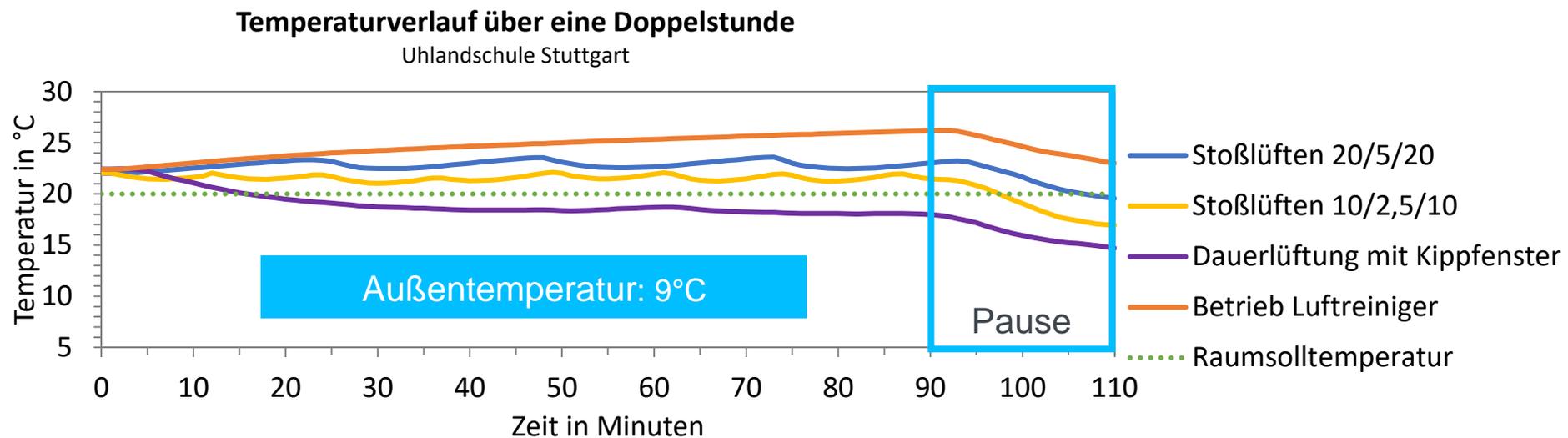
Messpositionen:

- Messraster (Schachbrettmuster)
- Auf Höhe 1,1 m

Luftfeuchtemessungen wurden nicht durchgeführt, da keine Feuchtequellen (Schüler) anwesend.

Auswertung (5/7)

Behaglichkeit - Temperaturen

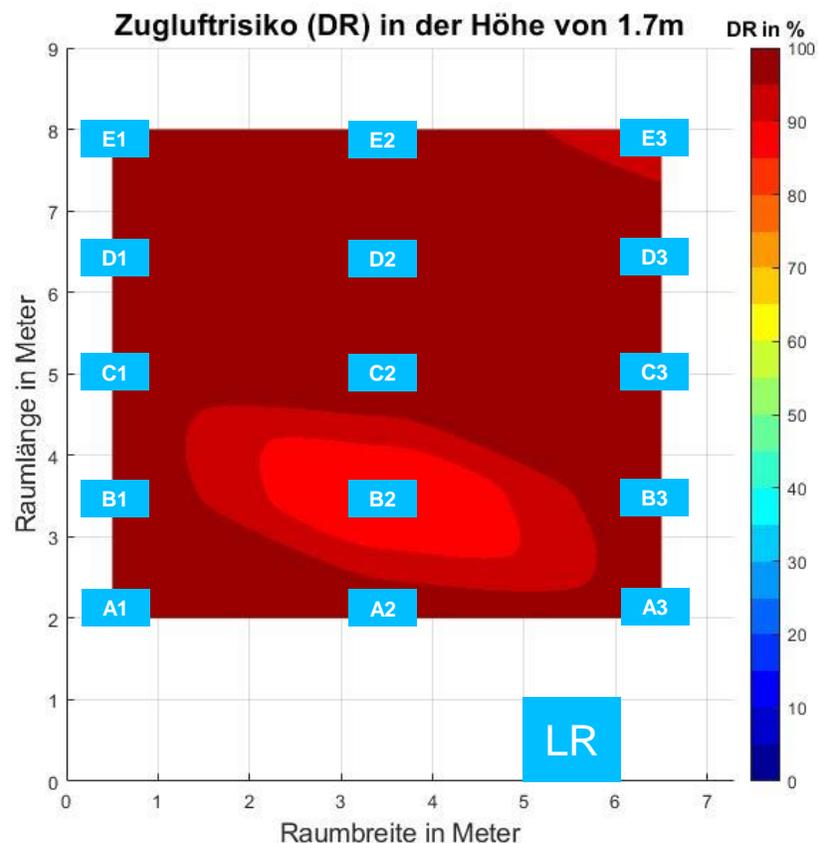


Zwischenfazit

- Die Raumtemperatur nimmt bei den vorliegenden Außentemperaturen durch die Fensterlüftung nur leicht ab.

Auswertung (6/7)

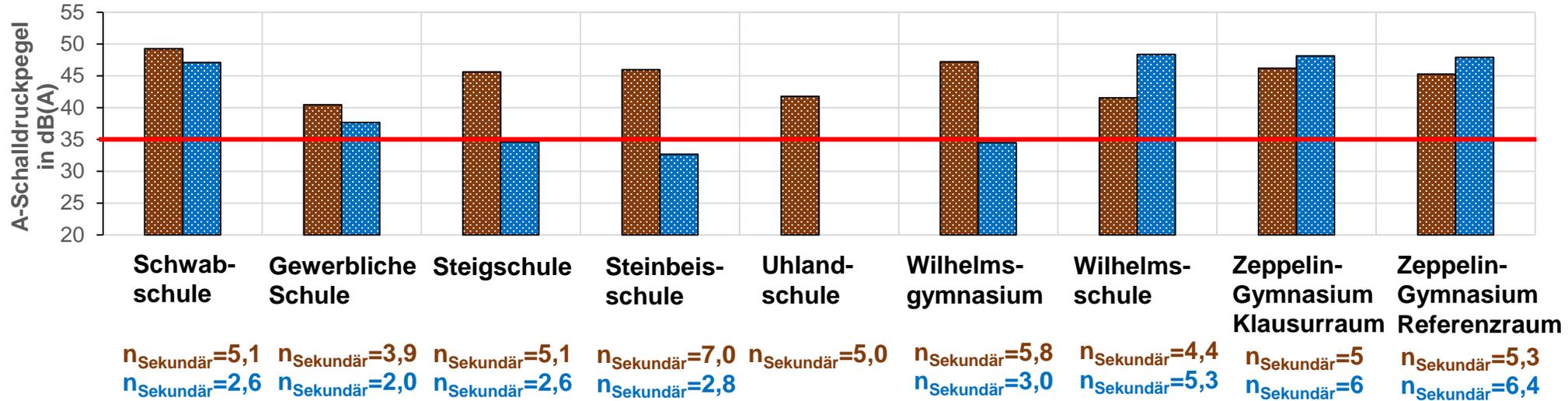
Behaglichkeit - Luftgeschwindigkeiten



Bei einem Betrieb des Luftreinigers bei einem Volumenstrom von 1000...1050 m³/h ($n_{\text{Sekundär}} = 4,8\sim 5,0 \text{ h}^{-1}$) ist in allen vier Messhöhen das Zugluftrisiko (oft erheblich) größer als 30%.

→ Behaglichkeitskriterien sind nicht erfüllt.

Akustik



V1: Versuchsreihe 1 (StandardEinstellung)

V2: Versuchsreihe 2 (Variation der Leistungsstufe/ Geräteanzahl, der durch direkten Nutzereingriff am Gerät möglich wäre)

  **V1-max/ V2-max: lokaler Maximalwert des gemessenen A-Schalldruckpegel**

 **Schalldruckpegelgrenzwert von 35 dB(A)**

n_{Sekundär} = Sekundärluftwechsel

➤ Bei einem Betrieb des Luftreinigers bei n_{Sekundär} = 4...6 kann der Grenzwert von 35 dB(A) (Schalldruckpegel) nicht einhalten. Bei einem n_{Sekundär} = 2...3 kann dieser vereinzelt eingehalten werden.

- Der Luftaustausch ist eine sehr geeignete, einfach umzusetzende und kostengünstige Maßnahme um Aerosolkonzentrationen im Raum zu verringern.
- Die vermessenen Luftreiniger haben bei hohen Luftströmen, die für eine schnelle Abscheidung notwendig sind, zu hohe Schallemissionen und Luftgeschwindigkeiten (Zugerscheinung).
- Nachhaltige Lösung (mittelfristig umzusetzen) sind RLT-Anlagen mit Wärmerückgewinnung zur Sicherstellung der Innenraumluftqualität (CO₂, Feuchte, ...) und Energieeinsparung
- Luftreiniger können eine Übergangslösung sein, abhängig von den Rahmenbedingungen:
 - Natürliche Lüftungsmöglichkeiten unzureichend gegeben
 - Nutzungsintensität (Schülerzahl und Unterrichtsart)
- **Eine pauschale Beschaffung von Geräten ist aufgrund der bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnissen nicht zwingend erforderlich. In Einzelfällen aber begründbar.**

Betriebssicherheit

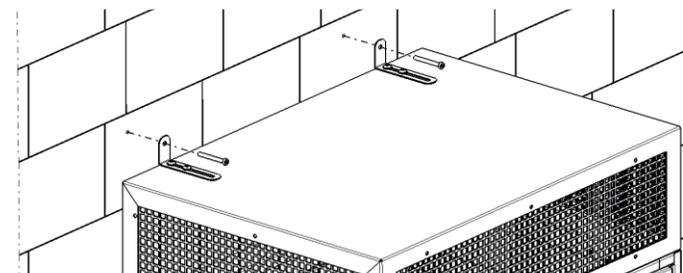
Übersicht

Montage

- Kippsicherung sicherstellen.
- **Andernfalls besteht die Gefahr eines Umkippens.**

Elektrische Sicherheitshinweise

- Sicherstellen, dass Netzspannung, Frequenz und Stromstärke den Angaben in den technischen Daten des Geräts entsprechen.
- **Andernfalls besteht die Gefahr eines Stromschlags oder Brands.**
- Netzkabel nicht über scharfe Metallkanten verlegen. Keine Gegenstände auf das Netzkabel stellen.
- **Andernfalls besteht die Gefahr eines Stromschlags oder Brands.**
- Türen vor der Inbetriebnahme fest verschließen (Gerätedichtheit).



Wartung

Übersicht

Filterprüfung - Filterstandzeiten – Filterwechsel

Gemäß VDI 6022 – Blatt 1 sind Luftfilter regelmäßig auf unzulässige Verschmutzung und Beschädigung (Leckagen) und auf Gerüche zu überprüfen.

- Erstellung eines Filter - Wartungsprotokoll
- Filterlagerung

Ersatzfilter müssen trocken, sauber und am besten in der Originalverpackung gelagert werden. Eine Beschädigung, Verschmutzung oder Durchfeuchtung bei der Lagerung ist auszuschließen.

- Beim Filterwechsel ist persönliche Schutzausrüstung (PSA) zu tragen.

Tätigkeit	Gegebenenfalls Maßnahme	3 Monate	6 Monate	12 Monate	24 Monate
Prüfung auf unzulässige Verschmutzung, Beschädigung (Leckagen), Gerüche	Betroffenen Luftfilter austauschen	X			
*Differenzdruck prüfen	Betroffenen Luftfilter austauschen		X		
Spätester Filterwechsel 1. Filterstufe	Betroffenen Luftfilter austauschen			X	
Spätester Filterwechsel 2. Filterstufe	Betroffenen Luftfilter austauschen				X

Quelle: VDI 6022



Schutzkleidung



Schutzhandschuhe



Mund-/Nasenschutz



Schutzbrille

Quelle: WOLF GmbH

- Andernfalls besteht die Gefahr das verschmutzte Filter allergische Reaktionen an Haut, Augen und Atemorganen durch den Kontakt mit Filterstäuben auslösen können.

- Vortrag ist nur eine erste Momentaufnahme am Beispiel der Uhlandschule, die nicht für alle Schulen repräsentativ ist. Z.B. offenbare Fensterfläche, unterschiedliche Raumgeometrien, unterschiedliche Raumluftreiniger.
- Es finden weitere Messungen und Auswertungen statt.
- Ende Mai wird ein umfassender Abschlussbericht vorgelegt. Bestandteil ist eine konkrete Handlungsempfehlung zur Geräteauswahl für die begründbaren Einsatzorte.



Universität Stuttgart

Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit Fragen?



Prof. Dr.-Ing Konstantinos Stergiaropoulos

E-Mail Konstantinos.stergiaropoulos@igte.uni-stuttgart.de

Telefon +49 (0) 711 685 - 62084

www.igte.uni-stuttgart.de

Universität Stuttgart

Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung

70550 Stuttgart

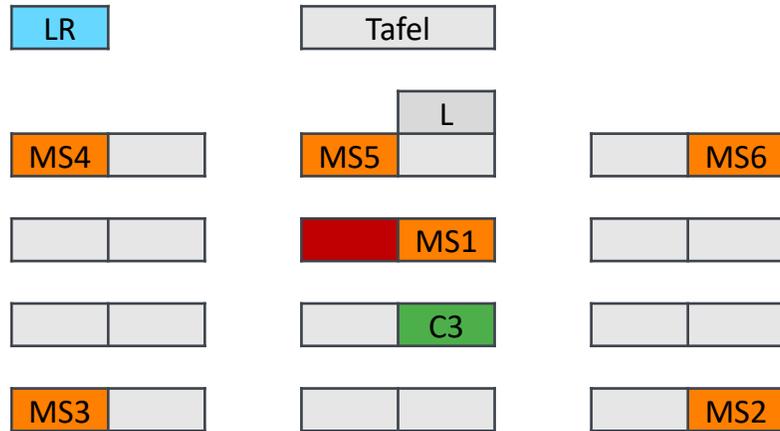


Back Up

Auswertung (3/7)

Stoffliche Exposition über eine Doppelstunde

Messstellenanordnung



- LR Trox TAP-SPC/L/1000m³/h
- MS1 SF6/DEHS-Freisetzung
- MS2-6 SF6 und OPC-Messstellen 1-6
- L belegte Plätze, L = Lehrer
- ... nicht belegte Plätze
- Tisch 1 Tisch
- C3 SMPS/Frog/DiscMini Messstellen

$$\begin{aligned}
 V_R &= 210 \text{ m}^3 \\
 A_{F, \text{öff}} &= 5,6 \text{ m}^2 \\
 A_{F, \text{öff}}/V_R &= 0,026 \text{ 1/m} \\
 \dot{V} &= 1000 \text{ m}^3/\text{h}
 \end{aligned}$$

Mess- stelle	Stoßlüftung 20/5/20		Stoßlüftung 10/2,5/10		Dauerlüftung Kippfenster		Betrieb Luftreiniger	
	SF ₆ in s ⁻¹)	PIRA in %	SF ₆ in s ⁻¹)	PIRA in %	SF ₆ in s ⁻¹)	PIRA in %	DEHS in s ⁻¹)	PIRA in %
-								
MS 1	10,1	32	12,1	37	11,3	35	0,9	3
MS 2	3,0	11	2,6	9	2,2	8	0,8	3
MS 3	2,5	9	1,8	7	1,3	5	0,9	3
MS 4	3,8	14	3,0	11	1,9	7	1,4	5
MS 5	3,5	13	3,2	11	2,0	7	0,7	3
MS 6	2,8	10	2,6	9	2,1	8	0,9	3
C3 Frog	-	-	-	-	-	-	2,0	7

$$1) \frac{1}{c_{Em, SF6/DEHS}} \cdot \int_0^{5400s} c_{Im, SF6/DEHS}(t) dt \text{ in s}$$

$$PIRA = 1 - e^{-Q}$$

➤ Je geringer die Zahl, desto geringer das Infektionsrisiko auf diesem Platz

$n_{\text{Sekundär}}$ = Sekundärluftwechsel

Pira in %	Uhlandschule																
	Stoßlüftung 20/5/20				Stoßlüftung 10/2,5/10				Dauerlüftung mit Kippfenster				Betrieb Luftreiniger (SekLW = 5,0h ⁻¹)				
Anzahl an Doppelstunden (90min)	1x	2x	3x	4x	1x	2x	3x	4x	1x	2x	3x	4x	1x	2x	3x	4x	
MS 1	32	54	69	79	37	61	75	85	35	58	73	82	3	7	10	13	
MS 2	11	21	30	37	9	18	26	33	8	16	22	29	3	6	9	12	
MS 3	9	17	25	32	7	13	19	24	5	9	14	18	3	7	10	13	
MS 4	14	25	36	44	11	21	30	37	7	13	19	25	5	10	15	19	
MS 5	13	24	33	42	11	22	31	39	7	14	20	26	3	5	8	10	
MS 6	10	20	28	36	9	18	26	33	8	15	21	27	3	7	10	13	
C3 Frog	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	14	21	27

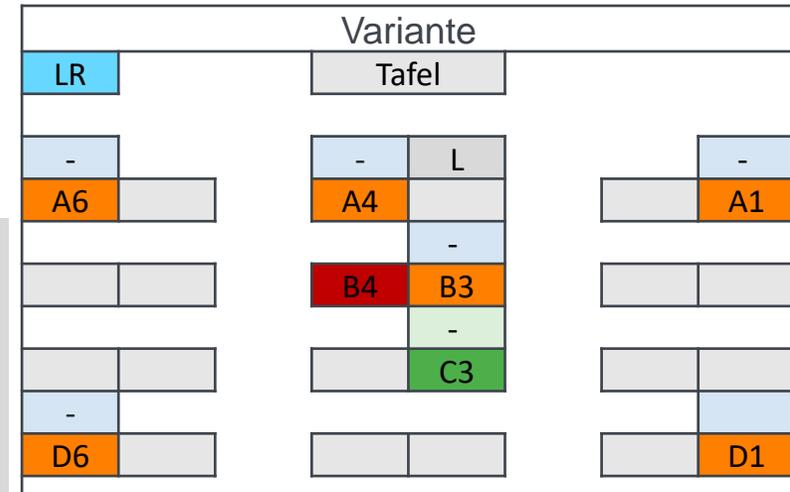
Auswertung am Beispiel der Uhlandschule (3/6)

Stoffliche Exposition einer Doppelstunde (90 Minuten) – Ansatz 1



Messstelle	Zuordnung	Stoßlüftung 20/5/20	Dauerlüftung (Kippfenster)	Stoßlüftung 10/2,5/10	Betrieb Luftreiniger
-	-	$\frac{1}{c_{Em, DEHS/SF6}} \cdot \int_0^{90} c_{Im, DEHS/SF6}(t) dt [s]$			
MS 1	B3	10	11	12	12
MS 2	D1	3	2	3	11
MS 3	D6	2	1	2	10
MS 4	A6	4	2	3	11
MS 5	A4	4	2	3	10
MS 6	A1	3	2	3	11
MS Frog	C3				2

Die grauen Zahlen sind Spurengasergebnisse und zeigen nicht auf wie wirksam die Reinigung der Luft ist sondern lediglich, wie gleichmäßig der



Emittierter **virusenthaltener** Partikelstrom nach Hartmann et al., Stadnytskyi et al. und Chia et al.:

$$\dot{n}_{Em,P} = 12.700 \frac{1}{h} = 3,53 \frac{1}{s}$$

Imitierte kumulierte Virenanzahl für Nachbarn (B3) nach 90 Minuten:

$$n_{Im,lgt.Viren} = 12s \cdot 3,53 \frac{1}{s} = 42$$

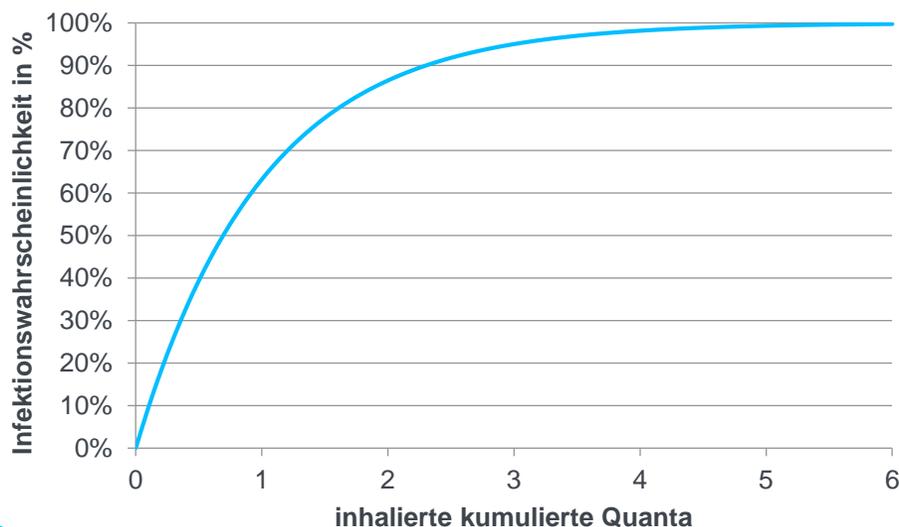
Nach Prentiss et al. erfolgt eine Infektion bei **300 - 2000** eingeatmeten Viren.

Je geringer die Zahl desto geringer das Infektionsrisiko auf diesem Platz

Auswertung am Beispiel der Uhlandschule (3/6)

Stoffliche Exposition einer Doppelstunde (90 Minuten) – Ansatz 2

- Nach Wells et al. und Riley et al. erfolgt die Infektionsbeurteilung nach dem Prinzip, dass eine bestimmte Menge eingeatmter Viren mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zu einer Infektion führen
- Der Ausstoß dieser sogenannten Quanta (Q - Menge an eingeatmeten Viren die zu 63,2% zu einer Infektion führen) beruht auf der Basisreproduktionszahl. In unserem Fall (R-Wert=3,35) bei 139 1/h oder **0,0386 1/s**
- Das tatsächliche Infektionsrisiko PIRA (Predicted infection risk via aerosols) steigt exponentiell und berechnet sich mit folgender Formel: $PIRA = 1 - e^{-q}$



Quantaemissionsrate die eine Person nach Kriegel et al. an die Raumluft abgibt

$$q = 139 \frac{1}{h} = 0,0386 \frac{1}{s}$$

Infektionsrisiko für Nachbarn (B3)

$$PIRA = 1 - e^{-12s \cdot 0,0386 \frac{1}{s}} = 37\%$$

Der direkte Nachbar infiziert sich demnach mit einer Wahrscheinlichkeit von 37%.

Auswertung am Beispiel der Uhlandschule (2/6)

Herangehensweise SF6/DEHS

$$n_{Im,lgt.Viren} = \int_0^t \dot{n}_{Im,lgt.Viren} dt = f(\dot{n}_{Em,lgt.Viren}) = \dot{n}_{Em,lgt.Viren} \cdot \frac{1}{C_{Em, DEHS/SF6}} \cdot \int_0^t C_{Im, DEHS/SF6}(t) dt$$



Literatur



Vergleich beider Messprinzipien

$n_{Im,lgt.Viren}$ Kumulierte inhalede Virenanzahl

$\dot{n}_{Im,lgt.Viren}$ Inhaleder Virenstrom

$\dot{n}_{Em,lgt.Viren}$ Exhaleder Virenstrom

$C_{Em, DEHS/SF6}$ Konzentration des freigesetzten Stoffes in einem imaginären Ausatemstrom

$C_{Im, DEHS/SF6}$ Konzentration des Stoffes in einem imaginären Einatemstrom

Hintergrund und Motivation

Zwei Messprinzipien vergleichbar machen

$$\dot{n}_{Im,lgt.Viren} = f(\dot{n}_{Em,lgt.Viren}) = \frac{\dot{n}_{Im,SF_6}}{\dot{n}_{Em,SF_6}} \cdot \dot{n}_{Em,lgt.Viren}$$

$$\mathbf{n}_{Im,lgt.Viren} = \int_0^t \dot{n}_{Im,lgt.Viren} dt = f(\dot{n}_{Em,lgt.Viren})$$

$$\dot{n}_{Im,lgt.Viren} = f(\dot{n}_{Em,lgt.Viren}) = \frac{\dot{n}_{Im,DEHS}}{\dot{n}_{Em,DEHS}} \cdot \dot{n}_{Em,lgt.Viren} = \frac{\dot{V}_{Inhalation} \cdot c_{Im,DEHS}}{\dot{V}_{Exhalation} \cdot c_{Em,DEHS}} \cdot \dot{n}_{Em,lgt.Viren}$$

$$\mathbf{n}_{Im,lgt.Viren} = \int_0^t \dot{n}_{Im,lgt.Viren} dt = f(\dot{n}_{Em,lgt.Viren}) = \dot{n}_{Em,lgt.Viren} \cdot \frac{1}{c_{Em,DEHS}} \cdot \int_0^t c_{Im,DEHS}(t) dt$$

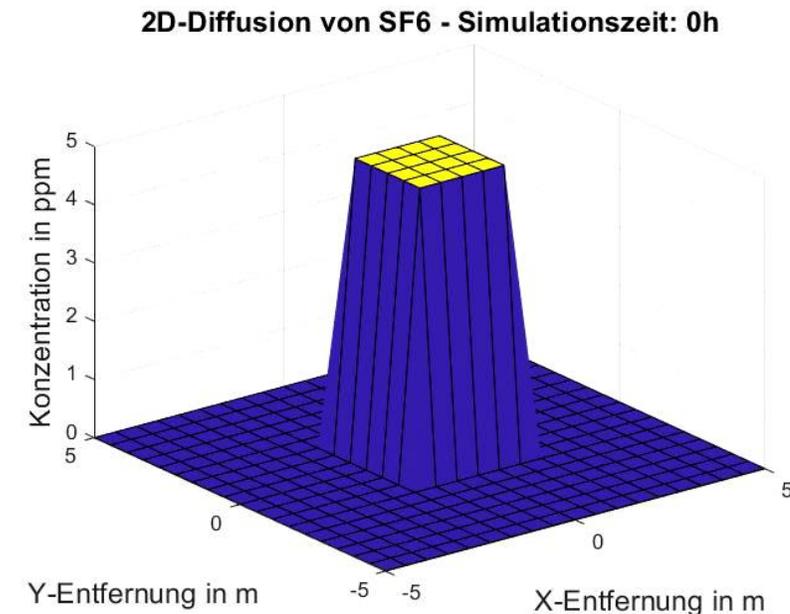
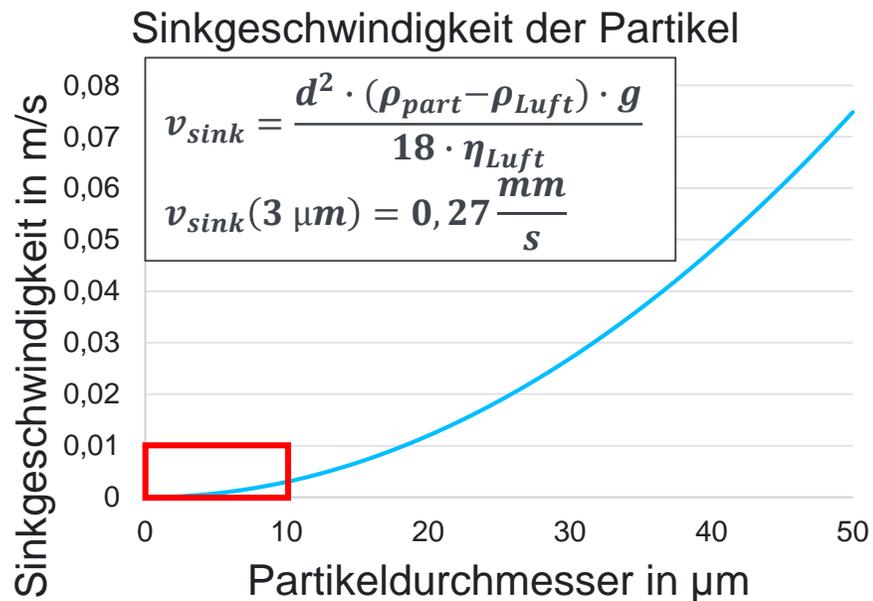
$c_{Im,DEHS}$ = Gesamtanzahlkonzentration (immissionsseitig)

$c_{Em,DEHS}$ = Gesamtanzahlkonzentration (emissionsseitig)

Ziel: $\int_0^t \mathbf{n}_{Im,lgt.Viren} dt$ (via SF6) vs. $\int_0^t \mathbf{n}_{Im,lgt.Viren} dt$ (via DEHS)

Tracergas als Partikel-Äquivalent

Tracergasausbreitung analog zu Partikelausbreitung?



Die Partikelgrößen die vom Menschen emittiert werden können aufgrund niedriger Sinkgeschwindigkeiten als luftgetragen angesehen werden..

Die Diffusion des Tracesgases SF₆ kann als zusätzliche Stofftransportart absolut vernachlässigt werden. SF₆ breitet sich daher wie Partikel konvektiv aus

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).

N. von Hahn, *Lufttechnik in Industriehallen: Zusammenfassung der Vorträge anlässlich des BGIA-Seminars G 3 Technische Schutzmaßnahmen am 16./17. September 2003 in Dresden*. Hannover, Sankt Augustin: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; BGIA, 2005.

Hintergrund und Motivation

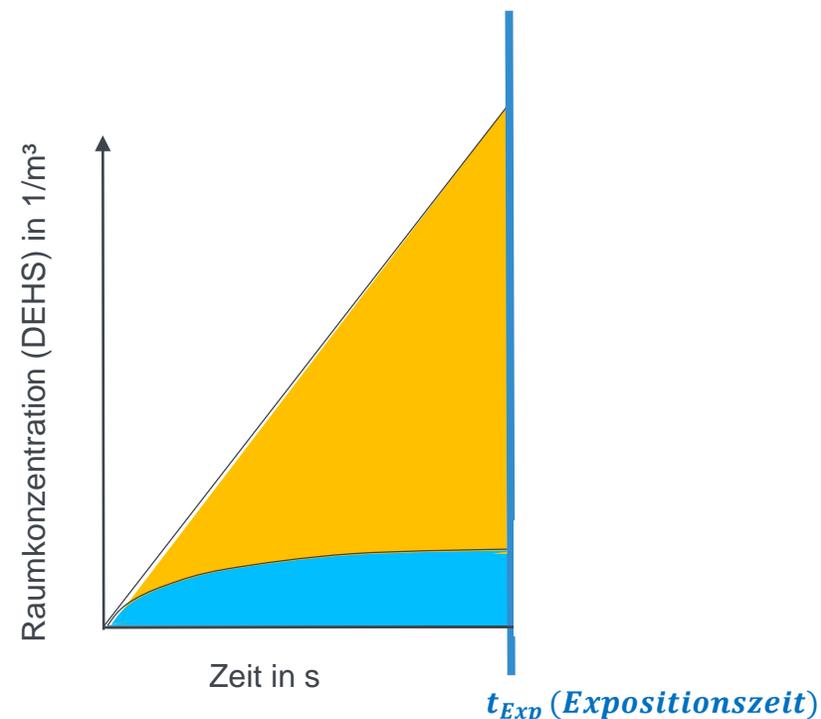
Wirksamkeit von Luftreinigern

$$\frac{n_{\text{Vir,Exp,LR}}}{n_{\text{Vir,Exp,oM}}} = \frac{\int_0^{t_{\text{exp}}} \dot{V}_{\text{Inh}} \cdot \frac{\dot{n}_{\text{Quelle}}}{\dot{V}_{\text{LR}} \cdot \eta} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\dot{V}_{\text{LR}} \cdot \eta}{V_R} \cdot t}\right) dt}{\int_0^{t_{\text{exp}}} \dot{V}_{\text{Inh}} \cdot \frac{\dot{n}_{\text{Quelle}}}{V_R} \cdot t dt} = \frac{t_{\text{exp}} + \frac{V_R}{\dot{V}_{\text{LR}} \cdot \eta} \cdot e^{-\frac{\dot{V}_{\text{LR}} \cdot \eta}{V_R} \cdot t_{\text{exp}}}}{\frac{\dot{V}_{\text{LR}} \cdot \eta}{V_R} \cdot \frac{1}{2} \cdot t_{\text{exp}}^2}$$

Beispiel für ein Raumvolumen von 200m³ Raum, einem Volumenstrom von 1200m³/h und einem Abscheidegrad von 99% für eine vierstündige Expositionszeit:

$$\frac{n_{\text{Vir,Exp,LR}}}{n_{\text{Vir,Exp,oM}}} = \frac{4h + \frac{200 \text{ m}^3}{1200 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 0,99} \cdot e^{-\frac{1200 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 0,99}{200 \text{ m}^3} \cdot 4h}}{\frac{1200 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 0,99}{200 \text{ m}^3} \cdot \frac{1}{2} \cdot (4h)^2} = 8,4\%$$

Durch den Einsatz eines Luftreinigers werden in diesem idealisierten Beispiel nur 8,4% der virenbehafteten Partikel inhaliert, die ohne Maßnahme inhaliert würden.



Messkonzept Behaglichkeit (1/2)

Kriterien

Der Aufenthaltsbereich, in dem die thermische Behaglichkeit bewertet wird, wird vorab definiert.

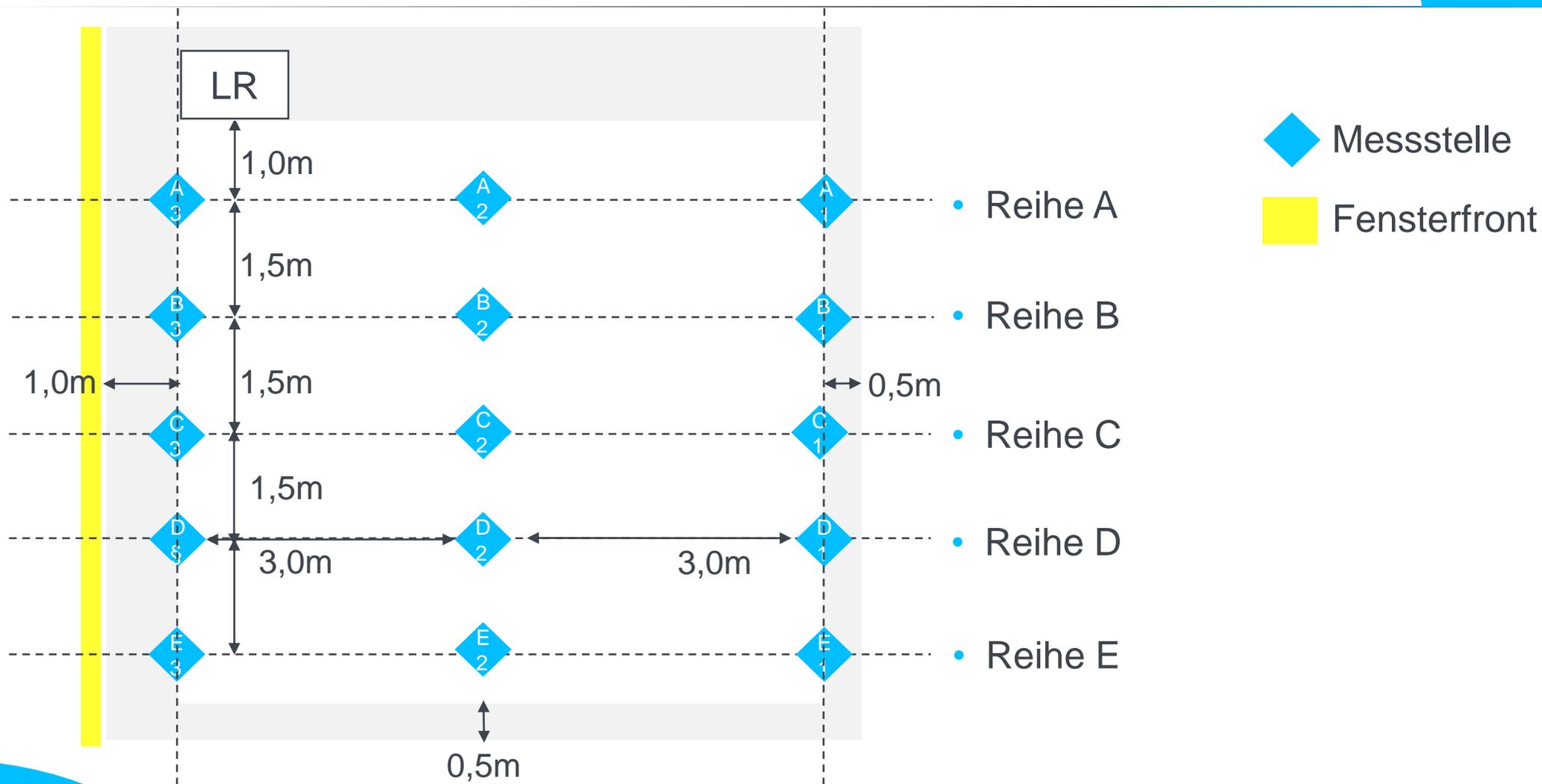
Aufenthaltsbereich-Kriterien	
Oberfläche	Abstand in m
Innenwand	0,5
Fenster	1,0
Luftreiniger	1,0

Die Luftgeschwindigkeiten werden in vier unterschiedlichen Höhen gemessen.

Messung	
Messposition	Höhe in m
MP1	0,1
MP2	0,6
MP3	1,1
MP4	1,7

Messkonzept Behaglichkeit (2/2)

Raster



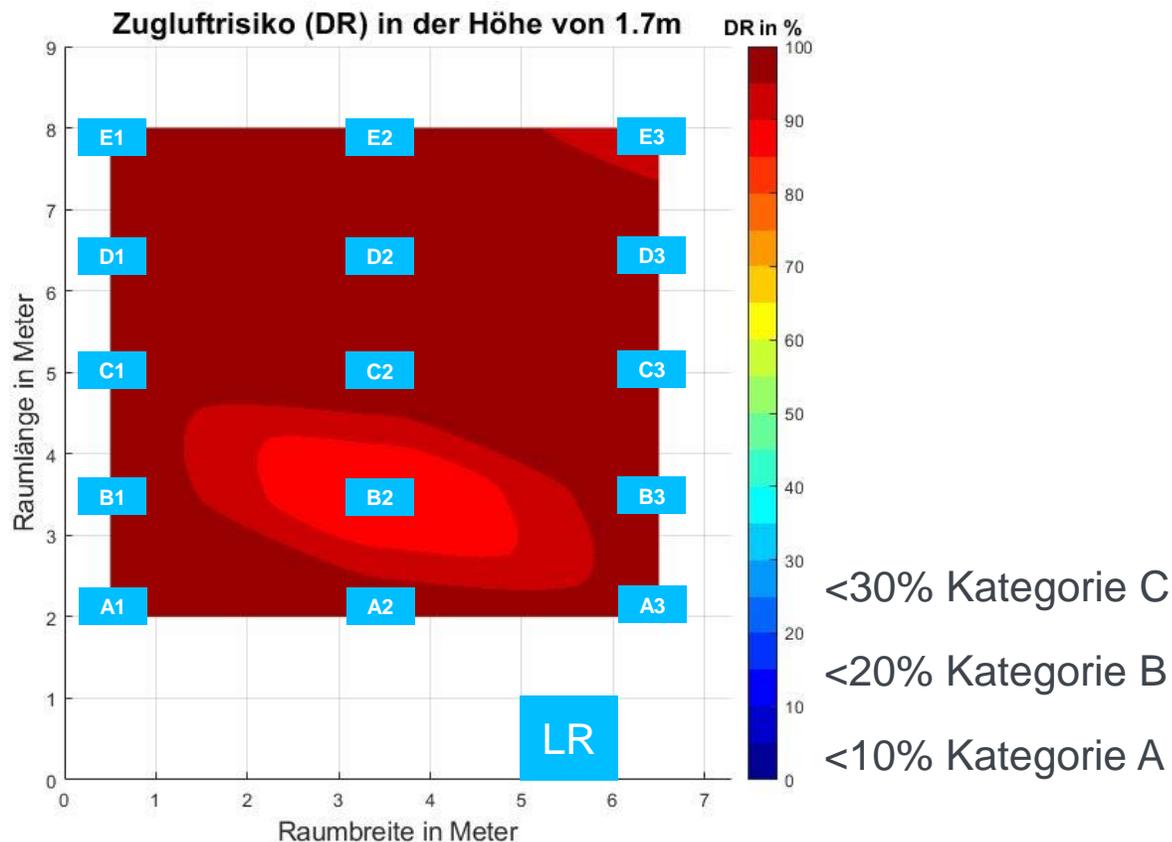
Messkonzept

Aufbau und Sitzplan

Variante	
LR	Tafel
-	- L
A6 A5	A4 A3
B6 B5	B4 B3
C6 C5	C4 C3
D6 D5	D4 D3
LR	Trox AirPurifier TAP-SPC/L/1000m ³ /h
	SF6/DEHS-Freisetzung
	SF6 und OPC-Messstellen 1-6
...	belegte Plätze, L = Lehrer
...	nicht belegte Plätze
	1 Tisch
	SMPS/Frog/DiscMini Messstellen
	SF6 Messwerte
	DEHS Messwert

Auswertung am Beispiel der Uhlandschule (5/6)

Behaglichkeit – Luftgeschwindigkeiten (Zugluftrisiko)



■ Messstelle
 ■ LR Luftreiniger

<30% Kategorie C
 <20% Kategorie B
 <10% Kategorie A

Kategorien des Umgebungsklimas

Kategorie	PPD %	PMV	DR %
A	< 6	- 0,2 < PMV < + 0,2	< 10
B	< 10	- 0,5 < PMV < + 0,5	< 20
C	< 15	- 0,7 < PMV < + 0,7	< 30

Quelle: DIN EN ISO 7730

PPD - predicted percentage of dissatisfied
 Vorhergesagte Prozentuale Unzufriedenheit
 PMV - predicted mean vote
 Vorhergesagte mittlere Stimme
 DR - Draught risk
 - Zugluftrisiko



1.Grundschaall

2.Nachhallzeit

3. Messung im Betrieb mit Luftreiniger

- Für ein mehr oder weniger gleich laufendes Lüftungsgerät bzw. Luftreiniger wäre der $L_{(AF),eq}$, d.h. der **äquivalente Dauerschallpegel mit A-Bewertung** (entsprechend dem menschlichen Gehör) die richtige Messgröße

– 22 – VDI 2081 Blatt 1 / Part 1

Alle Rechte vorbehalten © Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2019

Anteile des Geräuschspektrums ist DIN 45680 Beiblatt 1 zu beachten.

ated from ventilation and air-conditioning systems or their components. For low-frequency components of the noise spectrum, DIN 45680 Supplement 1 shall be observed.

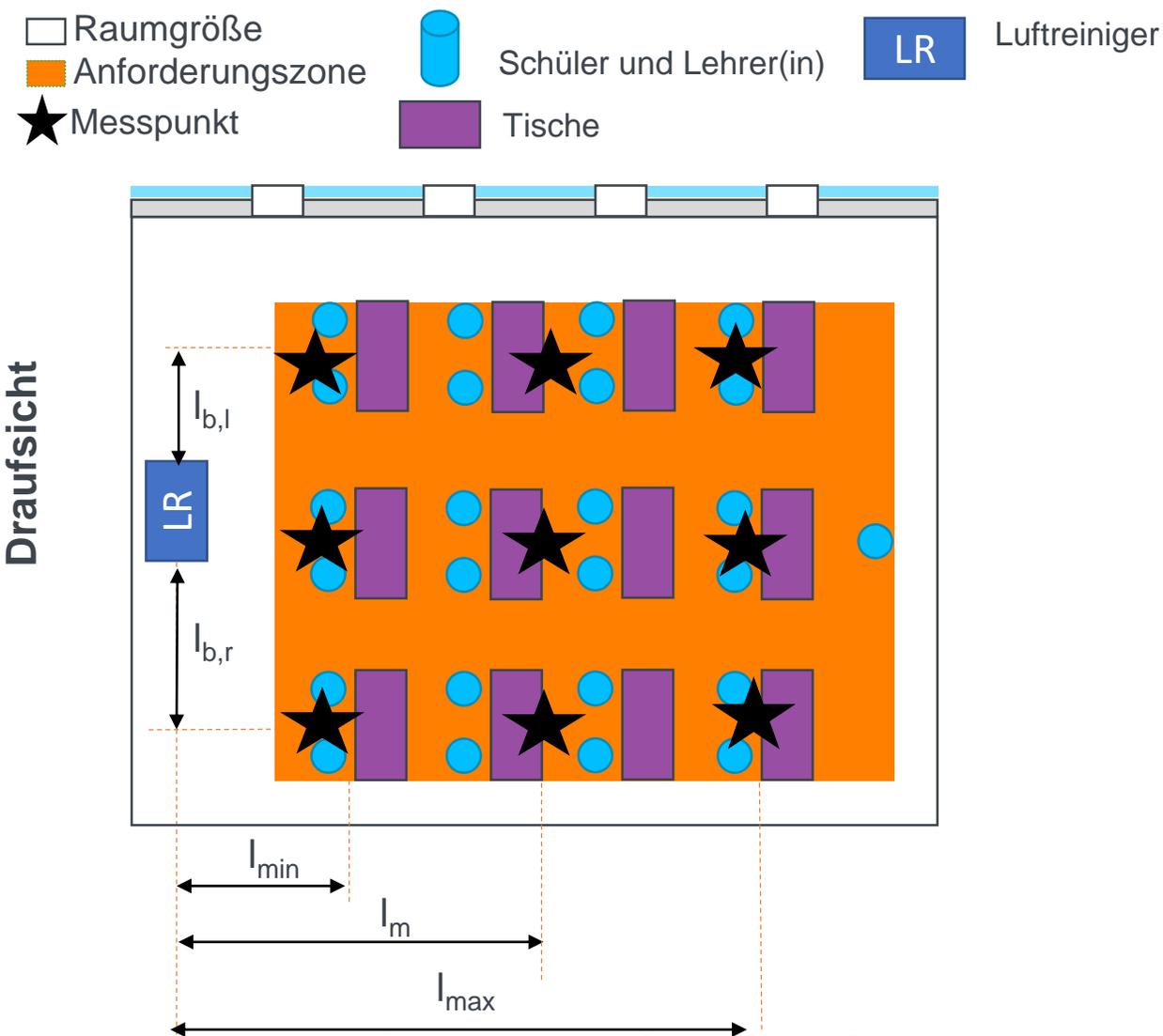
Tabelle 5. Empfehlungen für A-bewertete Schalldruckpegel (L_{pA}) der RLT-Anlagen im Aufenthaltsbereich, ermittelt aus den Oktavmittelfrequenzen von 63 Hz bis 8000 Hz und Anhaltswerte für mittlere Nachhallzeiten

Raumart	Beispiel	A-bewerteter Schalldruckpegel L_{pA} in dB(A) Anforderungen		Richtwert in dB(A) ^{a)}	Mittlere Nachhallzeit in s
		hoch	niedrig		
Arbeitsräume	Einzelbüro	30	35	35	0,5
	Großraumbüro	35	45	45	0,5
	Werkstatt	50	b)	b)	1,5
	Labor	35	52 ^{e)}	50	2,0
Versammlungsräume	Konzertsaal, Opernhaus	25 ^{d)}	30 ^{d)}	b)	1,8
	Theater, Kino	30	35	35	0,8
	Konferenzraum	30	40	35	1,0
Wohnräume	Hotelzimmer	30 ^{d)}	35 ^{d)}	35 ^{d)}	0,5
Sozialräume	Ruheraum, Pausenraum	30	35	35	1,0
	Wasch-, WC-Raum	40	50	45	2,0
Unterrichtsräume	Lesesaal, Bibliothek	30	35	30	1,3
	Klassen-, Seminarraum	30	35	35	0,5
	Hörsaal	30	35	35	1,3

Messkonzept Akustik (2/2)

Messkonzept

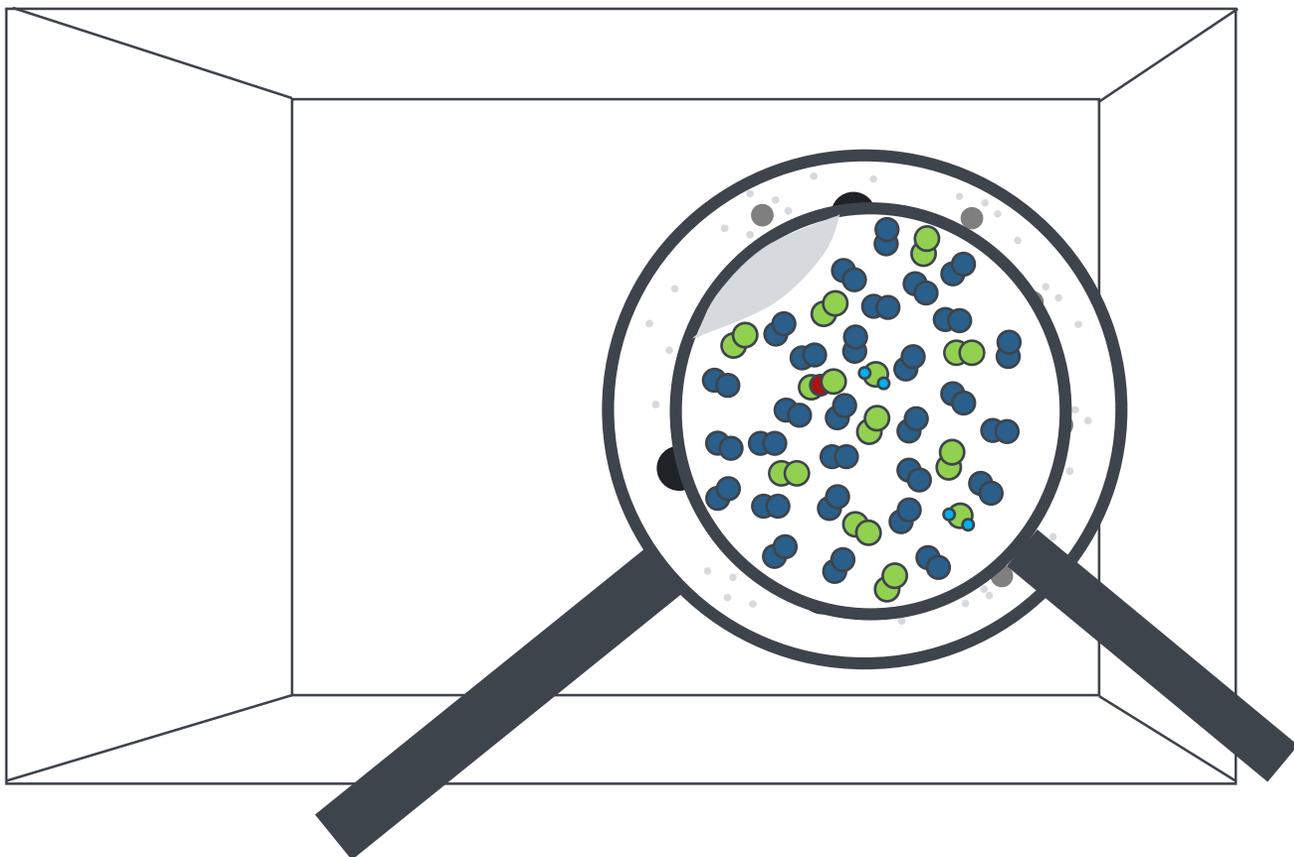
- Messung in einem Raster innerhalb der möglichen Aufenthaltszone
- Raster wird für jeden Klassenraum individuell festgelegt auf Basis der Begehungsdokumente
- Anzahl je nach Anordnung und Raumgröße
- Messung auf einer Höhe von 1,1 m mit Stativ
- 4-9 Messungen im LR-Betrieb + Grundschall und Nachhallzeit des Raums
- Luftreinigerbetrieb erfolgt mit gleicher Leistungsstufe wie bei Strömungsmessungen



Hintergrund und Motivation

Warum lüften?

Zusammensetzung der Luft



WHO Bild (extra Folie)
AHA Regeln