

# Lüftung von Schulräumen - ein „frischer“ Blick von draußen

Thomas Klimach und Frank Helleis



07.07.2021

Frank Helleis, Instrument Development Group, Hahn-Meitner-Weg 1, 55128 Mainz Email: [frank.helleis@mpic.de](mailto:frank.helleis@mpic.de)

- Vorstellung Max-Planck-Institut für Chemie
  - Covid-19 Übertragungsrisiko durch Aerosole in geschlossenen Räumen
  - Lüftung: Lösungen
  - UBA / IRK Vorgaben Lüften von Innenräumen
  - Messungen Stoßlüften
  - Messungen Dauerlüftung
  - Energie- und Stoffbilanzen, Behaglichkeit
  - Messungen Quelläüftung
  - Aerosol Messungen
  - Projektierung und Umsetzung
  - Kritik
-



- 4 Abteilungen, ca. 300 Mitarbeiter:
- Atmosphärenchemie, Klimageochemie, Partikelchemie, Multiphasenchemie

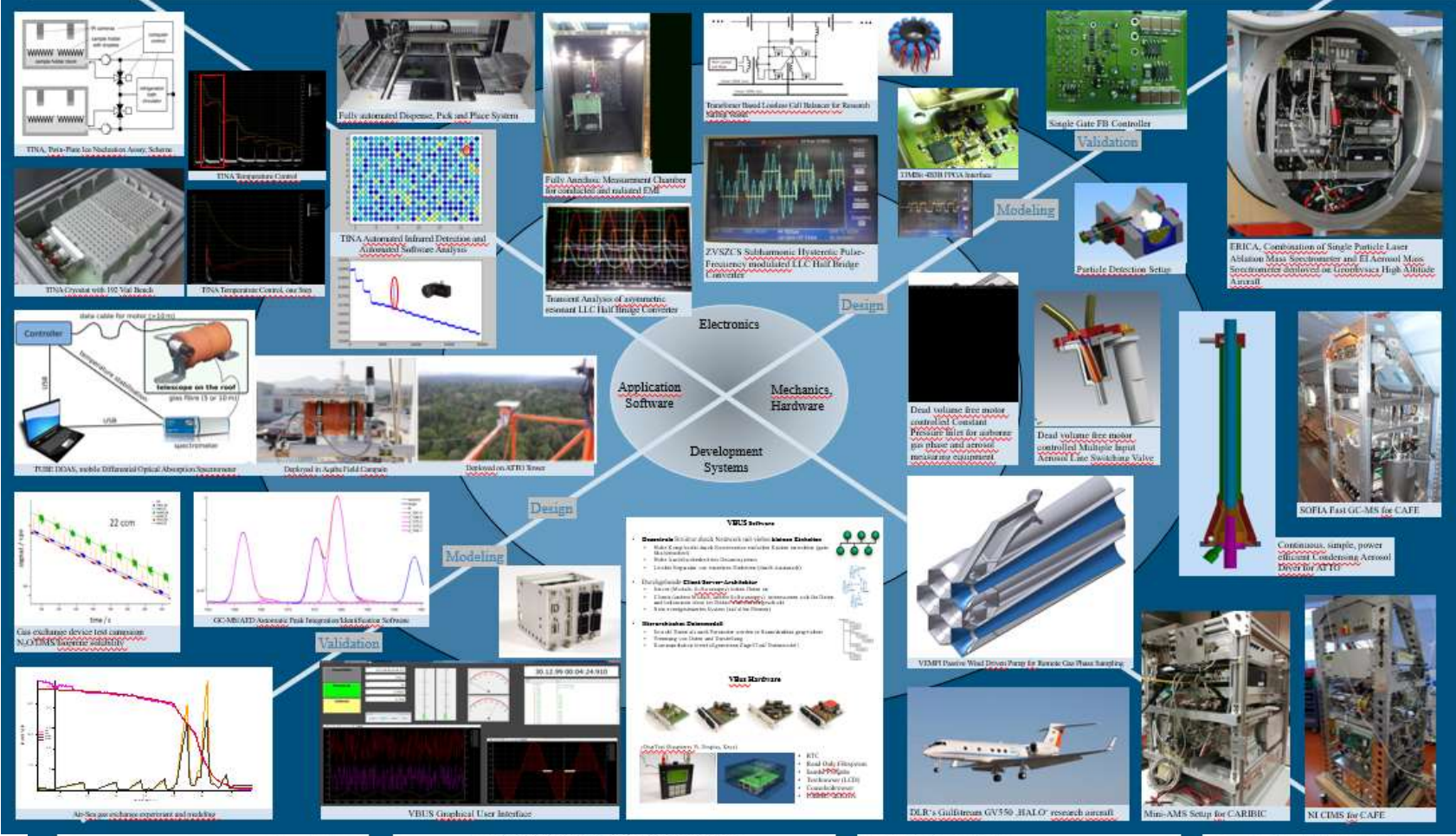


# Franky's playground

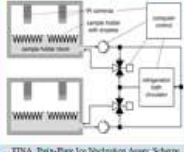
## Selected Projects 2015-2017

### Instrument Development and Electronics Group

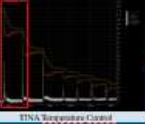
Christian Gurk, Mark Lamneck, Michael Flanz, Berthold Kreuzburg, Stefan Blanckard, Frank Helleis  
 I.M.'s: Thomas Klimach, Florian Rubach




**TINA**, Test-Plan for Teststation Array, Scheme




**TINA** Temperature Control



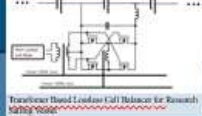
Fully automated Dispense, Pick and Place System




Fully Automated Measurement Cluster for controlled and relaxed EMI




Transformer Based Loadcell Cell Balance for Research




Single Gate FB Controller




Validation



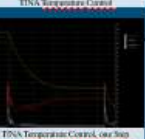
ERICA, Combination of Single Particle Laser Ablation Mass Spectrometer and EI Aerosol Mass Spectrometer deployed on Gerdinesca High Altitude Aircraft



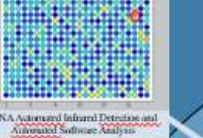
TINA Crystal with 192 Vial Beads



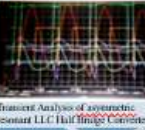
TINA Temperature Control, one Step




TINA Automated Infrared Detection and Automated Software Analysis




Transient Analysis of asymmetric resonant LLC Half-Bridge Converter




ZVS/ZCS Subharmonic Hysteretic Pulse-Frequency modulated LLC Half-Bridge Converter




Modeling




Particle Detection Setup




TOBE-DNAS, mobile Differential Optical Absorption Spectrometer




Deployed in Aquatic Field Campaign




Deployed on ATU3 Bear




Design




Design




Dead volume free motor controlled 3.5 micron Precision filter for airborne gas phase and aerosol measurement equipment



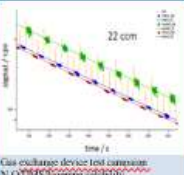
Dead volume free motor controlled Multiple Input Aerosol Line Switching Valve



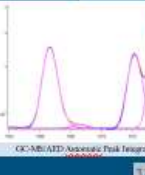
SOFA Fast GC-MS for CAFE



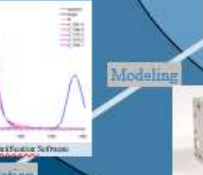
22 cm




GC-MS/MS Aerosol Peak Integration via Fourier Transform



Validation




Validation




VBUS Software

- Hardware Controller based Network with various Address Encodings
- Make it easy to use the Network in various applications
- Make it easy to use the Network in various applications
- Make it easy to use the Network in various applications

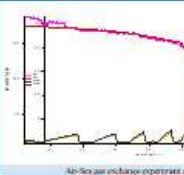
VIMPT Positive Wind Driven Pump for Remote Gas Phase Sampling



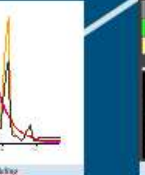
Continuous, simple, power efficient Condensing Aerosol Filter for ATTO




MS-Scan gas exchange experiment and modeling




VBUS Graphical User Interface



Validation




Validation




VBUS Hardware

- ATC
- Real Time Operating System
- Linux/RTOS
- Transformer Isolation
- Connectivity
- Power Supply


DLR's Gerdinesca GV350 'HALO' research aircraft



Mini-AMS Setup for CARIBIC



NI CIMS for CAFE



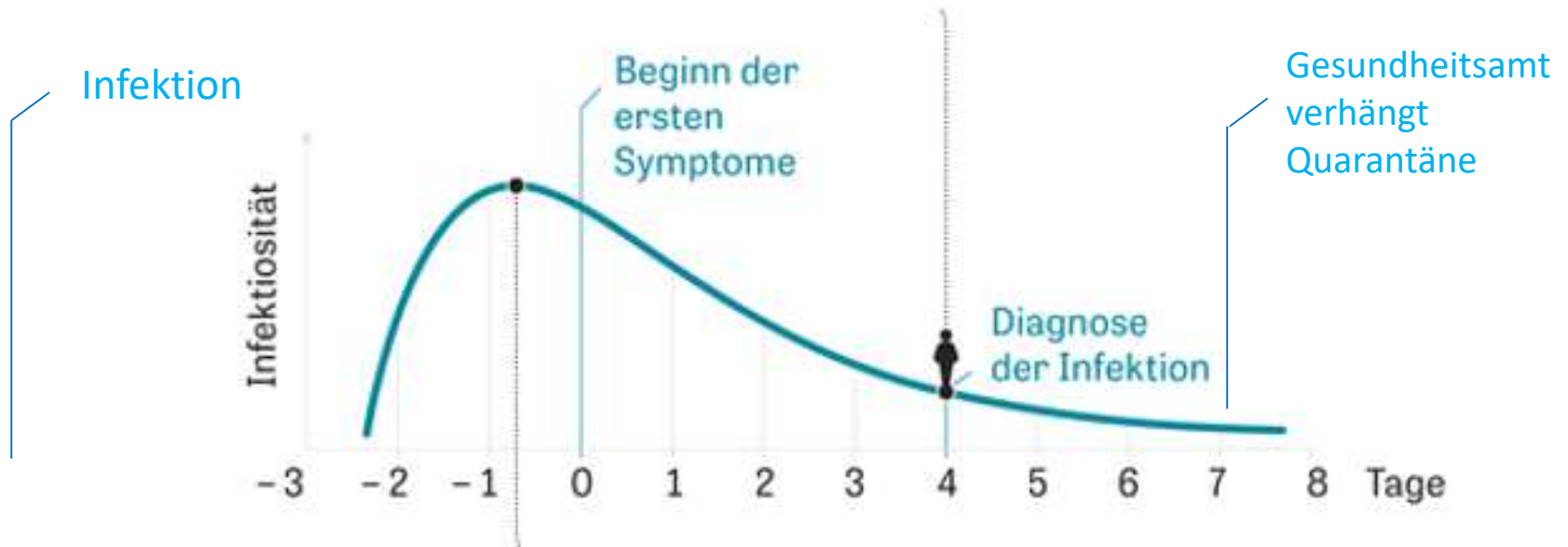
## Übertragungswege:

- direkte Tröpfcheninfektion
- indirekte Infektion durch **Aerosole** (in geschlossenen Räumen)
- Kontaktinfektion (kontaminierte Oberflächen)

## Maßnahmen AHA-L-L:

- **Abstand halten**
- Oberflächen und Hände desinfizieren
- **(Community) Masken** tragen
- Lüften
- Lock down („parametrisch“)

# Wie funktioniert das Virus?



© ZEIT-Grafik/Vorlage: Christian Drosten

## Timing Daten:

- RKI: Inkubationszeit Median 5-6 Tage,
- Manifestationsindex ca. 55-85%
- Drosten: serielles Intervall ca. 5.2 Tage
- Typische Meldeverzögerung ca. 3 Tage
- Virion Größe: 100-150nm

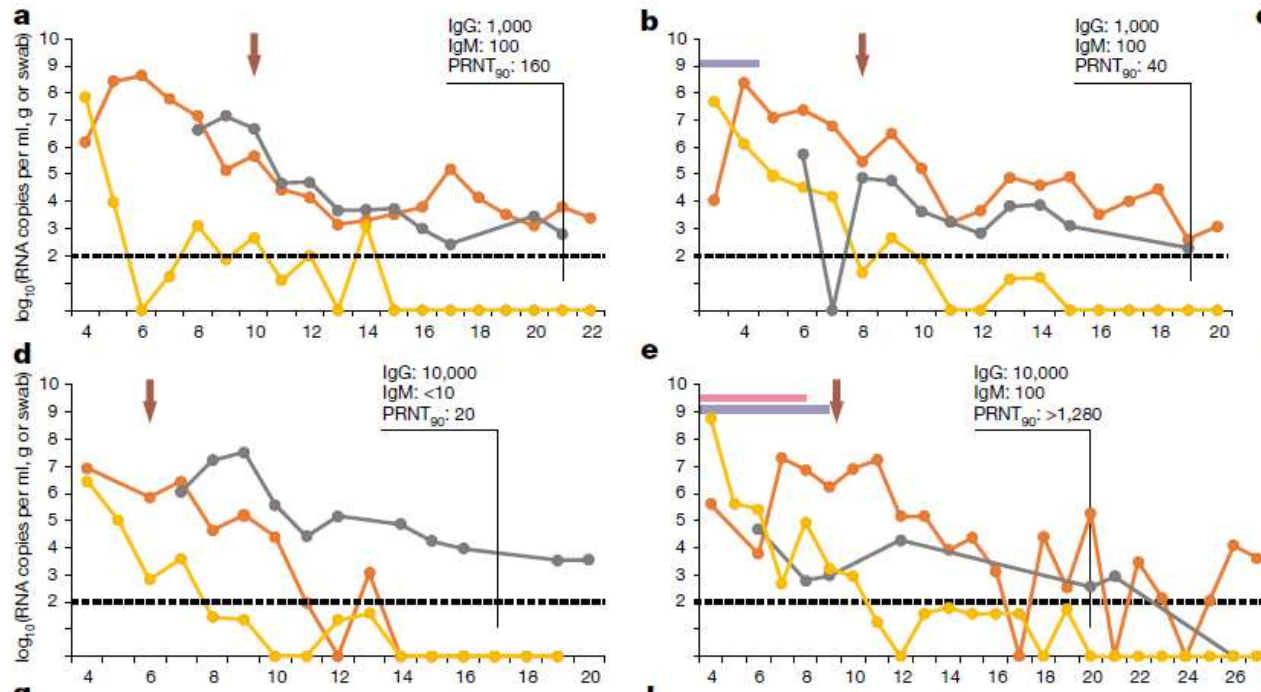
# Wie kann man das Infektionsrisiko in geschlossenen Räumen abschätzen?

## Zur Abschätzung benötigt:

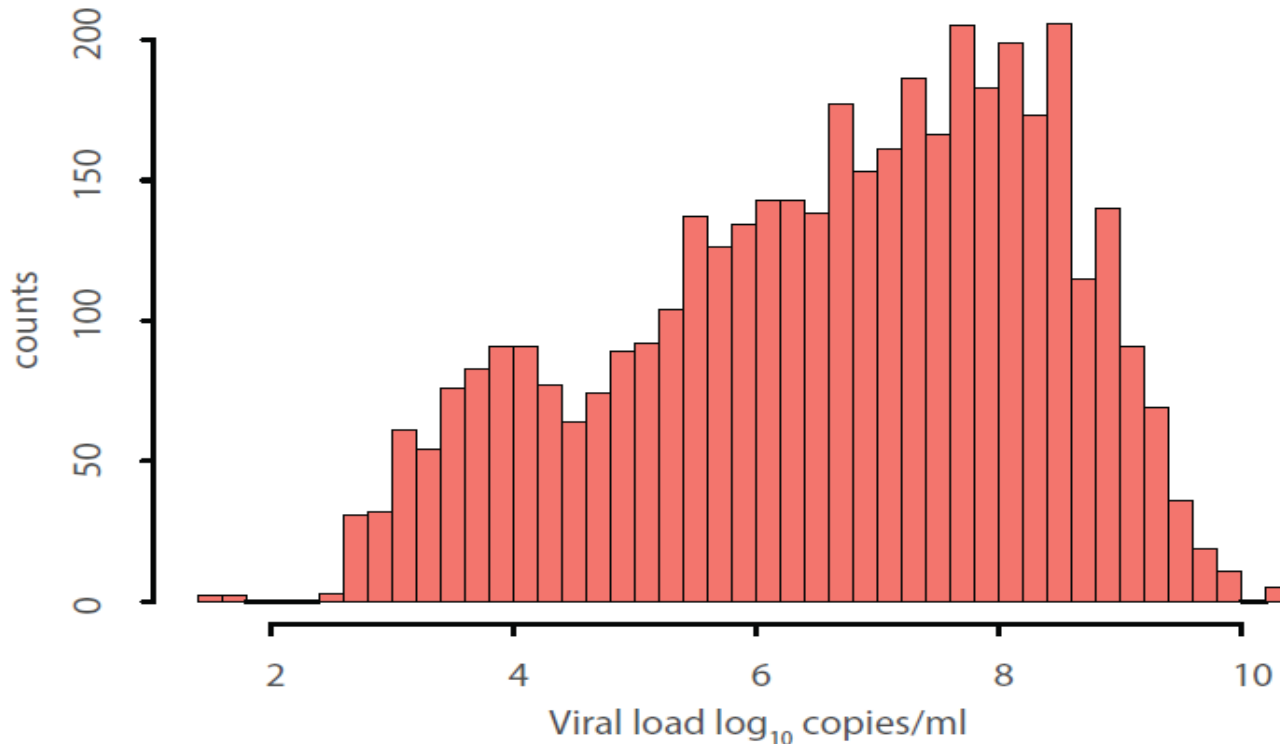
- Mittlere inhalierte RNA Dosis (D50) für 50% Infektionsrisiko.
    - Virologen fragen (grobe Schätzung: 100-1000 RNA Kopien)
    - Epidemiologische Studien (grob: 100-1000 Virions / D50)
    - Rückrechnen von Superspreading Events mit bekanntem Setting (hochspekulativ wegen nicht auflösbaren Anteilen von z.B. one shot Tröpfcheninfektionen)
  - Flüssigkeitsvolumen exhaliert von infektiöser Person abhängig von körperlicher Aktivität (Morawska et al. 2009)
  - Virus Konzentration („viral load“) in Atemwegsflüssigkeiten (e.g. Wölfel et al 2020, Jacot et al.2020, siehe unten).
  - Raumlufwechslerate / Frischluftzufuhr / räumliche / zeitliche Pathogen Verteilung
-



# COVID 19, Viruslasten typischer Verläufe, Wölfel et al. (Drosten)

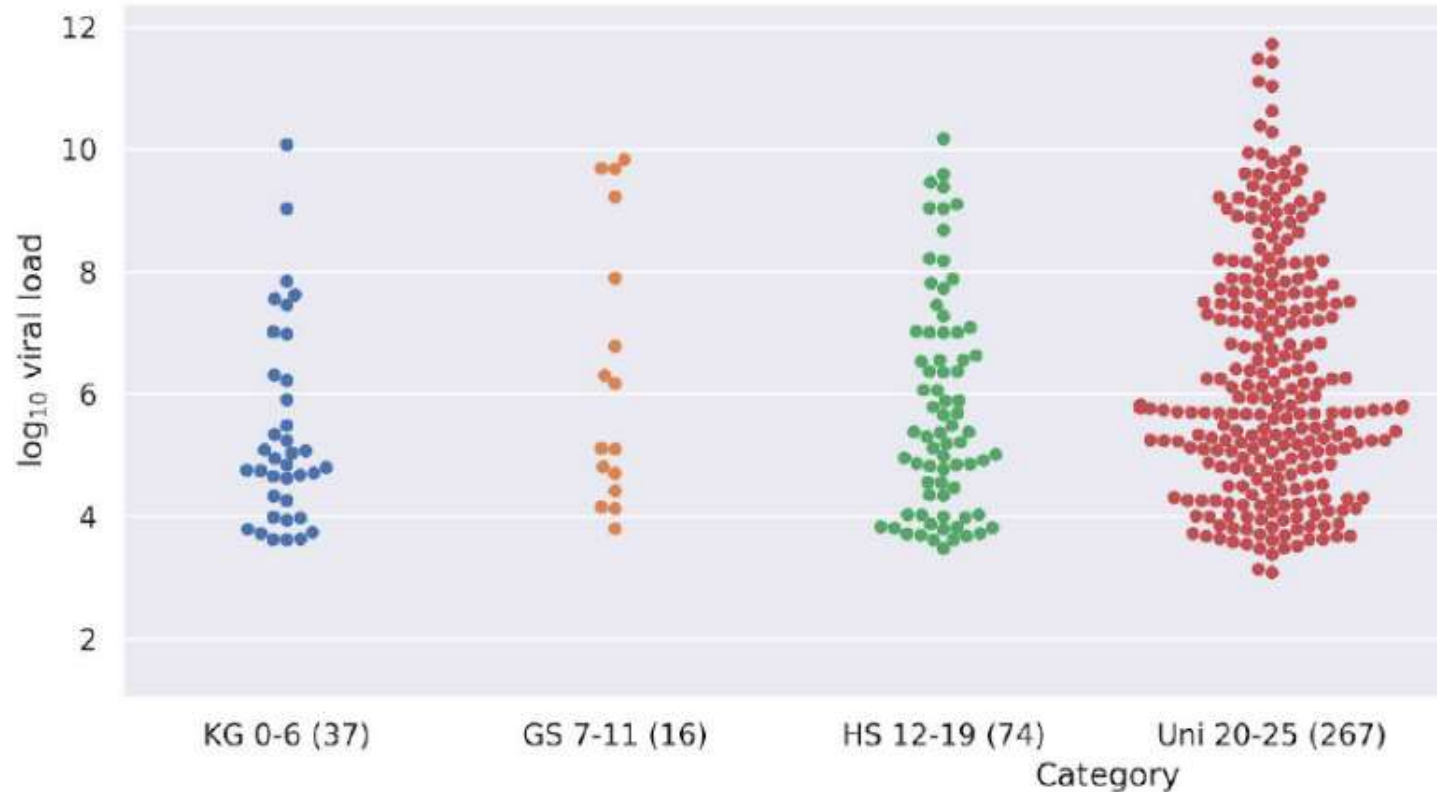


- hospitalisierte Patienten
- zeitliche Verläufe der Viruslasten (RNA copies/ml, Tage nach Symptombeginn)
- gelb: Nasen und Rachen Abstriche, semiquantitativ, braun: Proben aus den mittleren Atemwegen
- Ganz grob: Proben mit RNA Konzentration  $\geq 6 \log_{10}$  können angezüchtet werden, Speichel bis ca. Tag 5, Auswurf bis Tag 8 nach Symptombeginn.
- Viruslast im Speichel sinkt um 1 Größenordnung / Tag!



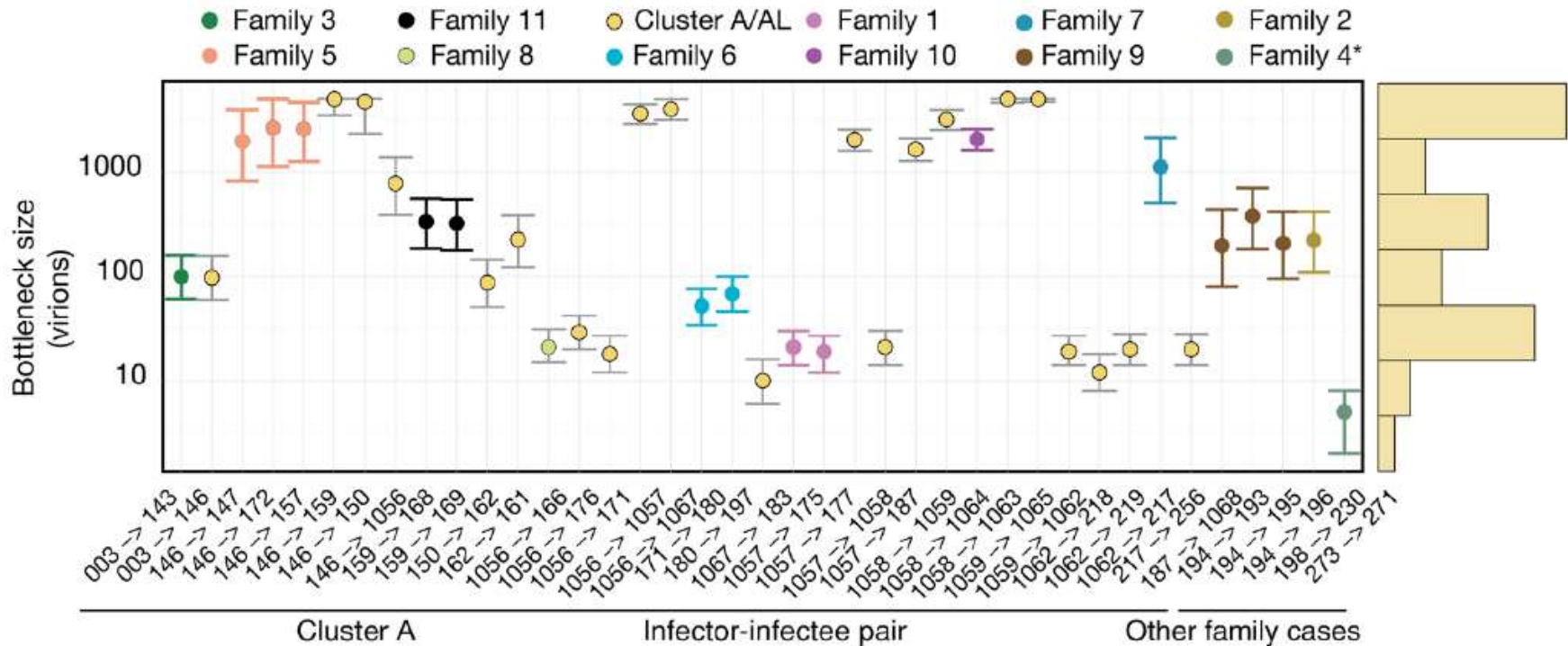
- hospitalisierte Patienten in der Schweiz (1.2.2020 – 27.4.2020), nur erste Probe, Nasen und Rachen Abstriche
- Viruslasten zum Zeitpunkt der Probennahme, bestenfalls 3-4 Tage nach Symptombeginn
- **Verteilung der Viruslasten mit Maximum bei 8 log<sub>10</sub> 3-4 Tage nach Symptombeginn. Grob zurückextrapoliert um 2 Tage -> mindestens 10 log<sub>10</sub> !**

# COVID 19, Jones et al. 2020, (Drosten)



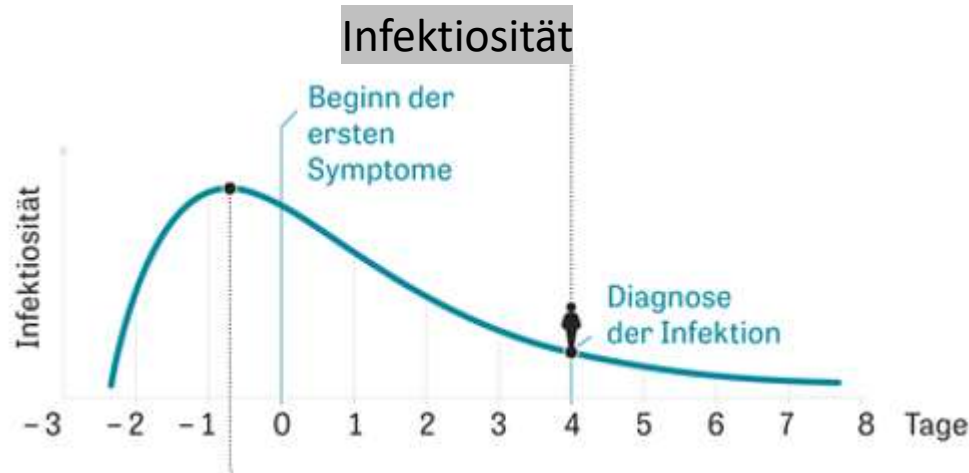
- KG: Kindergarten, GS: Grundschule, HS: Hauptschule/Gymnasium, Uni: Universität
- „Keine signifikanten Unterschiede in der Viruslast“
- Manchmal hat man früh genug getestet, um die 10 log<sub>10</sub> zu sehen. Sogar bei Kleinkindern.

# Infektions-“Flaschenhals“, Popa et al. 2020



- ungefähr 100-1000 Virionen zur Infektion benötigt
- Erklärt in Kombination mit RNA/virion Verhältnis in Atemwegsflüssigkeiten die in-vitro-Kultivierungsschwelle von (5 – 6) log RNA Kopien.

# Von Viruslast zu Infektiosität: Tröpfchen vs. Aerosol



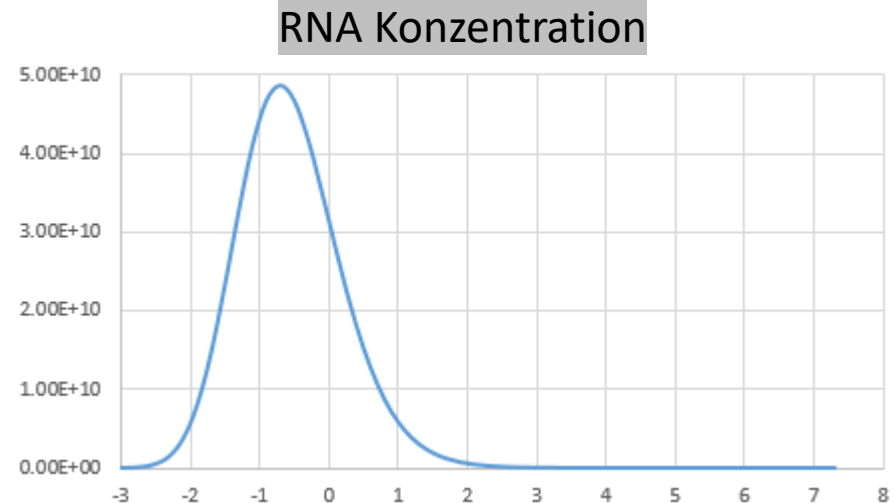
Links: Infektiosität aus Sicht des Virologen (RNA-logarithmische y-Achse), Drosten (Zeit, s.o.)

Infektiosität durch Tröpfchen (husten, niesen) könnten logarithmisch mit der RNA Konzentration gehen (Distanz, vom Setting abhängig).

Rechts: RNA Konzentration in Atemwegsflüssigkeit aus Sicht des „Opfers“ (lineare y-Achse), Überlagerung aus Speichel und Auswurf – „Infektiosität“

Aerosol Infektiosität geht grob linear mit RNA Konzentration und Kontaktzeit.

Mutationen: Aerosolkomponente wird wichtiger!!!



# Wie funktionieren (infektiöse) Aerosole?

- Volumengemittelter „nasser“ ... „trockener“ Durchmesser:  $\sim 5\mu\text{m} \dots 2\mu\text{m} (10^{-10} \text{ cm}^3)$
- Anzahlgemittelter „trockener“ Durchmesser:  $\sim 1\mu\text{m} (10^{-11} \text{ cm}^3)$
- Sedimentations-Geschwindigkeit @2 $\mu\text{m}$ ,  $\sim \text{diameter}^2$ :  $\sim 0.1\text{mm/s}$
- Gemessene typische Oberflächen-Depositionsrate:  $\sim 0.5/\text{h}$
- # exhalierte Partikel durch infektiöses Individuum:
  - atmen ... sprechen ... singen:  $\sim 8 \dots 80 \dots 1000 \text{ \#/s}$
  - $\sim 29\text{k} \dots 290\text{k} \dots 3.6\text{M} \text{ \#/h}$
- av. max RNA Konzentration während höchster Infektiosität:  $\sim 5 * 10^{10} /\text{cm}^3$
- av. max exhalierte Virionen (RNA/Virion  $\sim 100\text{-}1000$ ):  $\sim 1.5\text{k} - 15\text{k} \text{ \#/h}$
- min Tröpfchen Durchmesser, 1 Virion enthaltend:  $\sim 20\mu\text{m}$
- min Tröpfchen Durchmesser für infektiöse Dosis:  $\sim 100\mu\text{m}$
- Gemessene typische Lebensdauer Sars COV-2:  $\sim 1.7/\text{h}$
- Anzahl Menschen, die mit 1(!) **3mm Tröpfchen** infizierbar sind:  $\sim 30000$

## Eigenschaften der infizierten Person

Lautstärke [1=leise, 3=laut, 4..9=singen/schreien]	<input type="text" value="2"/>
Masken-Filtereffizienz (Ausatmen) [0-1; OP-Maske ~0.7, Alltagsmaske (zwei-lagiger Stoff) ~0.5]	<input type="text" value="0"/>
Redeanteil [0-100%]	<input type="text" value="10"/>
Atemzeitvolumen [l/min] [7.5-15; Erwachsener=10]	<input type="text" value="10"/>

## Raumeigenschaften

Luftaustauschrate [pro h] [0.35=kein direktes Lüften, 2=einmaliges Stoßlüften pro h, 6=öffentliche Gebäude/z.B. Supermarkt]	<input type="text" value="0,35"/>
Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	<input type="text" value="60"/>
Höhe [m]	<input type="text" value="3"/>

## Veranstaltungsdetails

Dauer [h]	<input type="text" value="12"/>
Masken-Filtereffizienz (Einatmen) [0-1; OP-Maske ~0.5, Alltagsmaske (zwei-lagiger Stoff) ~0.2]	<input type="text" value="0"/>
Teilnehmer	<input type="text" value="24"/>

> Aerosol-Eigenschaften (für Experten)

> Viruseigenschaften (für Experten)

- Online Rechner

<https://www.mpic.de/4747361/risk-calculator>

### Beispielergebnis:

- Quasi-stationäre Bedingungen unter der Annahme, dass eine hochinfektiöse Person schon einige Zeit (>3.2 h) vor der Veranstaltung im Raum war:
- 9.9% Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Person infiziert wird (individuelles Risiko).
- 91% Wahrscheinlichkeit, dass sich mindestens eine Person ansteckt.

# „Problemchen“:

## Alljährliche Grippewellen, RKI, Epid.Bull.3, 2015

Influenza zugeschriebene Exzess-Todesfälle

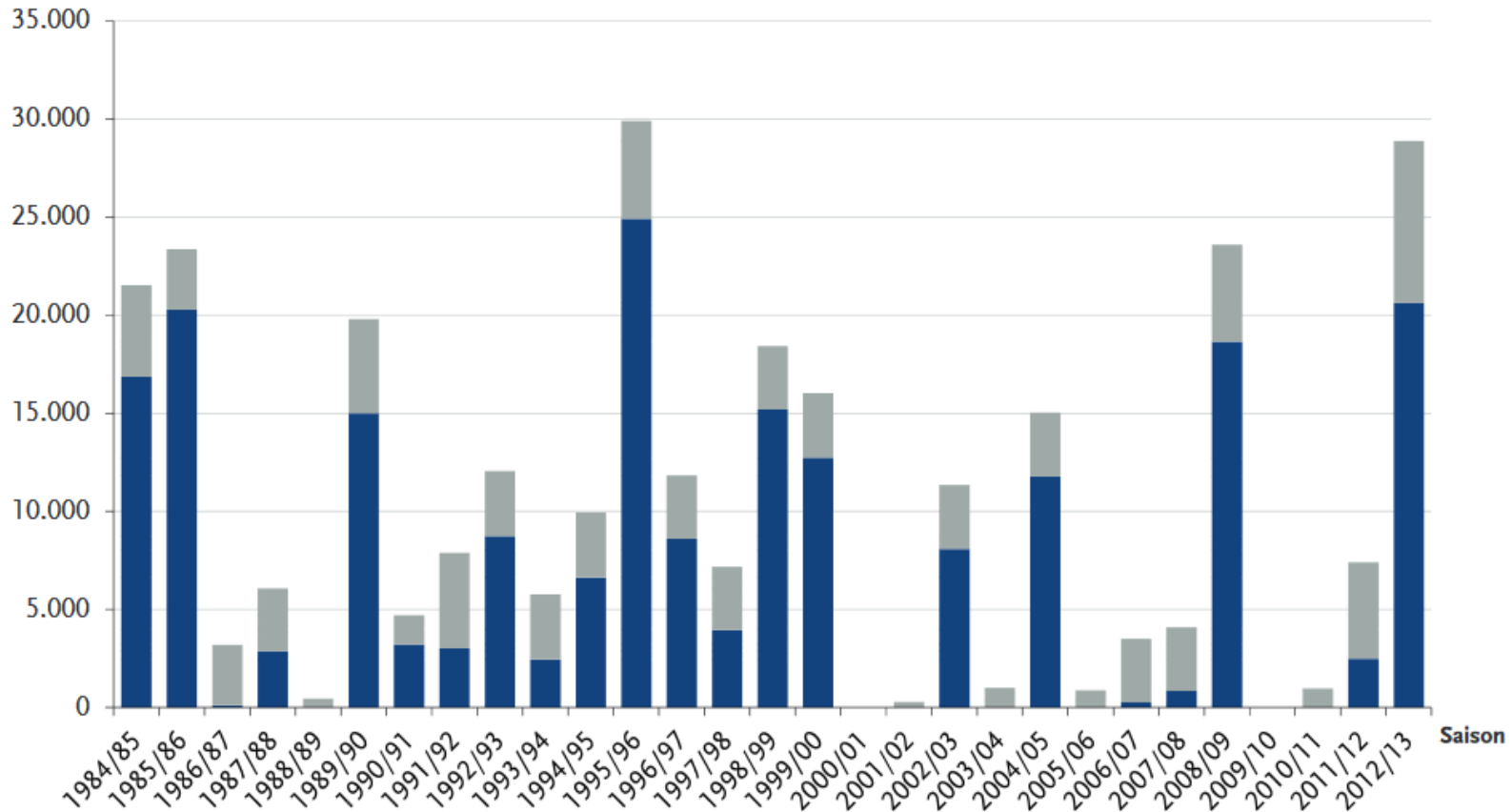


Abb. 2: Der Influenza zugeschriebene Zahl der Exzess-Todesfälle, konservativ berechnet (blaue Balken). Zusätzlicher Bereich bis zur Höhe der jeweiligen Punktschätzer (grauer Balkenbereich).

- Zum Vergleich: Risiko an COVID 19 zu sterben wird ab 50 wesentlich höher als bei einer ausgeprägten Grippeepidemie. Saison 2017/18 ähnlich wie 2012/13.



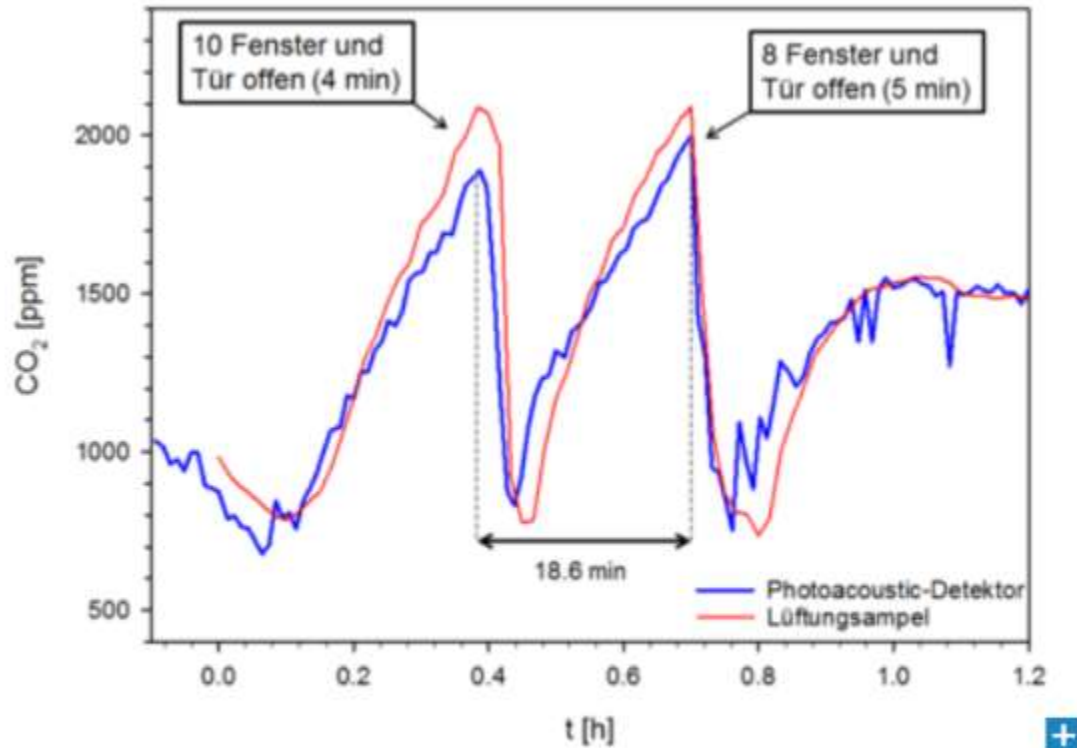


Abb. 1: Konzentrationsverlauf von Kohlendioxid während einer Vorlesungsstunde.

- ...Nach Empfehlung der [Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes](#) ist „bei einer **durchschnittlichen Klassengröße** ein mehrfacher [Luftwechsel](#) pro Stunde zu empfehlen (**ca. 25-30 m<sup>3</sup>/h und Person**).“

## *Emissionen des Menschen*

Atemzugvolumen in Ruhe (sitzen, lesen):	~7ml/kg
Atemzugvolumen Schüler in Ruhe (60kg):	~420 ml
zusätzlich ~20% (leichte Tätigkeit):	~500ml
15 Atemzüge/min:	~7.5l/min = 450l/h
CO <sub>2</sub> Emission (4% vol):	~18l/h
steady state Frischluftzufuhr für 1000ppm CO <sub>2</sub> Limit:	~18l/h / 0.0006 = <b>30m<sup>3</sup>/h</b>
trockener Wärmeverlust (in Ruhe + 20% leichte Akt.):	~100W
latenter Wärmeverlust / Atem/ Aerosol:	~20W / 1.6W / 1e-5W
Lüftungsverlust/K $30\text{m}^3/\text{h} * 1\text{kJ}/(\text{kg} * \text{K}) / 3600\text{s}/\text{h} * 1.2\text{kg}/\text{m}^3$ :	~10W/K
H <sub>2</sub> O Emission (4% vol Atem + 8% Schweiß) :	~18l/h + 36l/h = 54l/h
steady state H <sub>2</sub> O Partialdruck Erhöhung :	~ <b>1.8mbar</b>

Oliver Thews, Karl Kunzelmann: *Ventilation und Atemmechanik*. In: Ralf Brandes, Florian Lang, Robert F. Schmidt (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. 32. Auflage. Springer-Verlag GmbH Deutschland, Berlin 2019, [ISBN 978-3-662-56467-7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-56467-7), S. 331–333.

VDI 2078 Ausgabe Juli 1996 : Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln).

Simple Boxmodell, zunächst gut gemischt, DGL 1.O.:

$$dc_i / dt = I/V - (dV / (V * dt) + d) * c_i$$

Konzentrations-  
änderung / Zeit

Immission  
(Stoffmenge/V/t)

Luftwechselrate  
(LWR)

Konzentration

Abklingrate

*Lösung :*

$$c_i = I_i / (V * (AER+d)) * (1 - e^{-(AER+d) * t}) + c_{i,0} * e^{-(AER+d) * t}$$

*Bemerkungen:*

- steady state Konzentration ist für  $d = 0$  nicht von Raumvolumen abhängig. Kleine Räume brauchen den gleichen Frischluftfluss, also umgekehrt proportional höhere Luftwechselraten.
- Anstiegszeit ist proportional zum Raumvolumen, relevant für z.B. Stoßlüften, sehr große Räume.
- Zerfallsrate  $d$  von Sars-COV-2  $\sim 0.6/h$  (van Doremalen 2020))
- Außenkonzentration  $c_a \sim 0$  für Sars-Cov 2 und  $\sim 420\text{ppm}$  für CO2

# Komfort: Wärmeflüsse Klassenraum

<b>Mittlerer Temperaturunterschied Heizperiode</b> (Wiesbaden, 3000Kd/a (20°-12°) / 207d) :	15K
<b>Lüftungsverlust / Raumlftwechsel</b> (1kJ/(kg*K)*200m <sup>3</sup> /3600s/h*1.2kg/m <sup>3</sup> ) :	67Wh/K
<b>Transmissionsverlust Fassade</b> (1.5W/(m <sup>2</sup> *K)*24m <sup>2</sup> ) :	36W/K
<b>Solar gewinn</b> (November - Januar 15kWh/m <sup>2</sup> /M (west/north/east) = 0.5kWh/m <sup>2</sup> /6h * 15m <sup>2</sup> * 0.7) :	900W
<b>Wand Energie Puffer</b> (Einhüllende(140m <sup>2</sup> +60m <sup>2</sup> )*0.15m = 30m <sup>3</sup> *570Wh/(K*m <sup>3</sup> ) = 17kWh/K / 8h) :	2000W/K

Heat transfer coefficient total  $h = h_r + h_c = 25\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$  (DIN EN ISO 6946)

Convective  $h_c = 12 * \text{sqrt}(v) + 2 = 12 * 0.1^2 + 2 = 2.1 \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , Wikipedia

Human  $50\text{W}/2\text{m}^2\cdot 10\text{K} \sim 2.5\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , room  $200\text{m}^2 * 2\text{K} * 2.2\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}) \sim 1\text{kW}$

$$\text{Heizschultage} = (217d - 40d) * 5/7 = 126sd$$

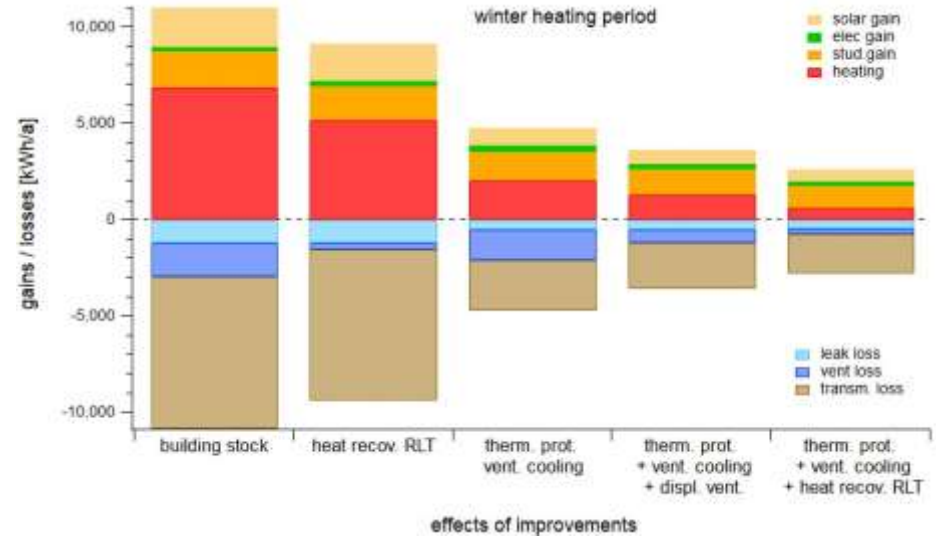
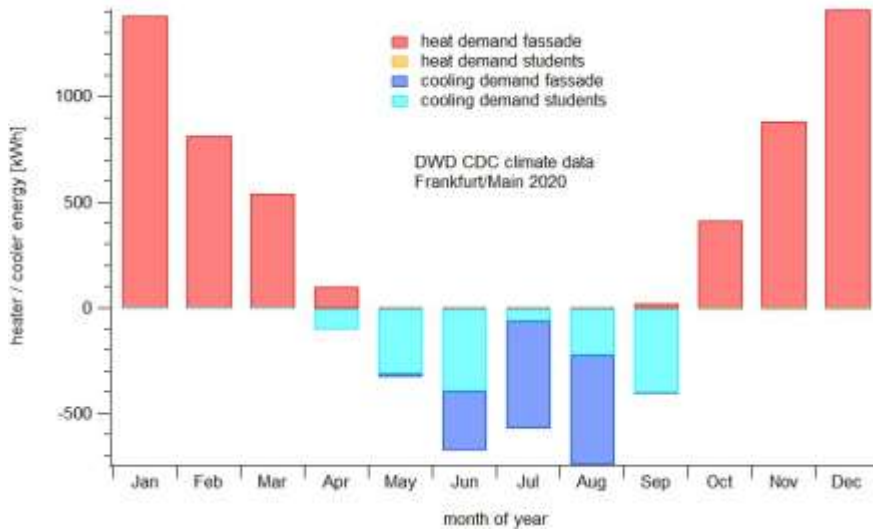
$$\text{Heizschulgradtage} = 126sd * 3300Kd/217d = 1922sKd$$

$$\begin{aligned} Q_{vent} &= 1922sKd * 7h/d * 25\text{m}^3/h/p * 0.34\text{Wh}/K * 1600p \\ &= 182\text{MWh} \end{aligned}$$

1999\_HMUEJFGetIWU\_Heizenergie-im-Hochbau-Leitfaden-energiebewusste-Gebäudeplanung

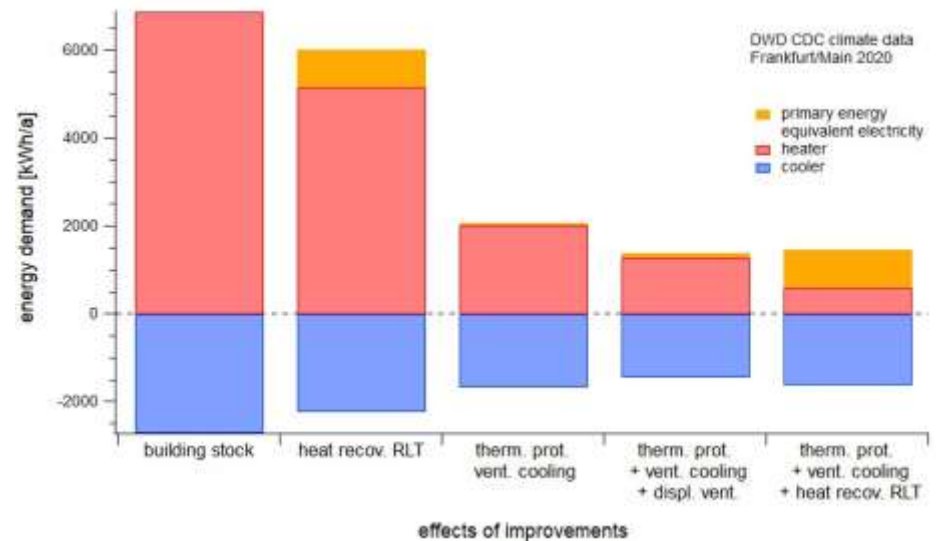
DIN 10456, volume related heat capacity concrete / carbonate stone  $570\text{Wh}/(\text{K}\cdot\text{m}^3)$

# Die Vorzüge ausgewachsener Raumluftechnik – 1D (wand) Klassenraum Wärmefluss Modell

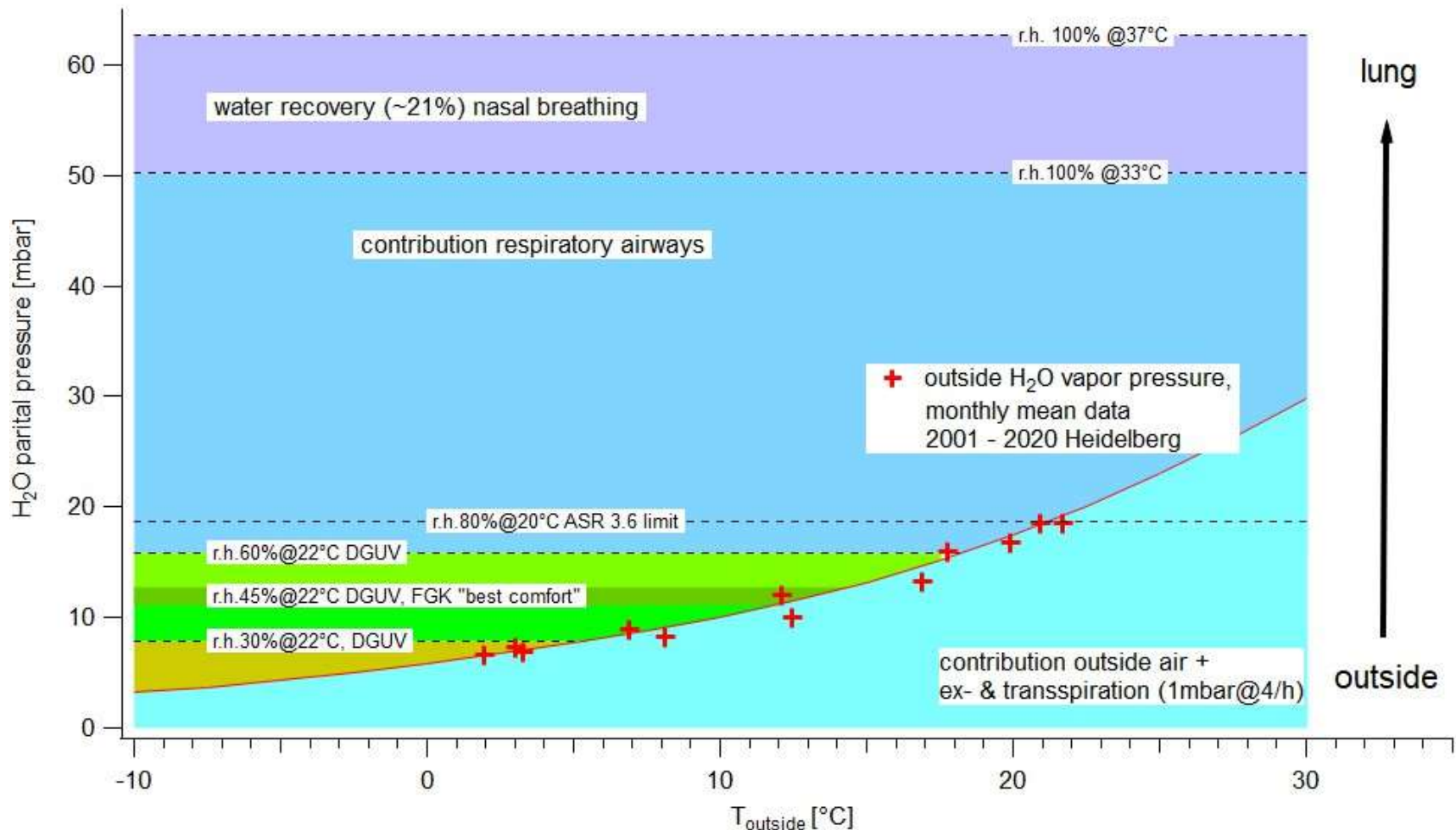


## Results:

- Ventilationsverluste ausgeglichen durch Wärmelasten von Personen.
- Transmissions- und Infiltrationsverluste dominieren Wärmeverluste.
- Energetische Sanierung spart 5 mal mehr Energie als Raumluftechnik mit Wärmerückgewinnung.



# Komfortable Raumlufte: absolute Luftfeuchte



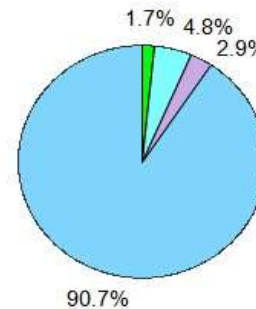
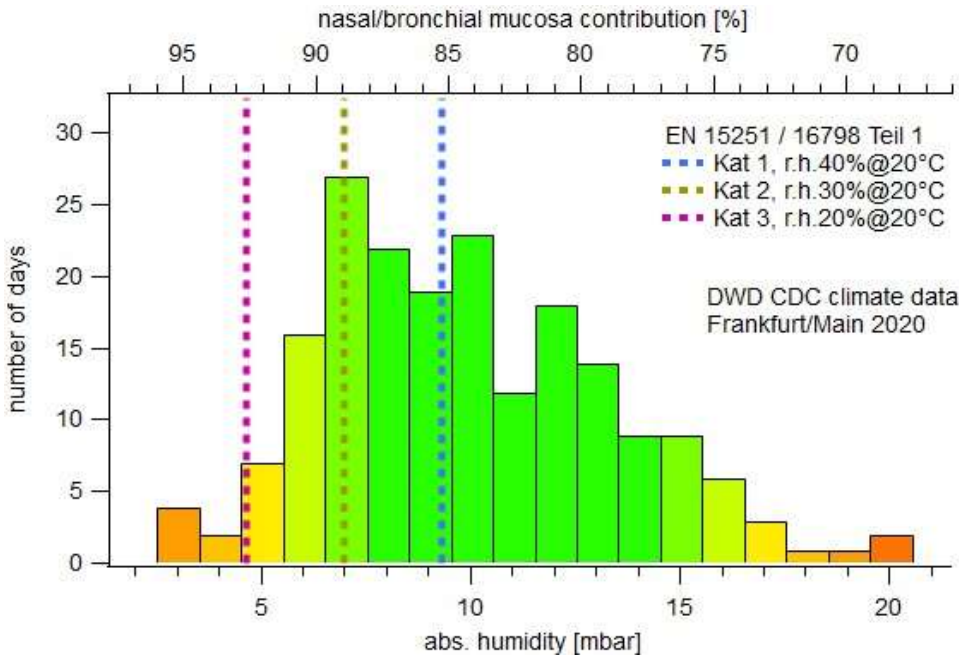
ASR 3.6: r.h. 80% @ 20°C „aus physikalischen Gründen“, keine Referenz angegeben

DGUV: DGUV Information 215-510, basierend auf DIN EN ISO 15265.

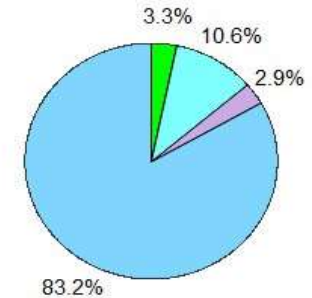
FGK: Status Report 8, Fragen und Antworten zur Raumlufteuchte

T/r.H. data Heidelberg: <https://www.wetterkontor.de/de/klima/klima2.asp?land=de&stat=10734>, Magnus formel.

# Die Vorzüge ausgewachsener Raumluftechnik – Nase und Atemwege vs. Raumluftechnik



Befeuchtungsanteil  
RLT, Kat 2  
r.h. 25% @ 22°C,

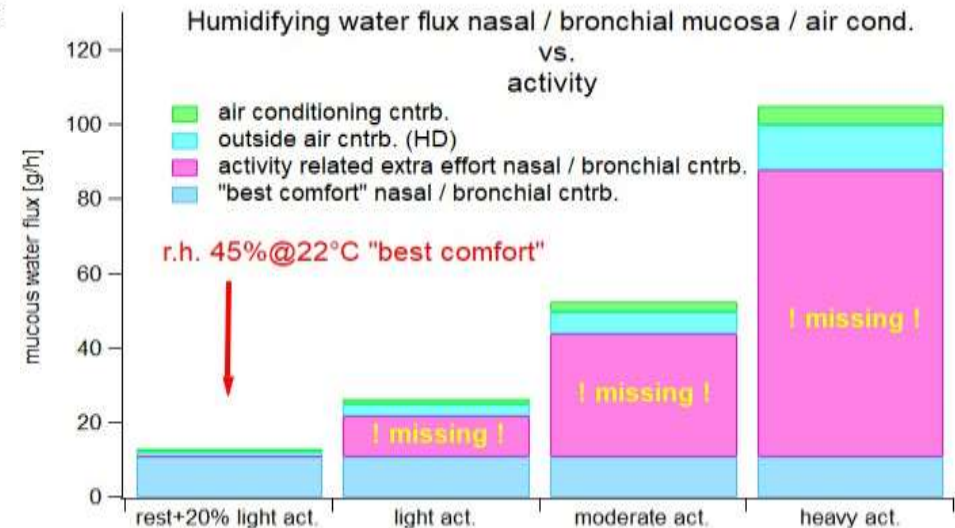


Befeuchtungsanteil  
RLT, Kat 1  
r.h. 45% @ 22°C,



## Resultat:

- „Comfort“ Raumluftechnik bringt 3.3% „Erleichterung“ in Ruhe + 20% leichte Aktivität.
- Verfehlt die Anforderungen schon bei leichter Aktivität um einen Faktor 2.



- Menschen können günstige relative Luftfeuchten (40..50% rel.) durch Ausatmung und Transpiration nicht selbst erzeugen, können aber helfen, in den Komfort Bereich zu kommen (30% r.H. DGUV).
- Die Lebensdauer von Sas-Cov 2 wird bei Raumluftwechselraten unter 30% als länger angenommen, aber da in Schulen die Verweilzeit  $\ll$  Lebensdauer ist, gibt es kein Problem. In kleinen Büros und Wohnungen wird es relevant.
- Es wird angenommen, dass trockene Schleimhäute anfälliger gegen Besiedelung durch Keime sind. Nach unseren Rechnungen ist die Belastung der Schleimhäute durch wechselnde Belastung und Mundatmung um ein vielfaches höher als das, was durch optimal geregelte Raumluftfeuchte ausgeglichen werden könnte.



# Lüftungs- „Lösungen“ im Vergleich:

- Kähler / TROTEC TAC V+ Raumlufreiniger 1500 m<sup>3</sup>/h Luftreiniger, **RLFR = 5.45/h**  
„...Aerosolkonzentration in einem Raum mit einer Größe von 80 m<sup>2</sup> innerhalb kurzer Zeit überall auf ein geringes Maß reduziert werden kann.“ (1500m<sup>3</sup>/h, 90% Reduktion in 24min aus Plots abgelesen).  
„Aufgrund **der Gefährlichkeit** der SARS-CoV-2 Infektion sollte die Luftwechselrate aus unserer Sicht mindestens Werte im Bereich **4 – 8** erreichen.“
- Curtius / Luftreiniger 3-4 x Philips 2887, 22-29°C außen, 29 Schüler, ca. 1026m<sup>3</sup>/h, „**air filtration rate 5.5/h**“  
“In times when classes were conducted with windows and door closed, the aerosol concentration was reduced by more than **90 %** within less than 30 minutes when running the purifiers.”
- Seipp und Steffen, THM Mittelhessen; Stoßlüften nach UBA/IRK, **RLWR = ?**.  
„..., dass die **Stoßöffnung** aller Fenster über drei Minuten bei Außentemperaturen von **7-11** Grad Celsius die eingebrachte Konzentration an Aerosolen bis **zu 99,8** Prozent senkte. ... Fensterstoßlüftung um das **10 - 80**-fache wirksamer als ... maschinellen Luftfilterung (vgl. zu Curtius et al).“
- Kriegel / Wolf Simulationsstudie Lüftungsgerät 800m<sup>3</sup>/h, 20°C außen, 24 Schüler, RLWR = 4.4/h  
„Es zeigt sich, dass die Lüftung über **gekippte Fenster** nur einen **geringen** Luftaustausch zulässt und der **Effekt komplett geöffneter** Fenster **effektiver** ist.“ (sagt auch das UBA)  
„...sorgt die Lüftungsanlage **durchgehend** für eine **gleichmäßige Erneuerung** der Raumluf und für eine **deutliche Reduzierung der Bereiche** mit hoher Partikelkonzentration.“
- Raumluftechnik Schulen; Baustandards Heizung Lüftung Sanitär Neubauten Mainz  
**20m<sup>3</sup>/h/Schüler** entspricht **RLWR ~ 3-4/h (200m<sup>3</sup> Raum)**, vor Corona.

# Empfehlungen des UBA (Umweltbundesamt) und der IRK (Innenraum-Lufthygiene Kommission am UBA)



Zitate aus

<https://www.umweltbundesamt.de/richtig-lueften-in-schulen#wie-funktioniert-richtiges-luften-im-schulalltag>,  
15.10.2020

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/irk\\_stellungnahme\\_lueften\\_sars-cov-2\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/irk_stellungnahme_lueften_sars-cov-2_0.pdf) , 12.8.2020

UBA: „Um sich vor infektiösen Partikeln zu schützen, sollte pro Stunde ein dreifacher Luftwechsel erfolgen. Das bedeutet, dass die Raumluft dreimal pro Stunde komplett gegen Frischluft von außen ausgetauscht wird.“

IRK: Theoretischen Betrachtungen zufolge verringert sich die zu einem bestimmten Zeitpunkt im Innenraum freigesetzte Stoffmenge bei einem Luftwechsel von 1 pro Stunde innerhalb einer Stunde um ca. 60%,...

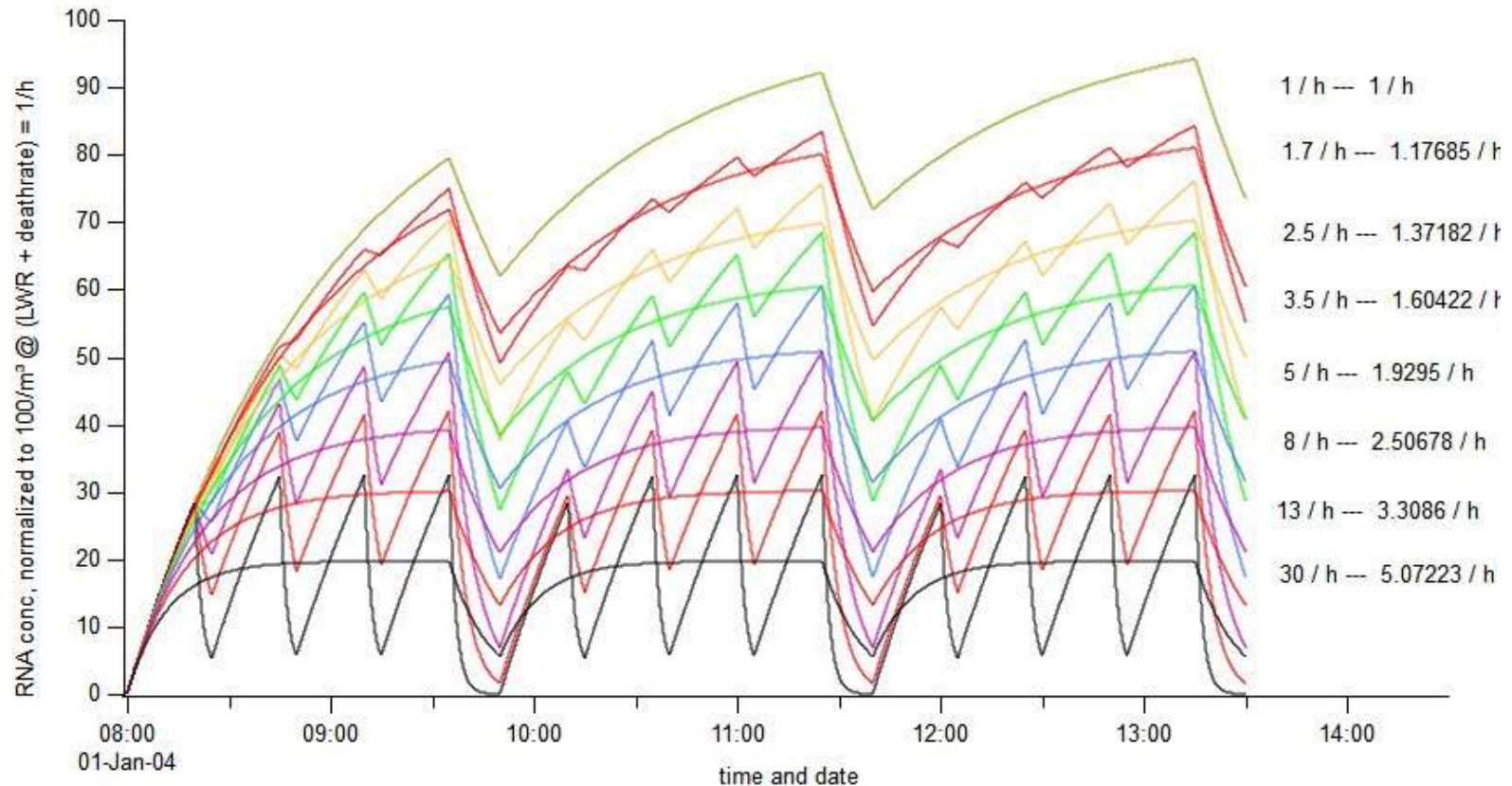
IRK: Bei Klassenraumgrößen ... gilt folgendes. Hier soll in jeder (!) Unterrichtspause intensiv bei weit geöffneten Fenstern gelüftet werden [7], bei Unterrichtseinheiten von mehr als 45 Minuten Dauer, ..., auch während des Unterrichtes.

UBA: Je größer die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen ist, desto effektiver ist das Lüften. ... ist bei kalten Außentemperaturen ... ca. 3-5 Minuten ausreichend. An warmen Tagen ... (ca. 10-20 Minuten).

**ToDo:**

- **Vergleiche Luftwechselraten von Stoß-, Dauer-, mechanischer Lüftung.**
- **Messe Luftwechselraten, Praxis vs. UBA Vorgaben.**

# Simulationsmodell Klassenraum



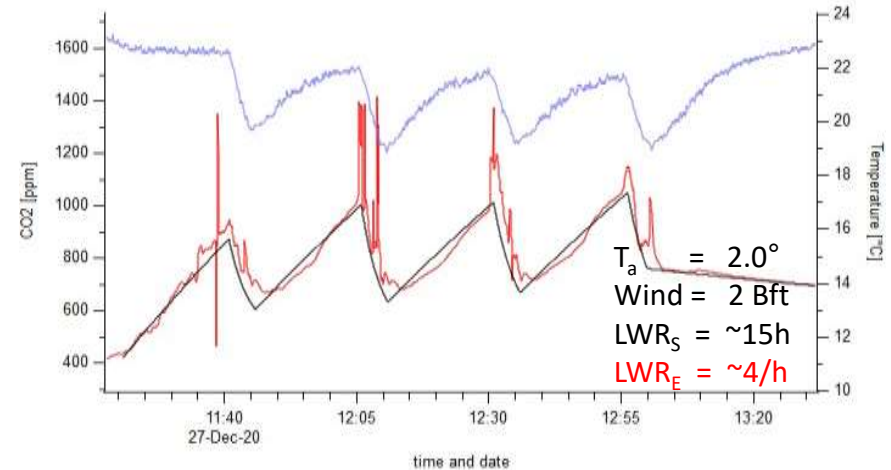
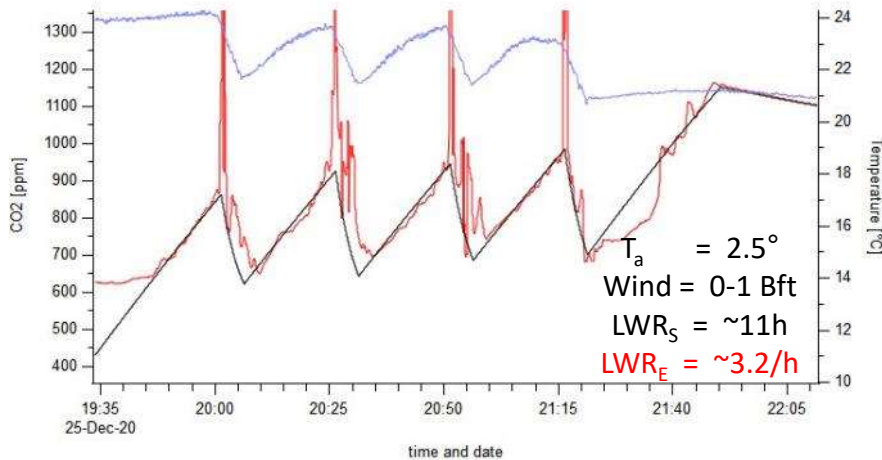
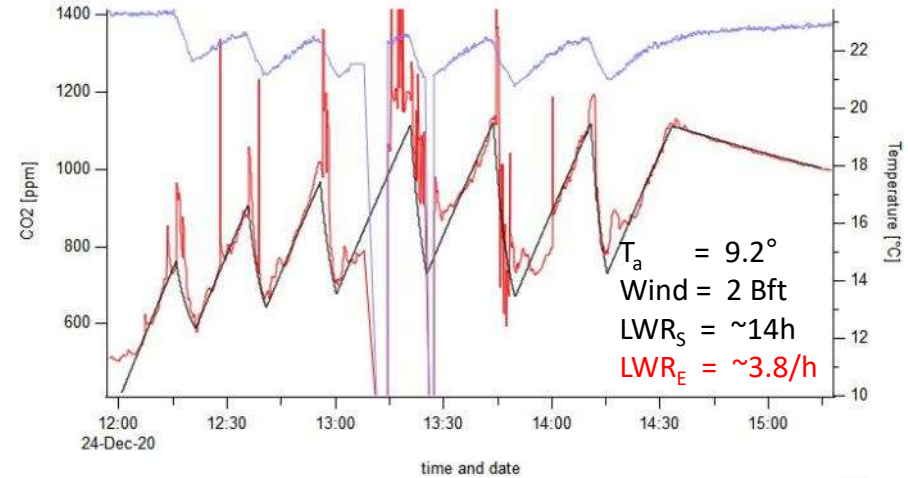
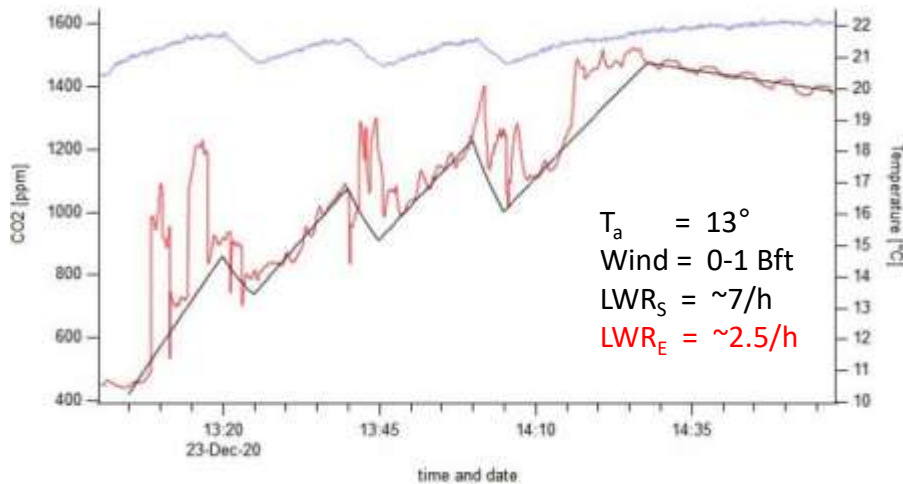
- RNA Konzentration Zeitverlauf, 3 Doppelstunden, 5min Pause dazwischen, 15min Pause danach, sowie je einer 5min Pause in jeder Stunde nach 20min, Schüler verlassen den Raum in den großen Pausen.
- Zerfallsrate  $d$  von Sars-COV-2  $\sim 0.6/h$  (van Doremalen 2020)), Fassadenleck  $0.4/h$ , zusammen  $1/h$ .
- **Dosisäquivalente Luftwechselraten von Dauerlüftung vs. Stoßlüften.**

# Messungen Stoßlüftung, Fensterfront



- Fensterfront ca. 15m<sup>2</sup>,
- 3 Oberlichter 180 x 50 cm
- 4 Unterlichter 180 x 50 cm
- 2 Kippfenster 180 x 140 cm
- 1 Drehfenster (Notaustieg) 130 x 140 cm
  
- Freie Öffnung der Kippfenster oben ca. 13cm
  
- Front 24m<sup>2</sup>, Glasfläche ca. 15m<sup>2</sup>
  
- Nach UBA:  
**nicht gut lüftbar!**

# Messungen Stoßlüftung

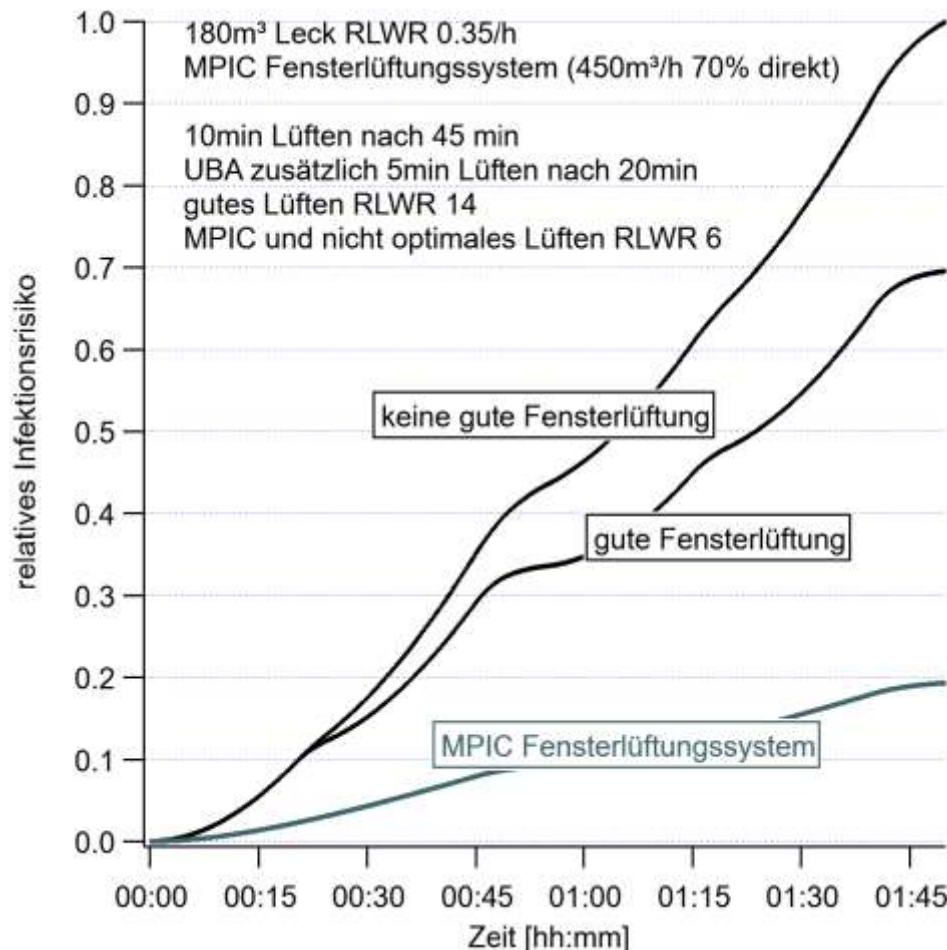


- CO2 (rot), Raumtemperatur (blau), Simulationen (schwarz), verschiedene Außentemperaturen und Einfluss von Wind, CO2 Quellstärke ca. 360l/h (23p).

## *Ergebnisse:*

- UBA / IRK Empfehlungen (>3/h) **erfüllt** durch 20/5min Stoßlüften **unter 10°C** Außentemperatur, obwohl bis auf ein relativ kleines Fenster **nur Kippfenster** vorhanden sind.
  - **Verlängere** Lüftungsintervalle **über 10°C** (UBA: „warme Tage), insbesondere bei **Windstille**.
  - Aufwand: Bedienen von **10** relativ großen und schweren Fenstern **4 mal pro Unterrichtsstunde**.
-

# Relatives Infektionsrisiko



Modellierung relativer Infektionsdosis inhaliert während einer Doppelstunde:

- weniger effektives Stoßlüften mit zusätzlicher Lüftung nach 20min
- effektives Stoßlüften mit zusätzlicher Lüftung nach 20min
- MPIC Abluftsystem, ~70% direkte Aerosolabsaugung (wie gemessen in Raucher Experimenten, siehe unten)

Leckrate 0.35/h, Sars-COV-2 Abklingrate 0.6/h

Thomas Klimach, Apr. 2021

## Resultat:

- MPIC System kann die infektiöse inhalierte Dosis um **80%** verglichen mit weniger effizientem Stoßlüften, und um **70%** verglichen mit effizientem Stoßlüften verringern, **ohne zusätzliche Lüftung nach 20min.**

# Empfehlungen des UBA (Umweltbundesamt) und der IRK (Innenraum-Lufthygiene Kommission am UBA)



Zitate aus

<https://www.umweltbundesamt.de/richtig-lueften-in-schulen#wie-funktioniert-richtiges-luften-im-schulalltag>,  
15.10.2020

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/irk\\_stellungnahme\\_lueften\\_sars-cov-2\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/irk_stellungnahme_lueften_sars-cov-2_0.pdf), 12.8.2020

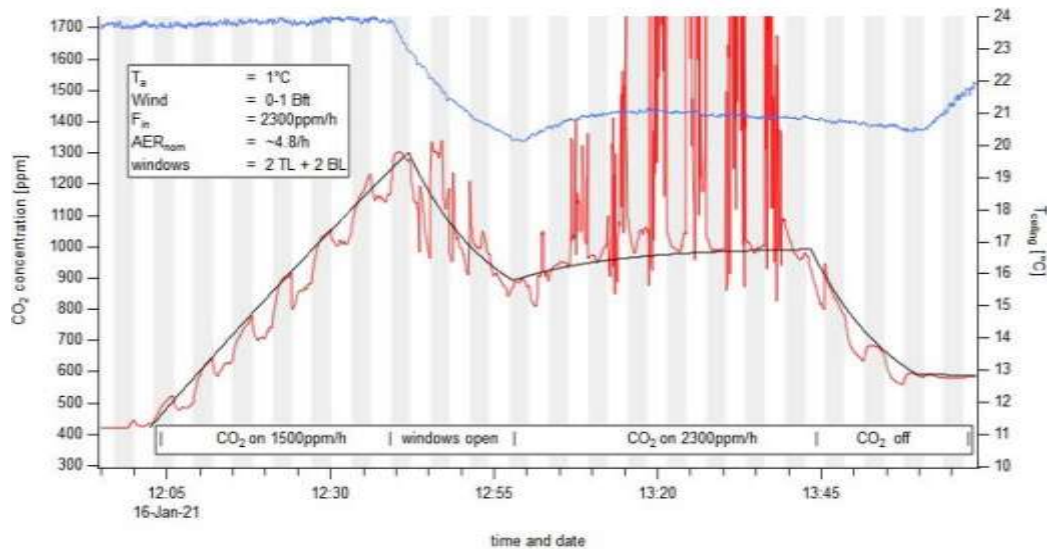
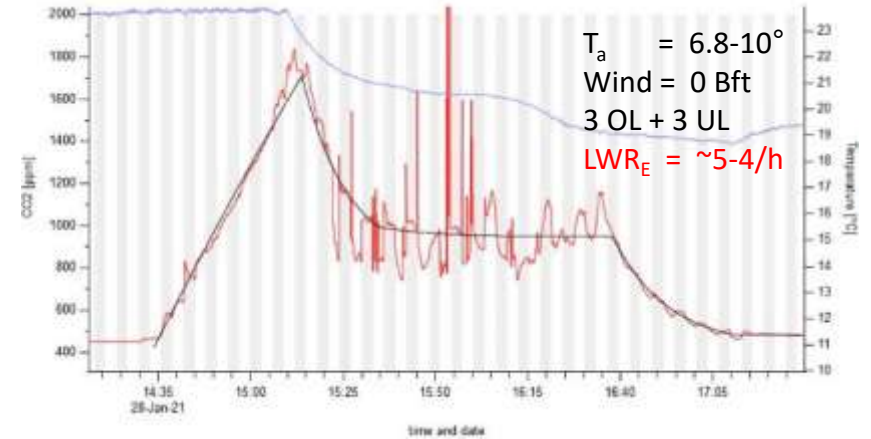
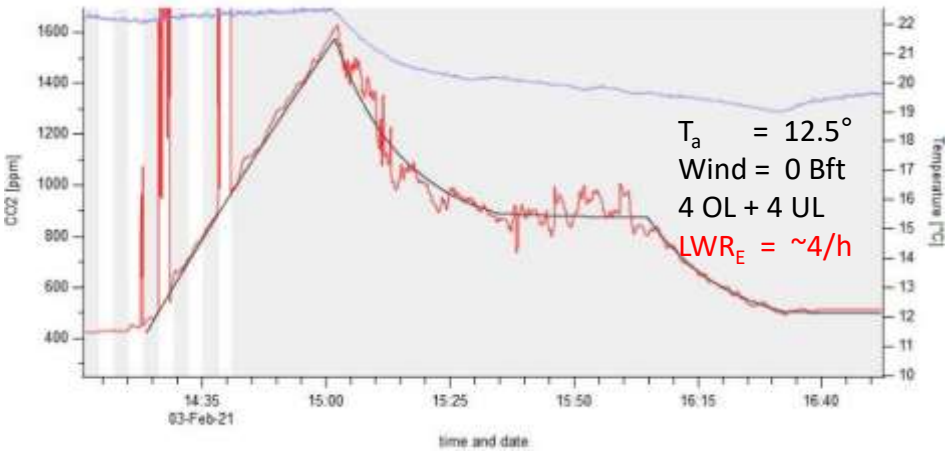
UBA: „Eine Kippstellung der Fenster führt nicht zu einem ausreichenden Luftaustausch, auch wenn das Fenster den ganzen Tag gekippt bleibt. In der kalten Jahreszeit führt dieses hygienisch ineffiziente Lüften zudem dazu, dass Wärme aus dem Raum unnötig entweicht.“

## ToDo:

- Messe Kipplüftungseffizienz, Praxis vs. UBA Empfehlungen
  - Vergleiche hygienische Effizienz von Kipp- und Stoßlüftung
  - Vergleiche energetische Effizienz von Kipp- und Stoßlüftung
  - Vergleiche Behaglichkeit von Kipp- und Stoßlüftung
-

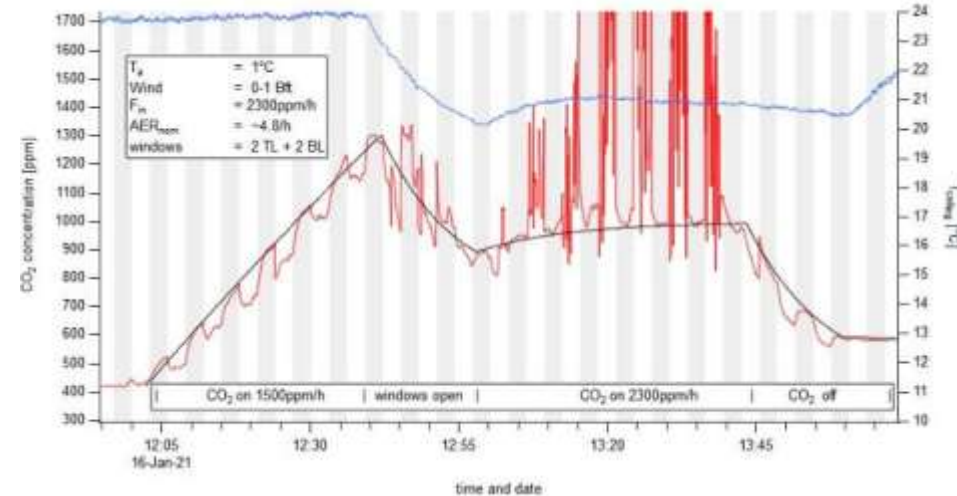
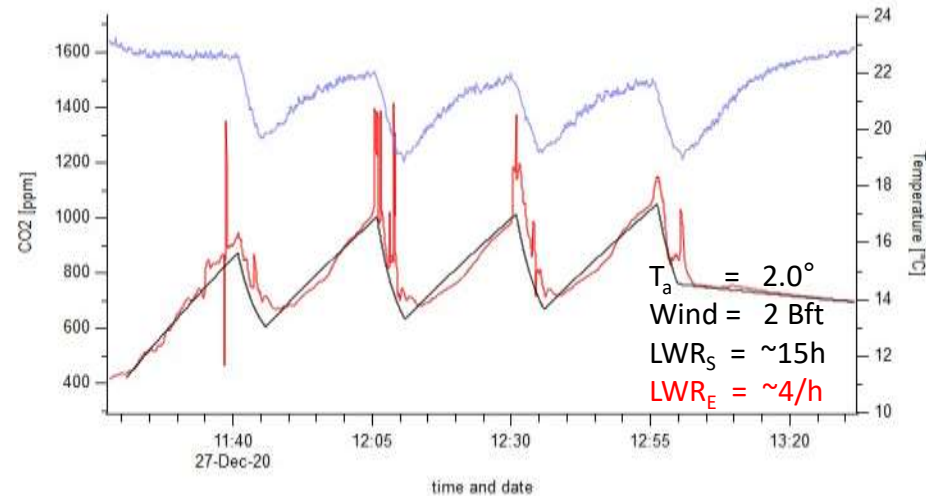


# Messungen Kipplüftung



- CO<sub>2</sub> (rot), Temperatur (blue), Simulationen (black).  
Verschiedene Außentemperaturen und Einfluss von Wind.
- Shaded: sample height 2.8m  
White: sample height 0.6m

# Vergleich Stoßlüften - Dauerlüften



## Ergebnisse:

- **Mittlere Raumtemperatur:** kein signifikanter Unterschied zwischen Stoßlüften und Dauerlüften.
- **Temperaturschwankungen:** beim Stoßlüften, in Fensternähe/Tischhöhe unter  $10^\circ\text{C}$ .
- **Behaglichkeit:** Luftgeschwindigkeiten sind beim Dauerlüften 4-5 mal niedriger für den gleichen Luftaustausch. Zuglufteinfluss beim Stoßlüften also wesentlich höher.

## ***Mehr Ergebnisse:***

- **Durchsatz:** UBA / IRK Empfehlungen (>3/h) **leicht erfüllt** durch „parametrische“ Kipplüftung unter 15°C Außentemperatur. **Besser** als Stoßlüften.
- **Energieeffizienz:** Bei gleichen mittleren Raumtemperaturen und ausgetauschten Luftvolumina kann Stoßlüften **nicht energieeffizienter** sein als Dauerlüftung. (Fitzner 2012, Gertis&Hauser 1979)
- **Lüftungseffizienz (Hygiene plus):** Daten bei Außentemperaturen < 10°C zeigen die Existenz von signifikanten Schadstoffgradienten mit wesentlich niedrigeren Lasten in Nasenhöhe. **Vorteil Dauerlüftung, nicht möglich mit Stoßlüftung.**

# Empfehlungen des UBA (Umweltbundesamt) und der IRK (Innenraum-Lufthygiene Kommission am UBA)

Zitate aus

<https://www.umweltbundesamt.de/richtig-lueften-in-schulen#wie-funktioniert-richtiges-luft-im-schulalltag>,  
15.10.2020

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/irk\\_stellungnahme\\_lueften\\_sars-cov-2\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/irk_stellungnahme_lueften_sars-cov-2_0.pdf), 12.8.2020

D. Müller, K. Rewitz, D. Derwein, T. M. Burgholz, M. Schweiker, J. Bardey, P. Tappler, *Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen*, White Paper, RWTH-EBC 2020-005, Aachen, 2020, DOI: 10.18154/RWTH-2020-11340

IRK: „In Räumen mit hoher Personenbelegung, wie z. B. Schulen, können sogenannte **CO<sub>2</sub>-Ampeln** als grober Anhaltspunkt für gute oder schlechte Lüftung dienen. Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) gilt seit langem als guter Indikator für den Luftwechsel, eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von höchstens 1000 ppm (0,1 Vol-%) zeigt unter **normalen Bedingungen** einen hygienisch ausreichenden Luftwechsel an [7, 9]. CO<sub>2</sub>-Ampeln können somit einen raschen und einfachen Hinweis liefern, ob und wann **Lüftung notwendig** ist.“

Müller:

„Wichtig ist, dass diese CO<sub>2</sub>-Konzentration **nicht** zwingend mit der Konzentration belasteter Aerosole korreliert, da alle Personen CO<sub>2</sub> ausatmen, während belastete Aerosole nur von infizierten Personen abgegeben werden.“

„Das berechnete absolute Infektionsrisiko muss immer in Relation zur Wahrscheinlichkeit gesehen werden, dass in der Schulstunde der Referenzsituation überhaupt eine infizierte Person anwesend ist.“

**ToDo:**

- Was heißt das für unterschiedliche Lüftungsstrategien?
-

Beispiel Wechselunterricht:

Berechne relatives individuelles Infektionsrisiko für unterschiedliche Lüftungsstrategien

UBA Stoßlüften 3/h, ganze Klasse	UBA Stoßlüften 3/h, halbe Klasse	„Lüften nach Maß“ (CO <sub>2</sub> ) halbe Klasse
1	0.25	0.5

Wenn die **schnelle Reduktion von Inzidenzen** das vornehmliche Ziel wäre, warum würde man die Wirkung **effizienter Maßnahmen** durch **reduzierte Lüftungsanstrengungen** proportional zu CO<sub>2</sub> Konzentration oder lokaler Inzidenz kompromittieren?

# Empfehlungen des UBA (Umweltbundesamt) und der IRK (Innenraum-Lufthygiene Kommission am UBA)



Zitate aus

<https://www.umweltbundesamt.de/richtig-lueften-in-schulen#wie-funktioniert-richtiges-luft-im-schulalltag>,  
15.10.2020

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/irk\\_stellungnahme\\_lueften\\_sars-cov-2\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/irk_stellungnahme_lueften_sars-cov-2_0.pdf), 12.8.2020

*UBA: Es ist zu beachten, dass eine gute Lüftung allein die Übertragung von SARS-CoV-2-Viren von einer erkrankten Person auf eine andere Person nicht generell verhindern kann. Dazu müssten **sehr hohe, in der Praxis nicht realisierbare Luftwechselraten** erreicht werden. In Innenräumen, die von mehreren Personen genutzt werden, sind daher zusätzliche Maßnahmen wie das Tragen einer Mund-Nasen-Bedeckung, das Abstandhalten und ein angepasster Nutzungsplan besonders wichtig.*

**ToDo:**

- **Finde Lüftungstechnischen Möglichkeiten, die Schadstoffkonzentrationen am Arbeitsplatz zu verringern, ohne die Luftwechselraten zu steigern.**

# Quelllüftung in Schulräumen?

Aus: Raumklimatechnik: Band 2: Raumluft- und Raumkühltechnik, hrsg von Rietschel und Fitzner

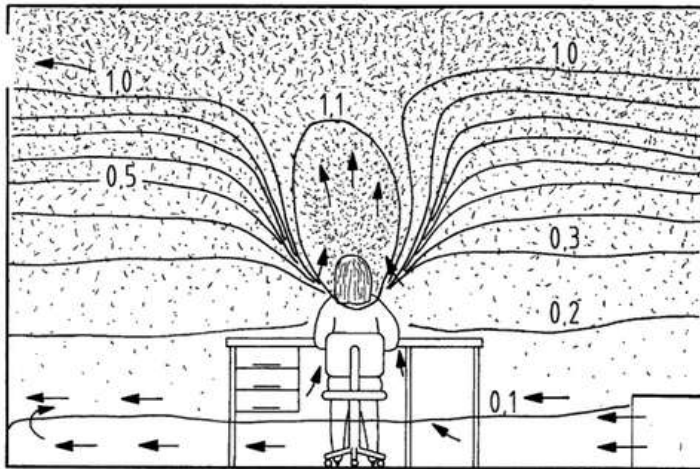


Bild F3-1 Quellluftströmung mit Linien gleichen Stoffbelastungsgrades  $\mu$

Bild rechts:

Lateralverunreinigung bei Quelllüftung ca. 5 mal kleiner als bei Mischlüftung.

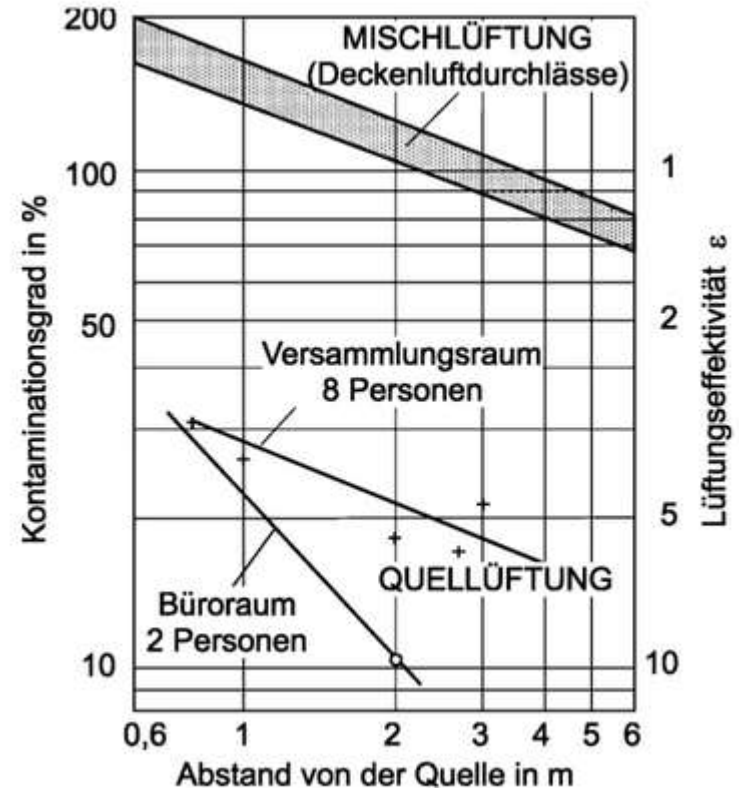


Bild F3-7 Horizontale Verteilung des Stoffbelastungs- oder Kontaminationsgrades  $\mu$  über der Entfernung von der Verunreinigungsquelle nach [F-69]

# Vergleich Lüftungsvarianten versus $T_{diff}$

## Mischlüftung

(z.B. Standard Variante mit Deckenauslass/-absaugung)

## Quelllüftung („Verdrängungslüftung“)

25 Schülern im Raum -> Temperaturdifferenzen innen/außen von ~10K

-> praktisch immer auf der Kühlseite

-> Quelllüftung sollte funktionieren

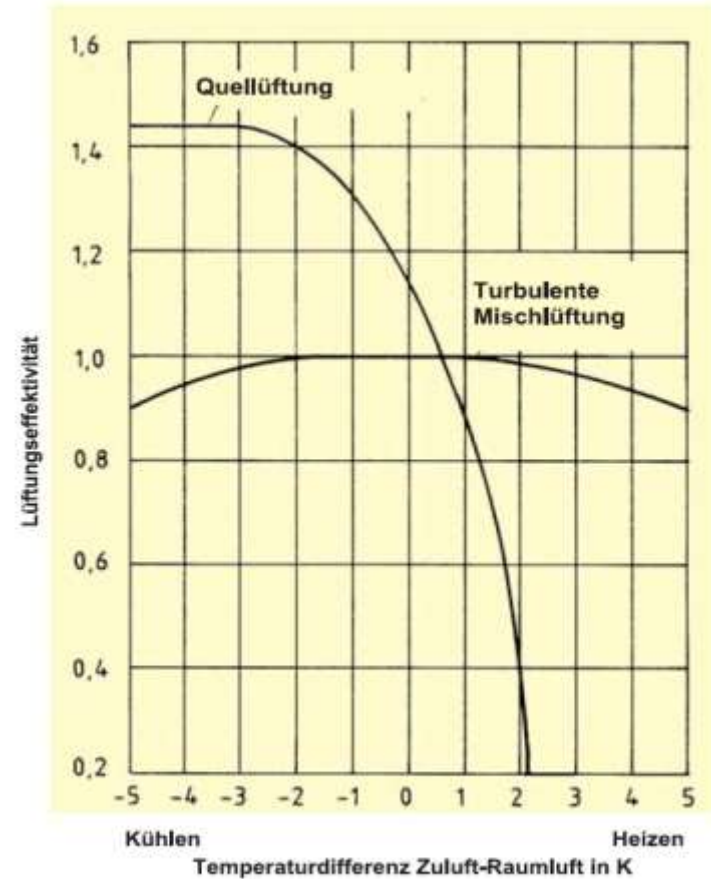


Abb.4 Lüftungseffektivität im Kühl- und Heizfall

Quelllüftung und ihre Anwendungsbereiche, KLIMA/LÜFTUNG FACHJOURNAL 2002/03, Dr.-Ing. Franc Sodec



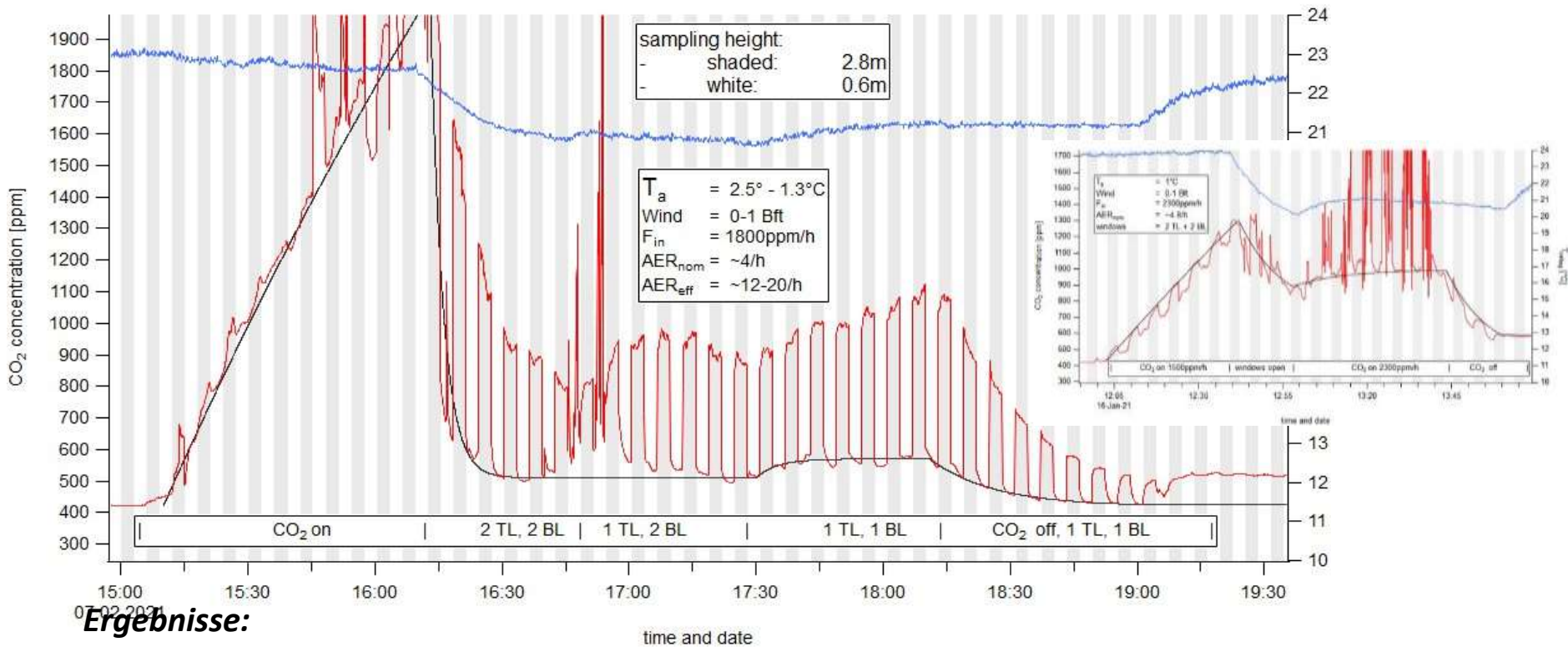
# Messung Kipplüftung, Quelllufteinlass



- Oberlichter 180 x 50 cm
- Unterlichter 180 x 50 cm
- Freie Öffnung der Kippfenster oben ca. 11cm
- Folienabdeckung an Unterlicht leitet die Luft an den Boden unterhalb und vor die Heizung.



# Messungen Kipplüftung, Bodeneinlass



## Ergebnisse:

- Durch Kipplüften, nur 1 Oberlicht / 1 (abgedecktes) Unterlicht, erreichen wir mit **4/h nominell** bei Außentemperaturen von 1-3°C **leicht** UBA / IRK (>3/h).
- Infolge der **Stoffgradienten** (bis **Faktor 5** oben/unten) sind **Schadstoffreduktionen** erreichbar, für die bei Mischlüftung Luftwechselraten von **12-20/h** erforderlich wären.

# Empfehlungen des UBA (Umweltbundesamt) und der IRK (Innenraum-Lufthygiene Kommission am UBA)



Zitate aus

<https://www.umweltbundesamt.de/richtig-lueften-in-schulen#wie-funktioniert-richtiges-luft-im-schulalltag>,  
15.10.2020

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/irk\\_stellungnahme\\_lueften\\_sars-cov-2\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/irk_stellungnahme_lueften_sars-cov-2_0.pdf), 12.8.2020

UBA: „Lassen sich in Unterrichtsräumen die Fenster nicht öffnen, ist zu prüfen, inwieweit die Lüftungssituation verbessert werden kann. Neben Maßnahmen ... sind **in die Fensterbereiche eingebaute Zu- bzw. Abluftanlagen** als baulich schnell realisierbare Option denkbar. Sind solche Maßnahmen nicht möglich, sind solche Räume aus innenraumhygienischer Sicht nicht für den Unterricht geeignet.“

**Fragestellung:**

- Welche Verbesserungen lassen sich durch einfache Zu- und Abluftanlagen in der Praxis bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen / Umweltbedingungen erreichen?

- Dezentraler Aufbau
  - Niedrigste Anforderungen: Steckdose, 2 kippbare Fenster/Ober-/Unterlichter
  - Niedrigste Umbaukosten, keine Änderung an Fassaden, im Bestand möglich
  - Niedrigste Betriebskosten
  - Einfache, individuelle und intuitive Bedienung.
- Ausnutzen einfacher Physik
  - Gleichrichtung der Strömungsrichtung von technischer Anlage und natürlicher Konvektion.
  - Reduktion der konvektiven Mischung von Zu- und Abluft.
  - Schadstoffreduktion durch Erhöhung der Lüftungseffizienz.
  - Verteilte Zuluft und gezielte Absaugung der Abluft.

Höchstmögliche Lüftungseffizienz mit geringstmöglichen Luftwechselraten  
-> Energieeinsparung, weniger Lärm, weniger Zuglufterscheinungen.

# Auftriebsvolumenströme

Aus Rietschel und Fitzner:

Aufgrund der hohen Wärmelasten von **30-50W/m<sup>2</sup>** werden außer im Sommer Temperaturgradienten weit über **2K/m** erreicht.

Bereits **ohne Wärmelasten** erreichen wir in „unserem“ Klassenraum **1.3K/m**.

Die Nutzung von Quelllufteinlässen verstärkt insbesondere bei niedrigen Raumtemperaturen diesen Effekt weiter. Bei Außentemperaturen von **~0°C** erreichen wir bis zu **3K/m**.

Damit müssen wir in 2m Höhe mit **Auftriebsvolumenströmen von max. ca. 40m<sup>3</sup>/h/P** rechnen.

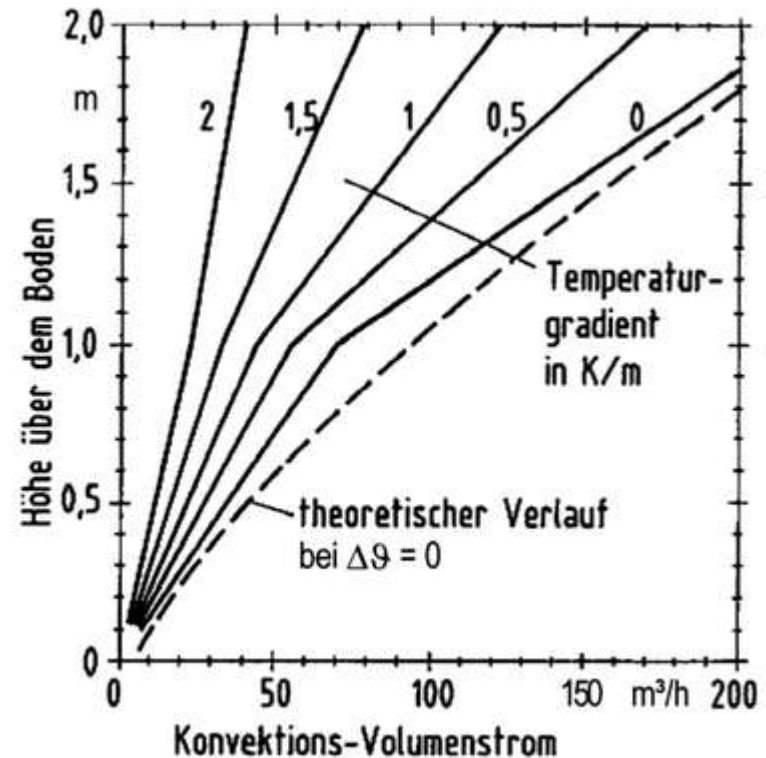
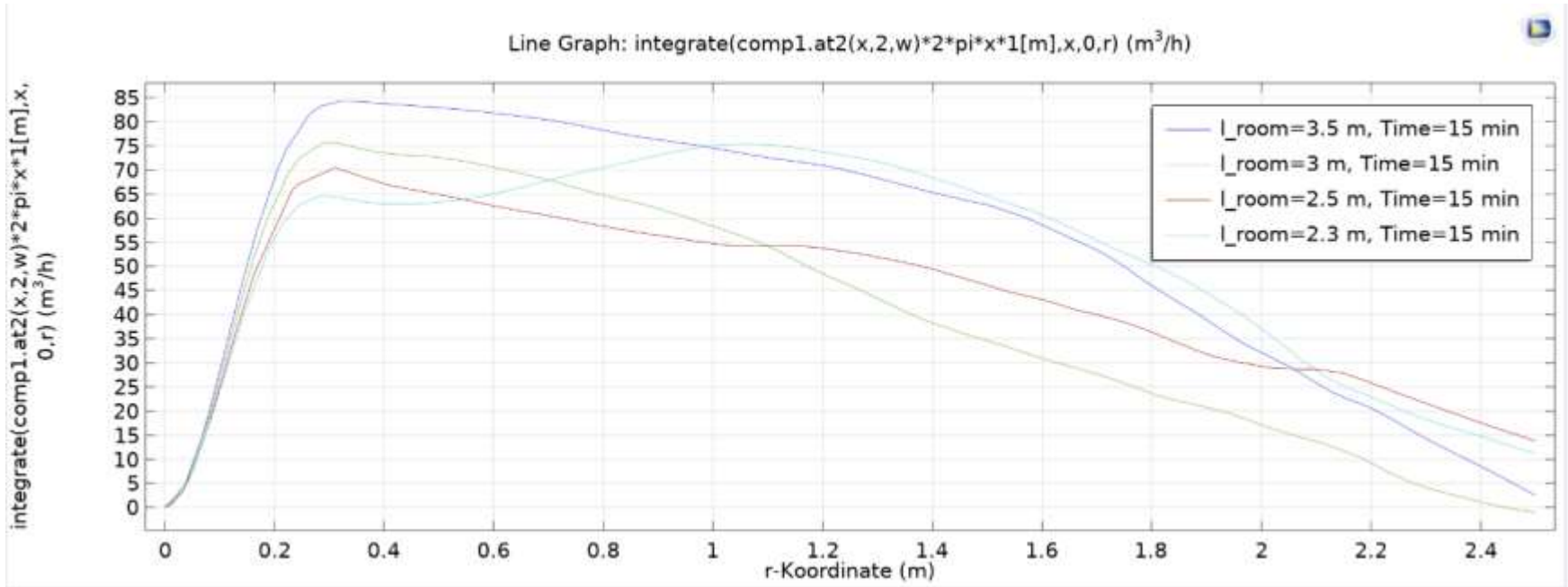


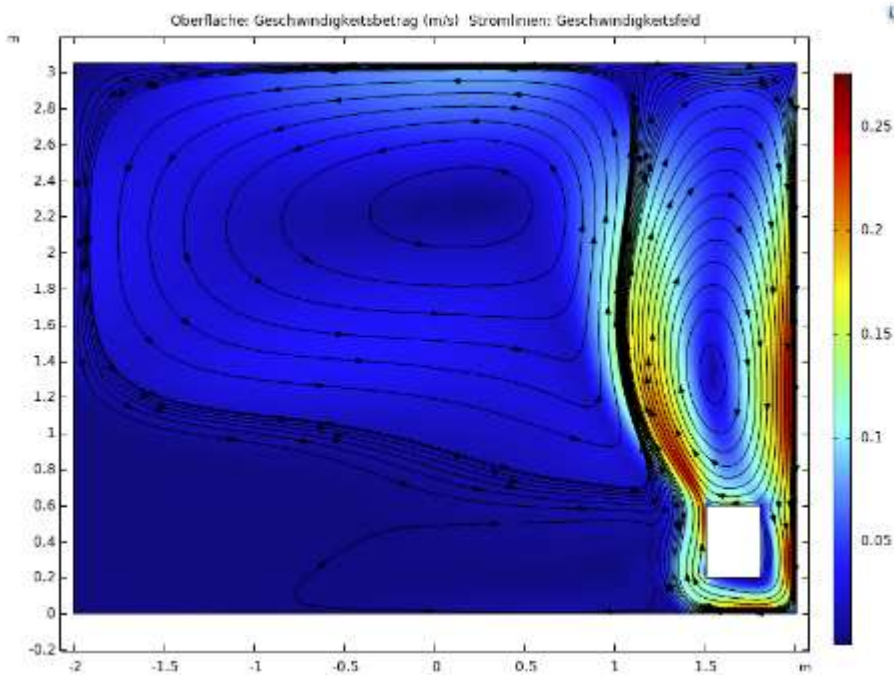
Bild F3-4 Von **einer** sitzenden **Person** nach oben geförderter Volumenstrom bei unterschiedlichen Temperaturanstiegen im Raum

# Auftriebsvolumenströme, simuliert



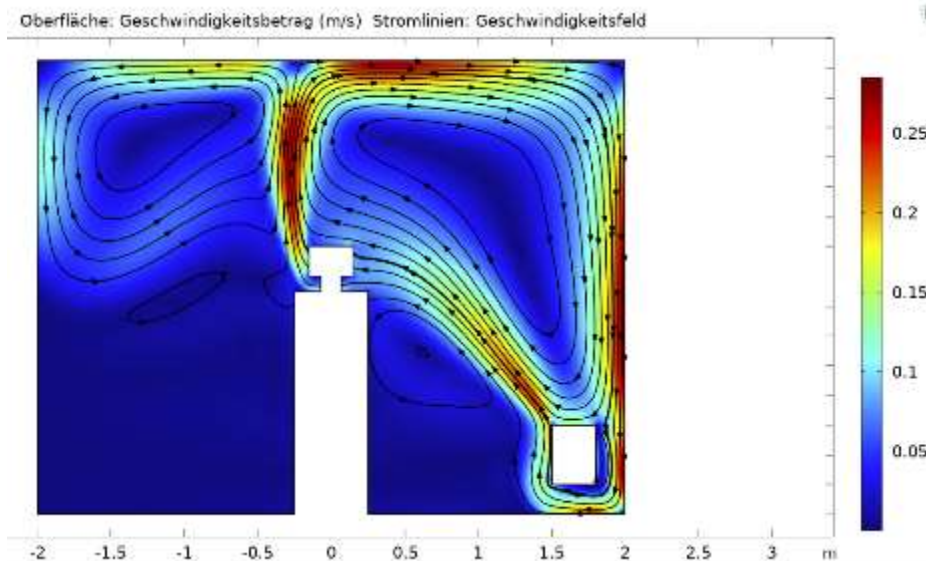
- Integral des Auftriebsvolumenstroms über den Radius in Abhängigkeit von der Raumhöhe, 2K/m, Thomas Klimach 2020.
- Nimmt man den Auftriebsvolumenstrom einer Person bei moderaten Temperaturgradienten mit ca.  $70\text{m}^3/\text{h}$  in Schirmhöhe (2m) an, würde man erwarten, bei einem Fluss von ca.  $20\text{l/s}$  einen Großteil des Auftriebsvolumenstroms und damit der emittierten Schadstoffe absaugen zu können.

# Fenster & Heizung: ein strömungstechnisches Problem?



- links: ohne Mensch, Heizung und Fenster generieren eine sehr begrenzte Konvektionszelle, erzeugt aber sekundäre Zirkulationen.

- rechts: mit „Mensch-Wand“, Konvektion in der Nähe des Menschen durch sie/ihn dominiert.



# Ventilator Durchsatz (eingebaut)

- Standventilator 360mm OD Bomann VL 1136S CB

power [W]	22	25	<b>32</b>		
pressure [Pa]	3.8	5.3	7.8		
air speed [m/s]	0.7	1.0	1.4		
air flow [m <sup>3</sup> /h]	238	340	<b>476</b>		

- Professioneller 300mm OD EC Axialventilator EBM Papst W3G300-CK13-32

power [W]	15	21	<b>27</b>	35	43	52
pressure [Pa]	12.2	15.7	19.8	24.3	28.4	33.4
air speed [m/s]	1.9	2.1	2.35	2.6	2.8	3.1
air flow [m <sup>3</sup> /h]	646	714	<b>799</b>	884	952	1054



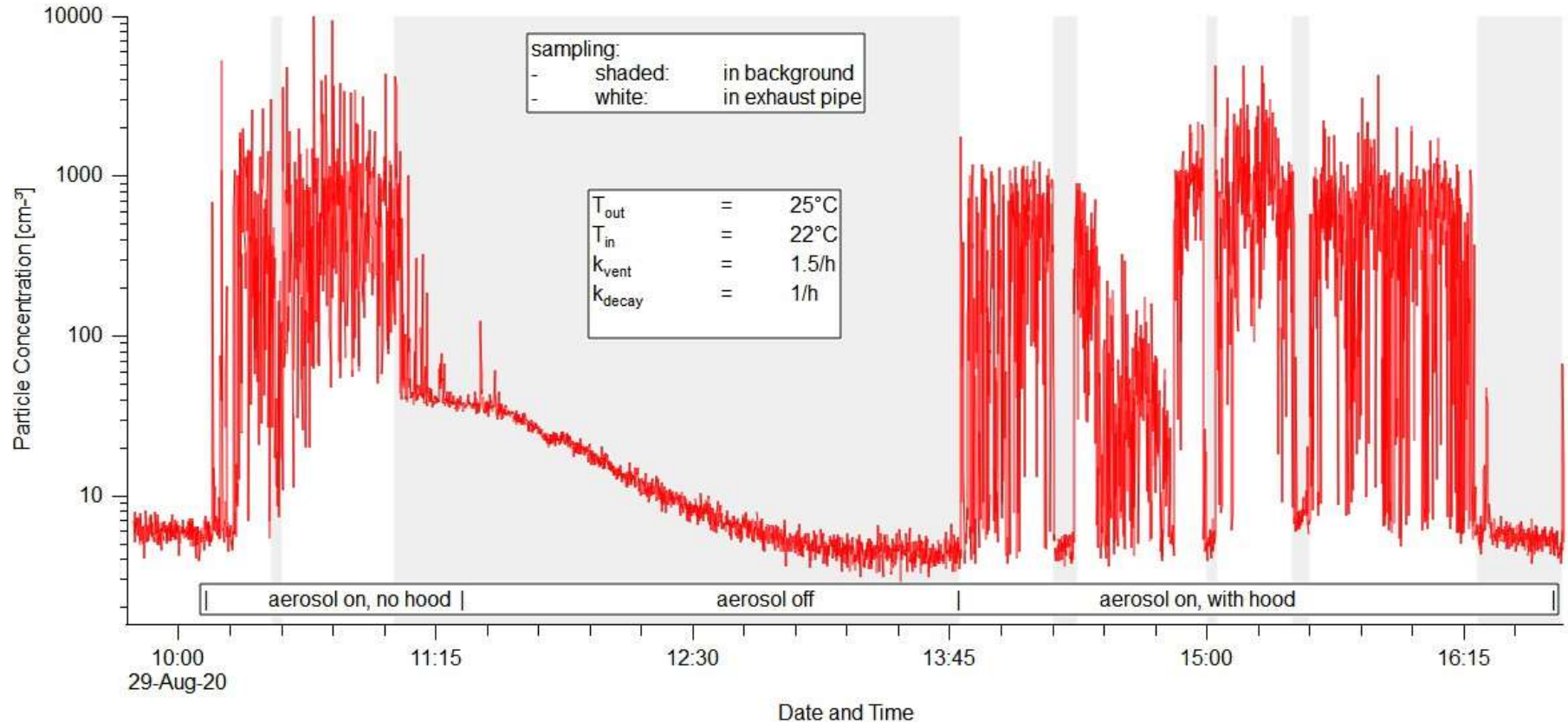
# Testaufbau



- Abluftanlage, beheizte „Körper“, Aerosolquelle, Sammeleinlass



# Erste Aerosol Messungen



- Ab 15:40 mit „ausgeschalteten Attrappen“, reduzierte Konvektion

## Results:

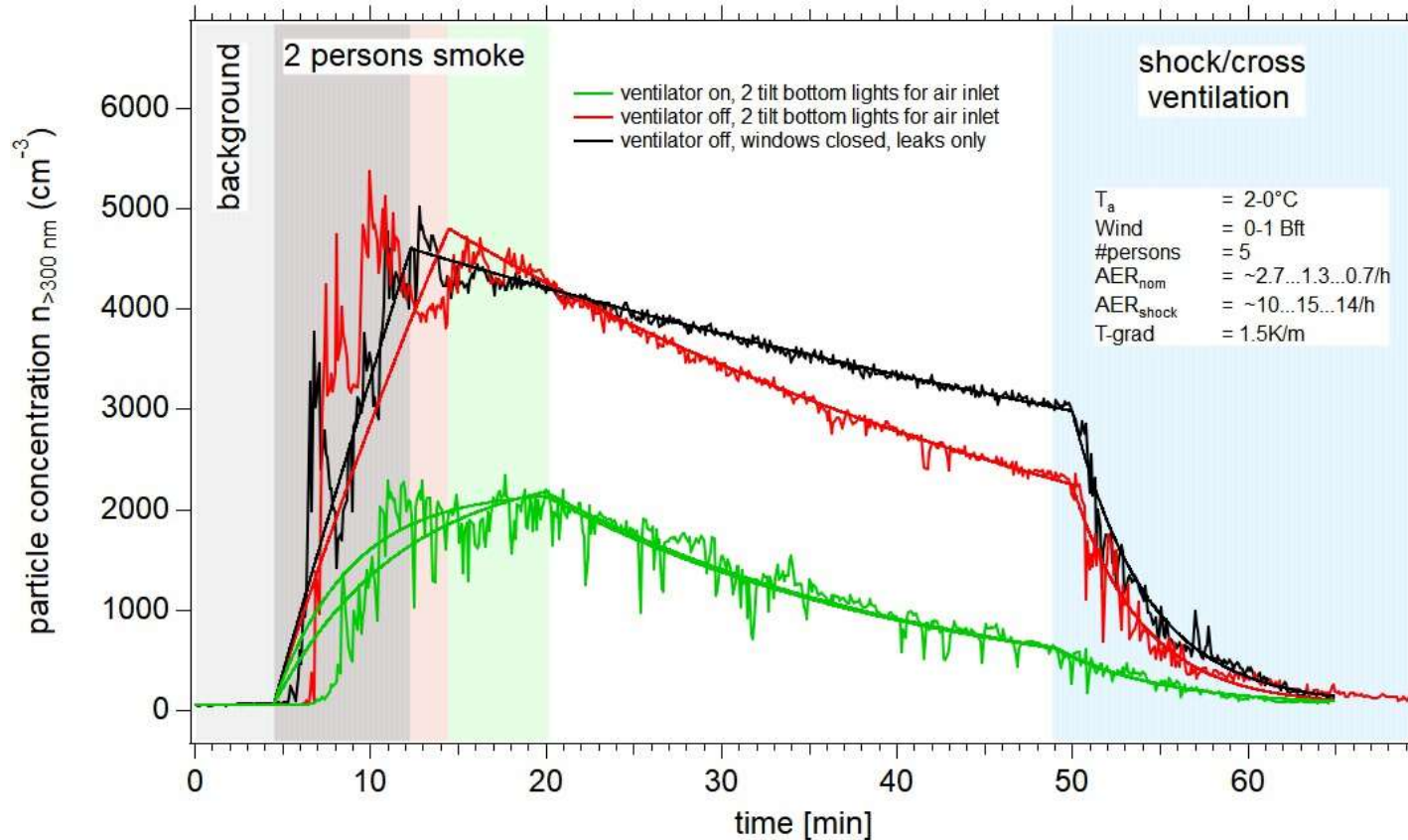
- direkter Absaugeffekt ohne Hauben: **55%**, mit Hauben: **97%**

## unter günstigen Bedingungen:

- Wenig Wind, wenig Querströmung, semi-reales Labor Experiment.

# Raucherexperiment

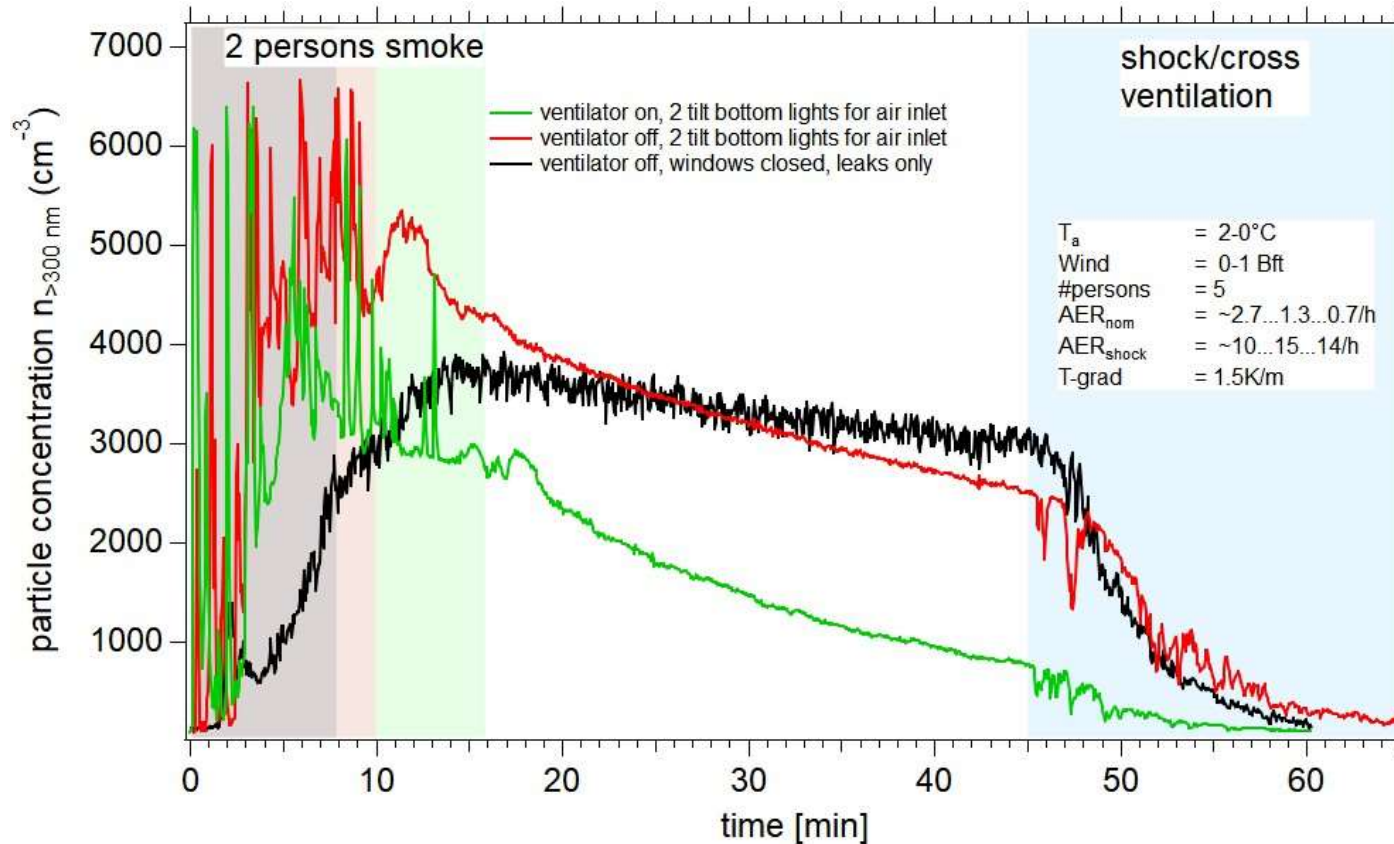
## Hintergrund Messung



Fits:

x \ y	dN/dt_1/h	N_total	AER_fit	AER_eff	AER_shock
vent on	20000	5170	2.7	8.3	10
vent on	30000	7750	2.7	<b>14</b>	10
vent off	33000	5500	1.3	1.8	15
windows closed	36500	4870	0.7	0.7	14

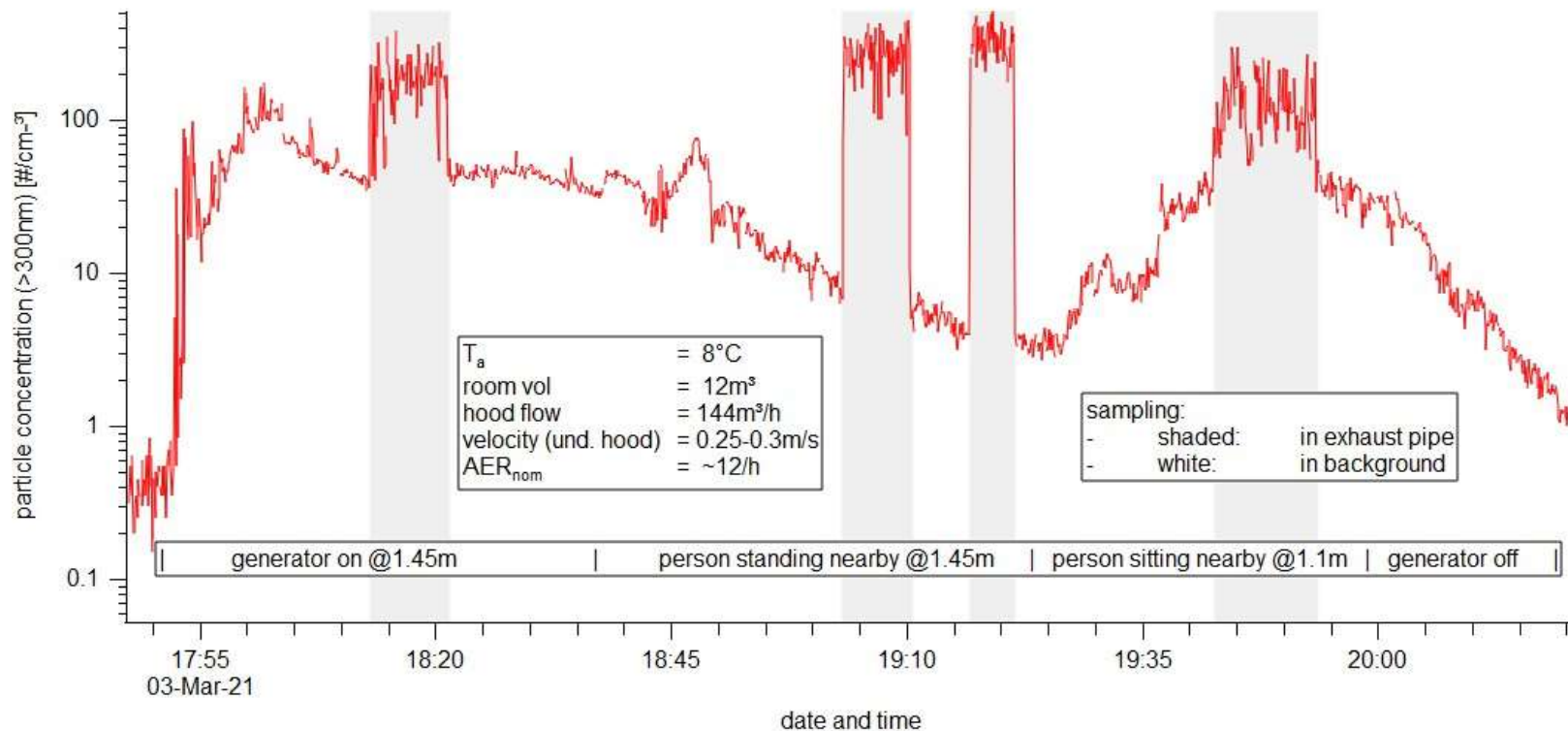
## Messung im Sammelrohr



### Result:

- Unter der Annahme ähnlicher Gesamtpartikelemission (konservativ) werden ~70% Direktabsaugung,  $AER_{eff} \sim 8/h$ , erreicht.

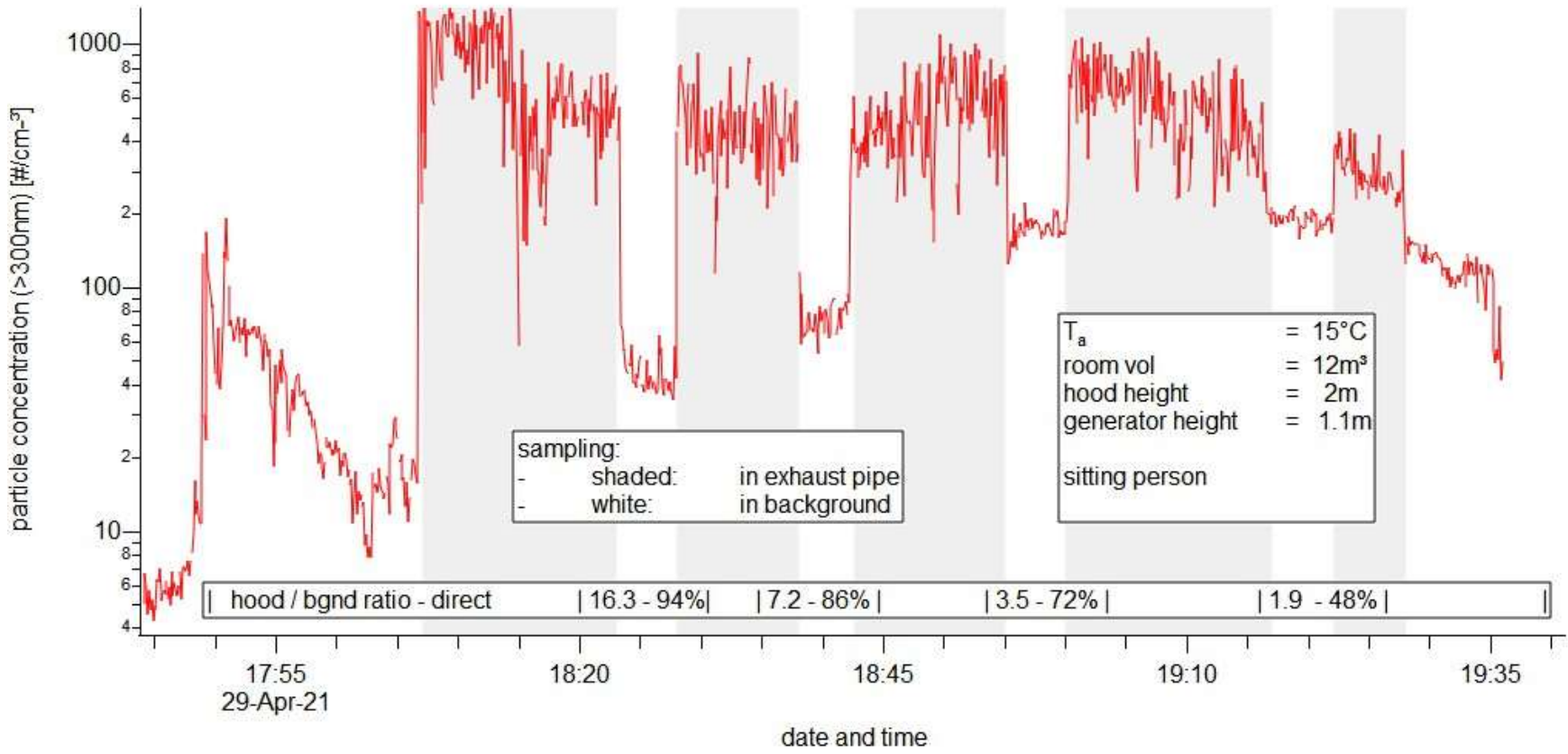
# Effizienz von Einzelhaube (coop. Hella Riede)



## Results :

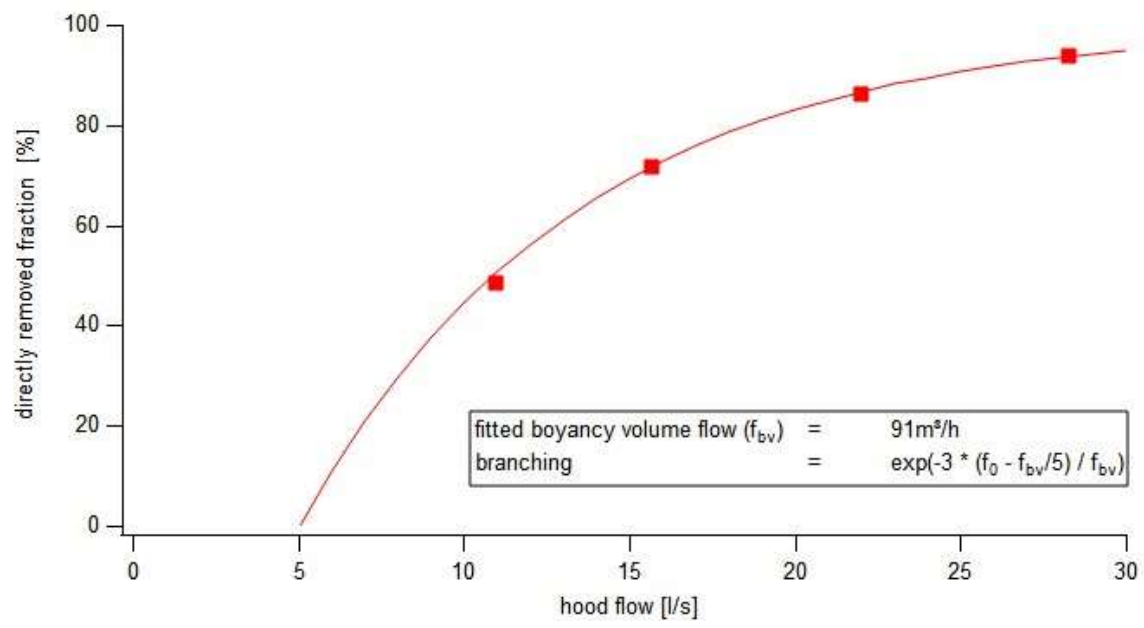
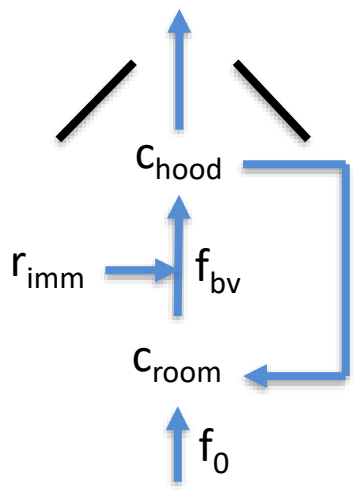
- Frei stehender Generator (fast kein Auftriebsvolumenstrom): Faktor 5 (80%) Reduktion.
- Begleitet durch stehende Person: Faktor 100 (99%) Reduktion.
- Begleitet durch sitzende Person : Faktor 5 (80%) Reduktion.
- **Entscheidend für die Haubeneffizienz sind Wärme der Person, latente Wärme der Quelle, Querströmungen, Abstand zur Haube, Flussrate.**

# Effizienz von Einzelhaube (coop. Hella Riede)



	airspd [m/s]	flow [l/s]	tube	bgnd	ratio	direct
0	3.6	28.26	544	39	16.3	93.87
1	2.8	21.98	429	65	7.169	86.05
2	2	15.7	528	154	3.527	71.65
3	1.4	10.99	380	199	1.938	48.4

# Effizienz von Einzelhaube vs. Haubenfluß



## Results:

- steady state Modell:

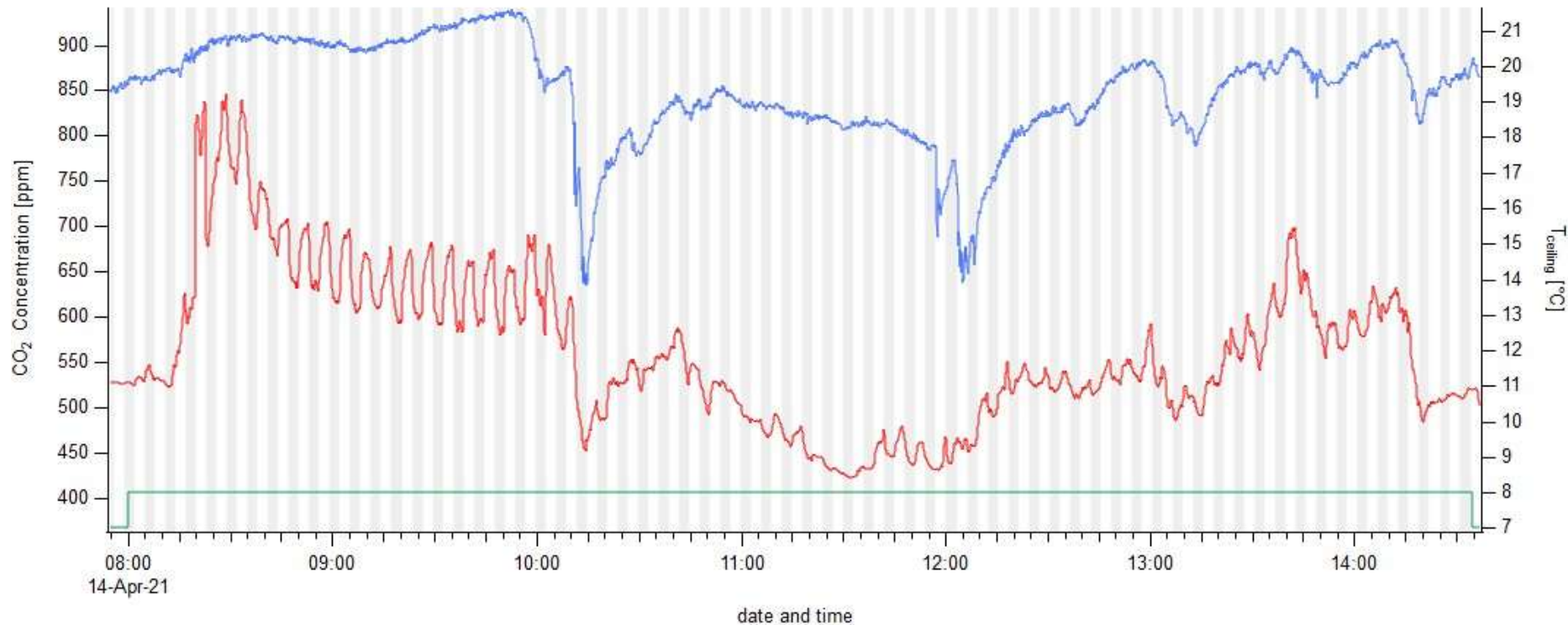
$$C_{hood} = r_{imm} / f_0$$

$$C_{room} = \text{branching} * C_{hood}$$

Direkter Haubeneffekt gut beschrieben im Bereich 10...30 l/s Haubenfluß.

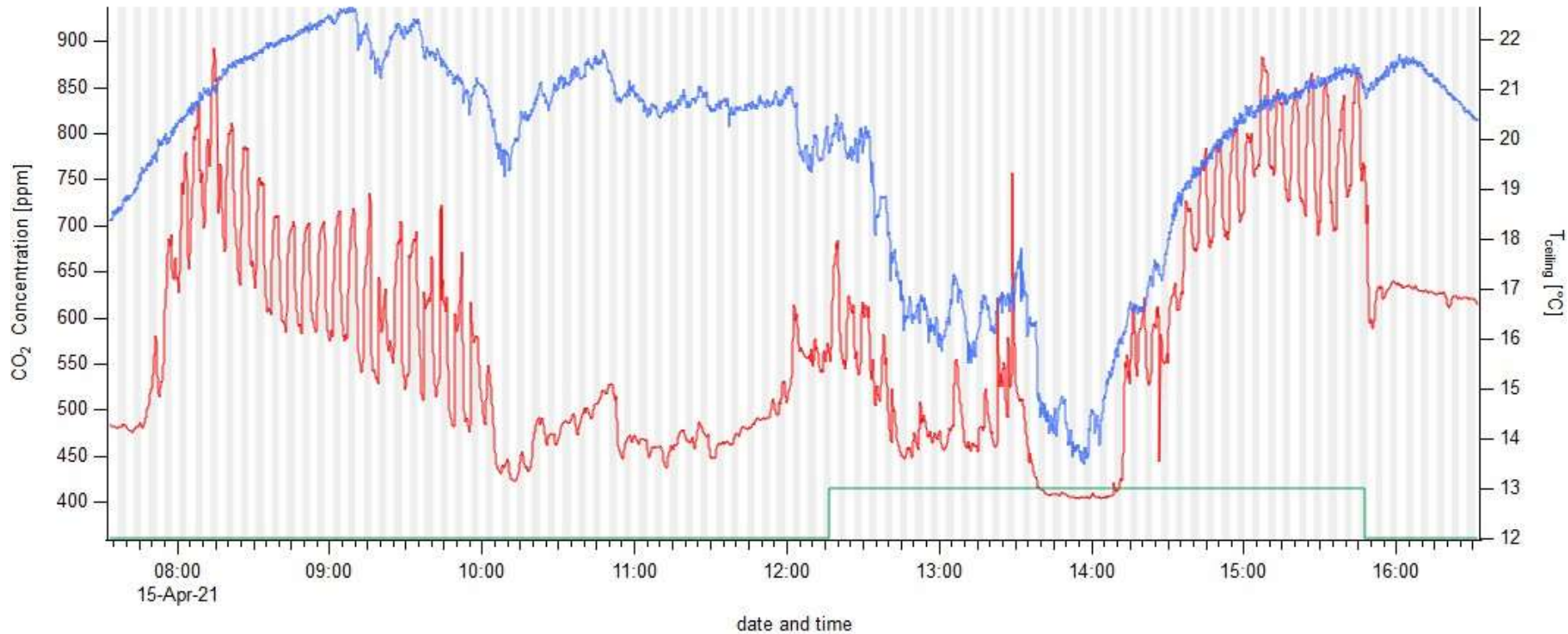


# Ventilation, Hauben, Bodeneinlass, 12 reale Schüler



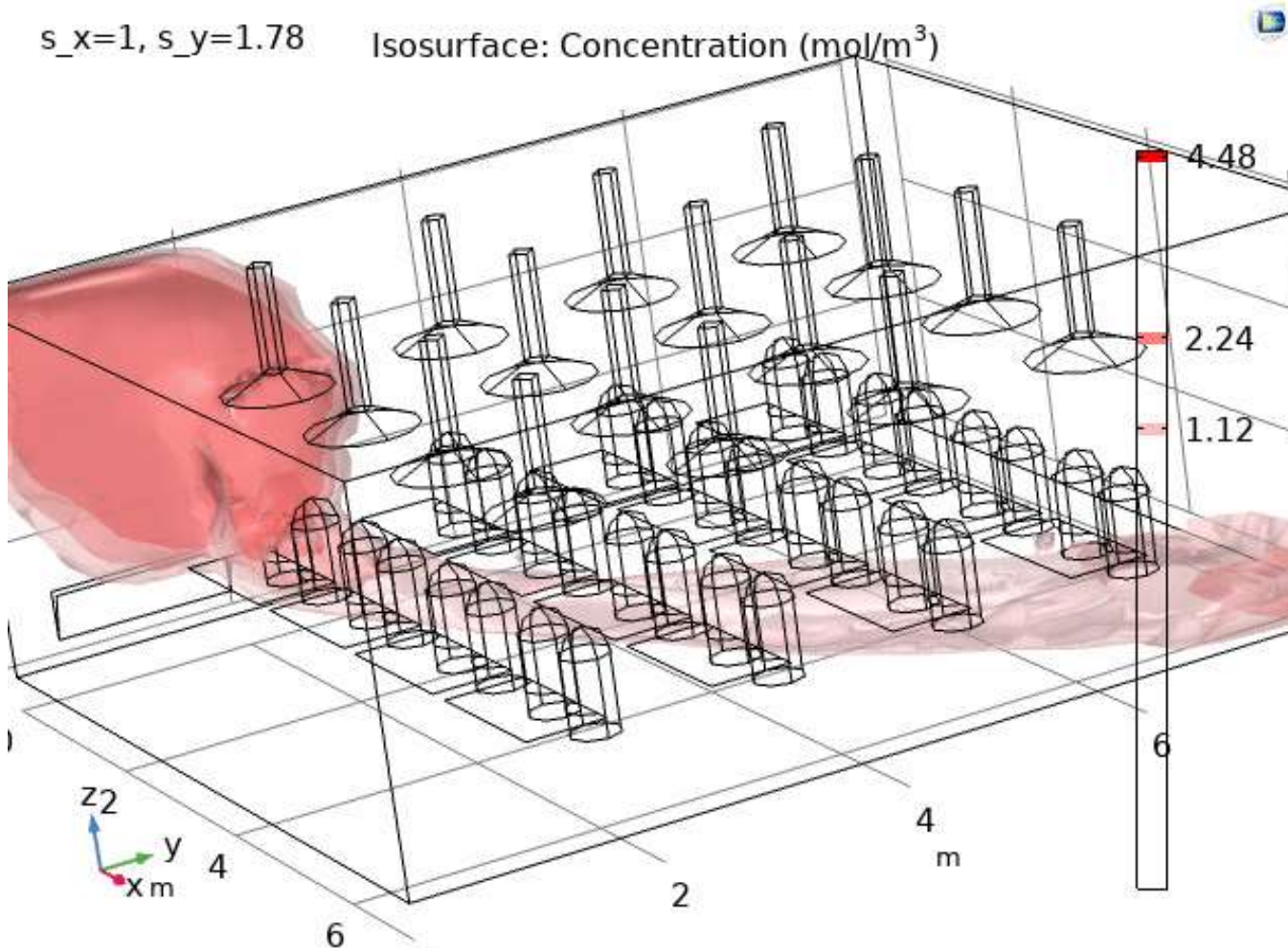
## Results:

- hohe Werte in Abluftrohr, niedrige Werte unter der Decke (2.8m)
- Konzentrationsunterschiede Abluftrohr – Decke bis zu Faktor 1.4
- Hauben Effekt 300ppm / 100ppm  $\sim$  3
- nominale Luftaustauschrate  $\sim$  3.5/h
- Effektive Luftaustauschrate in „Nasenhöhe“ ca. 1000ppm/h / 100ppm  $\sim$  10/h

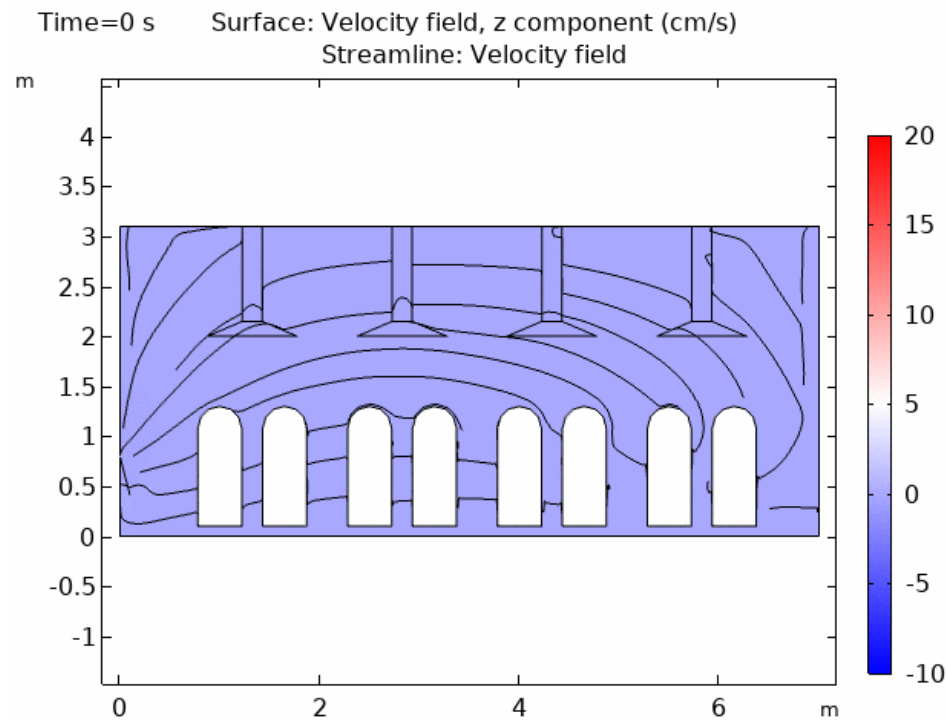


## Results:

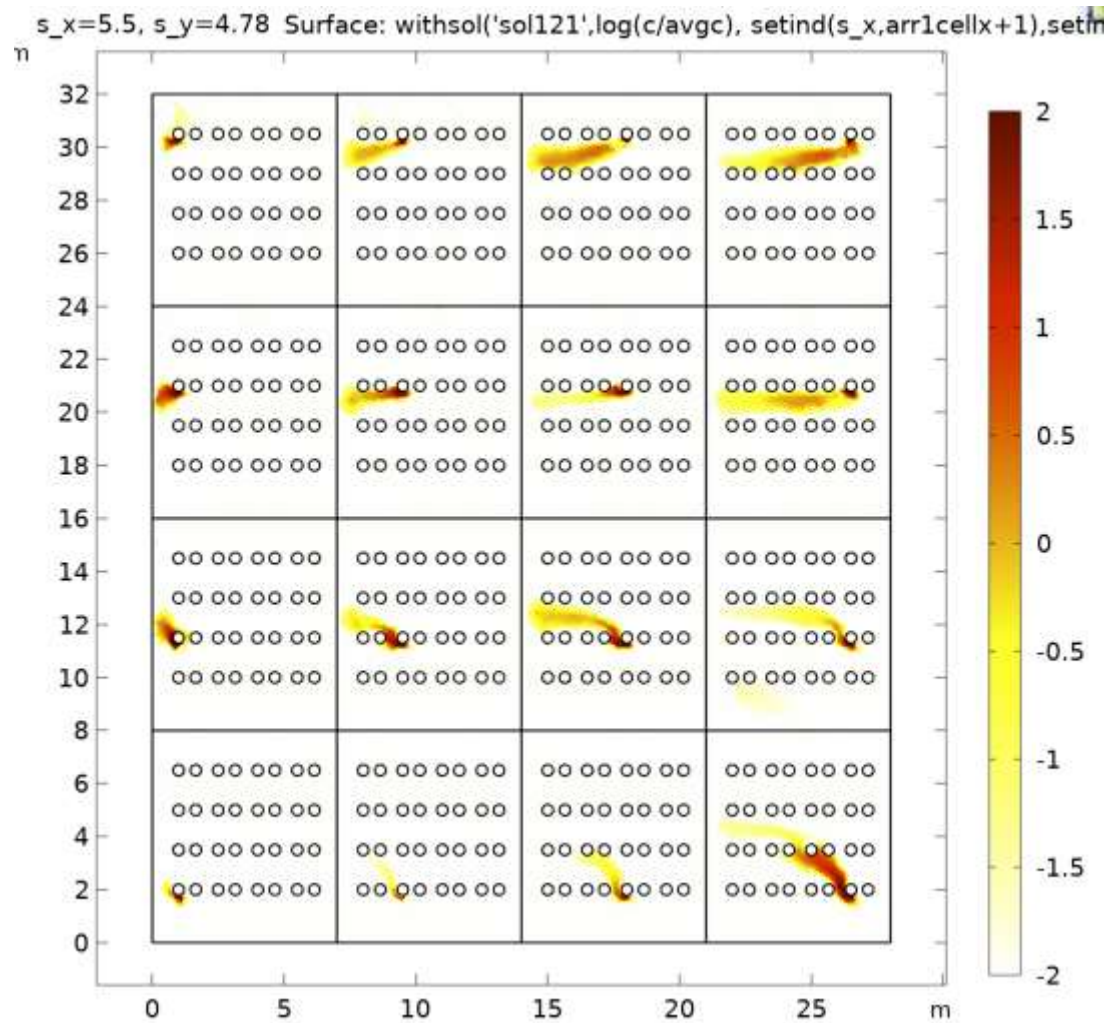
- ohne ventilator Konzentrationsunterschiede 2.0m – 2.8m bis zu Faktor 2
- mit Ventilator Haubeneffekt 450ppm / 150ppm ~ 3
- nominelle Luftwechselrate ~ 3.5/h
- effektive Luftwechselrate ca. 1000ppm/h / 140ppm ~ 7/h



- Konzentration einzelner Aerosol Emitter

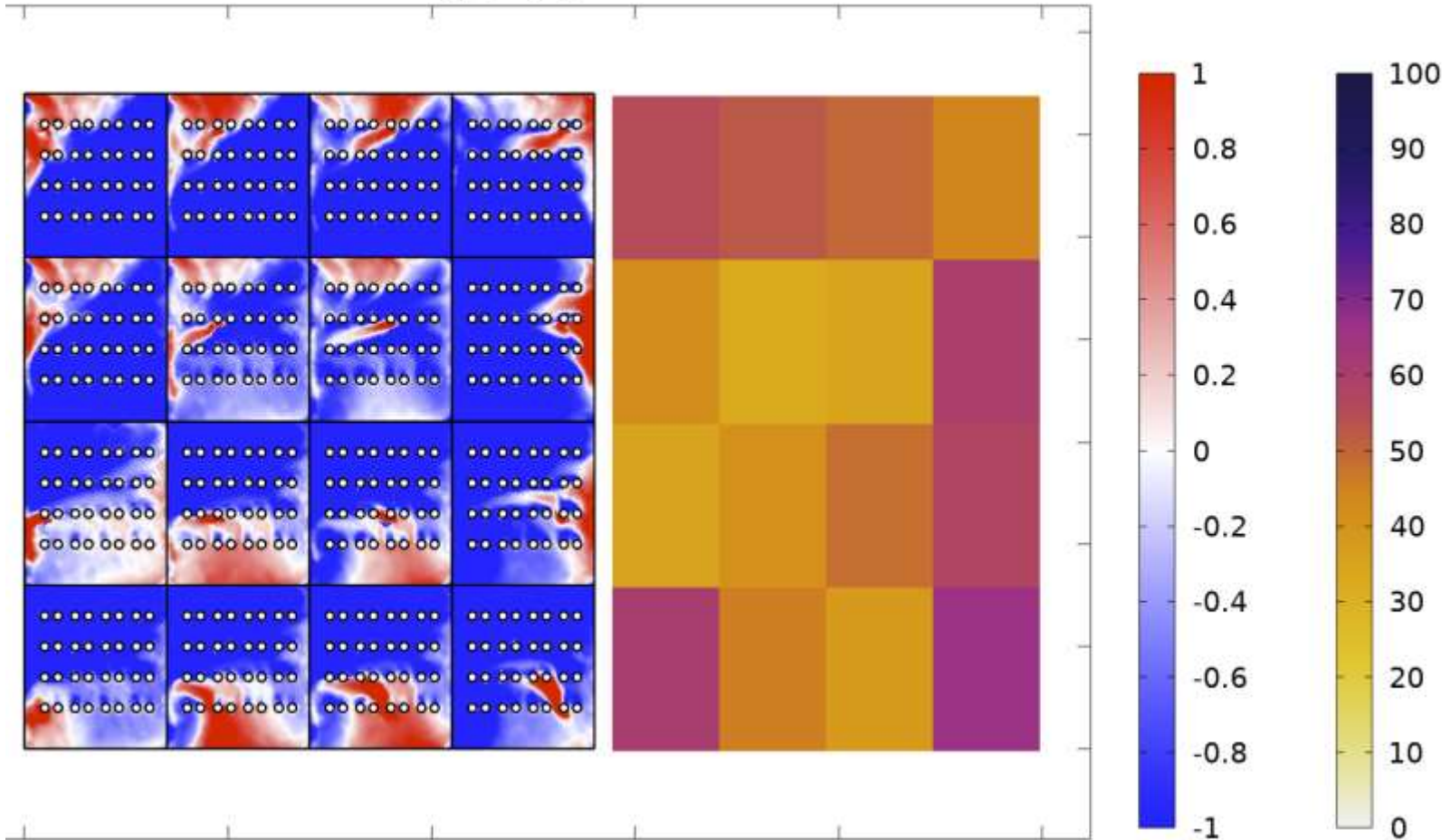


- Geschwindigkeitsfeld z Komponente, 5°C outside, Heizung an



- Horizontales Geschwindigkeitsfeld / Konzentrationsfeld horizontaler Schnitt in Nasenhöhe (1.1m), 5° außen

Surface:  $\log(c/\text{avgc})$  / Direct-Effect

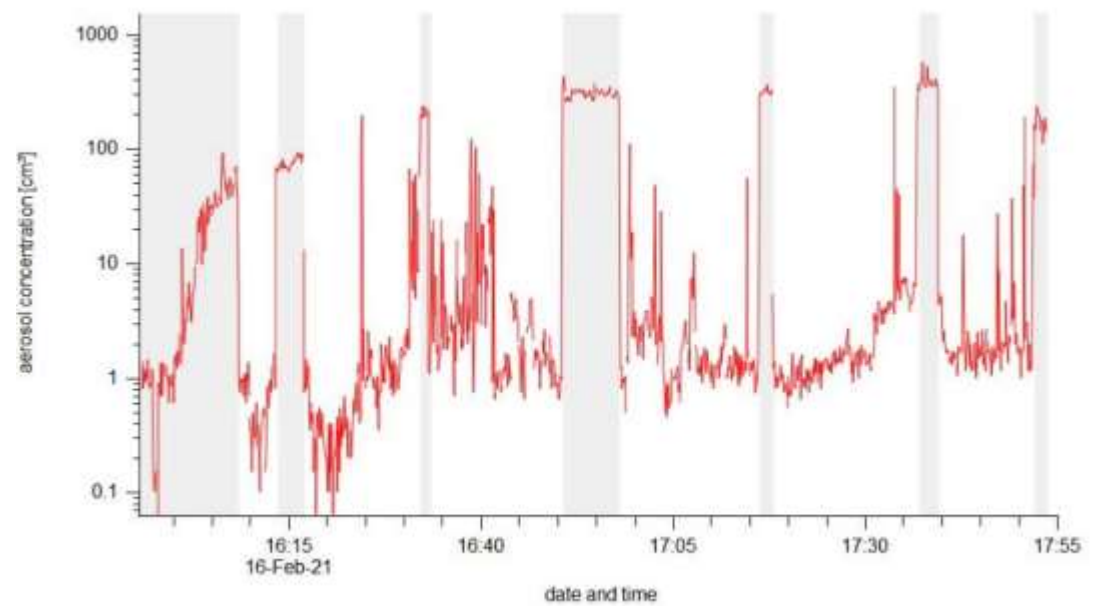


- Horizontales Geschwindigkeitsfeld / Konzentrationsfeld horizontaler Schnitt in Nasenhöhe (1.1m), 12°C außen

# Was geht mit „Frischluftduschen“?



Fotos: Hella Riede



- „Laminar“ flow gebaut aus Folienrohr und Schal
- Frischluft Außentemperatur ~5°C und ~15°C
- Frischluft Fluss **20l/s**, Luftwechselrate 6/h
- Luftgeschwindigkeit **0.25-0.3 m/s**
- Start des Aerosol Generators um 16:00, Aufbau der Hintergrund Konzentration
- Schattiert: Hintergrundmessung, weiß: auf Nasenhöhe.
- Hintergrund Aerosol **Unterdrückungsfaktor 70-300.**

## ***Ergebnisse:***

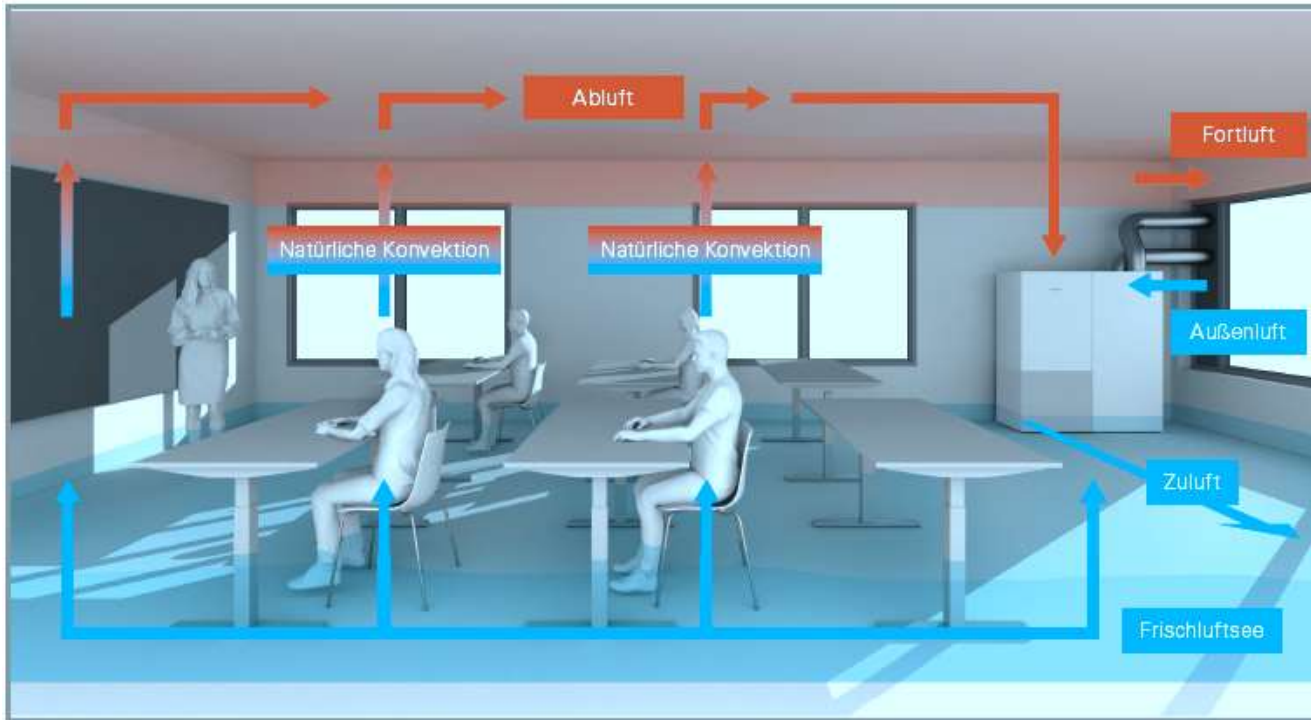
- Das MPIC Fensterlüftungssystem erreicht effektive Luftwechselraten für Aerosol von **6/h ... 20/h**, ungünstige ... günstige Bedingungen.
- Die Anforderungen von IRK / UBA für Klassenräume werden **vollständig erfüllt**, das System wäre sogar nützlich **für Fitnesscenter** (>5/h).
- Im Niedrig-Fluss-Regime ist die Gesamtleistung des Systems eine **nichtlineare** Funktion der Haubenflussrate. Bei mittleren Temperaturen kann der Fluss erhöht werden, womit gleichzeitig nominelle **Luftwechselrate und Haubeneffizienz** erhöht werden.

## ***ToDo:***

- Aerosol Messungen im Unterricht (zurückgestellt wegen lock downs).
  - Simulationen zur Quantifizierung der beteiligten Effekte.
-



# Kommerzielle Lösung - Viessmann Vitovent 200 P



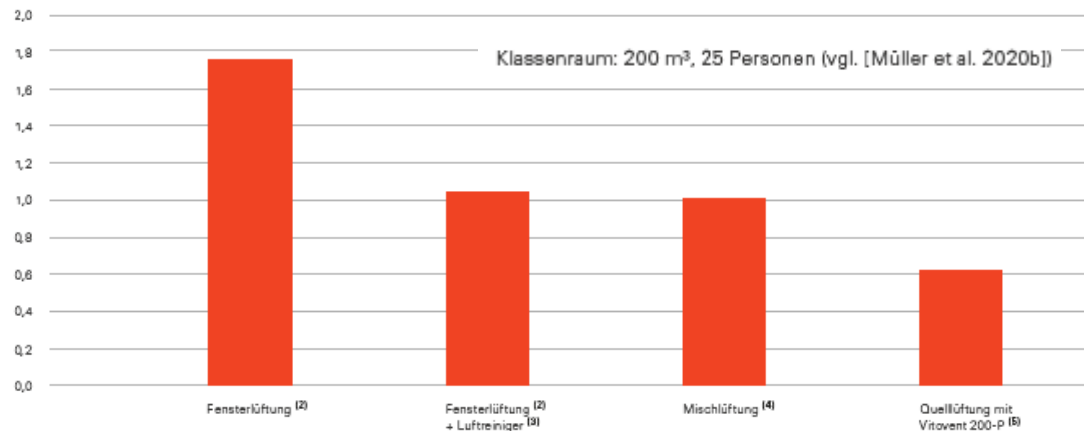
Kombiniertes Lüftungs- /  
Raumluftreiniger System  
mit „eingebauter“  
natürlicher Konvektion.

Referenz Szenario nach  
Müller: 850m<sup>3</sup>/h.

Daten zur Validierung  
des Quelllufteffekts  
waren auf Anfrage nicht  
erhältlich.

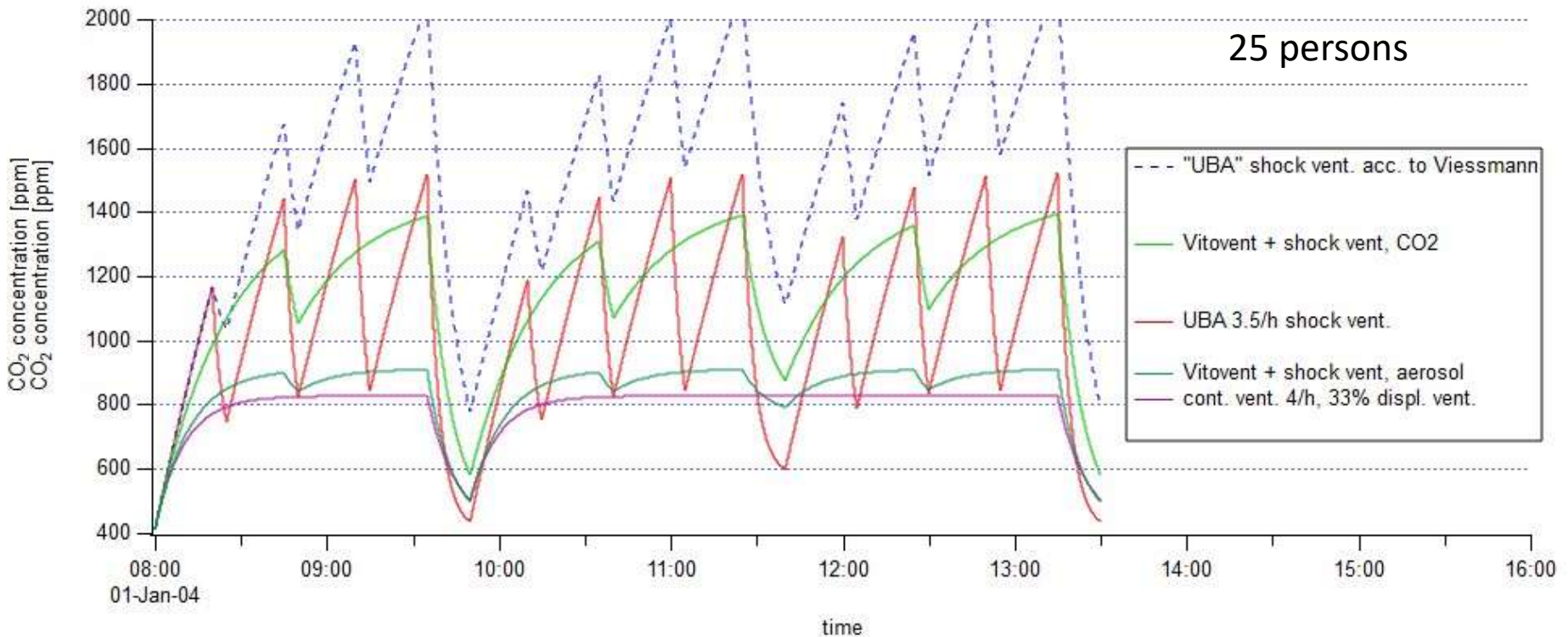
D. Müller et al. *Empfehlung zum  
erforderlichen Luftwechsel in  
Schulen, Großraumbüros,  
Hörsälen und Turnhallen zur  
Reduzierung eines  
aerosolgebundenen  
Infektionsrisikos*, White Paper,  
RWTH-EBC 2020-004, Aachen,  
2020, DOI: 10.18154/RWTH-  
2020-10366

Relatives Infektionsrisiko (vgl. [Müller et al. 2020b])



# Viessmann Vitovent 200 P - Faktencheck

25 persons



Viessmann Produkt information:

„Im Betrieb von Vitovent 200-P ist eine Bewertung des aktuellen Lüftungsbedarfs durch mobile CO<sub>2</sub> Messgeräte (CO<sub>2</sub> Ampeln) nur eingeschränkt möglich. ... Daher müssen die CO<sub>2</sub> Werte zur Ermittlung des Lüftungsbedarfs für den Infektionsschutz beim Vitovent 200-P im Vergleich zu mobilen CO<sub>2</sub> Messgeräten höher angesetzt werden.“

„UBA“ cf. Viessmann	Vitovent + Stoßlüften	UBA Stoßlüften 3.5/h	Dauerlüften 4/h
2/h	2.8/h	3.5/h	6/h

# Viessmann Vitovent 200 P - fact check

Anspruch	Realität	erfüllt
UBA fordert 6/h während offener Fenster	UBA fordert > 3/h <b>im Mittel</b>	nein
40% Quelllufteffekt	25% vgl. CO <sub>2</sub> Plot, nicht spezifisch für 200-P, abgeschwächt durch Wärmerückgewinnung	nicht klar
„...sorgt für fast 100% gereinigte Luft.“	>30% zus. Frischluft wegen CO <sub>2</sub> erforderlich	Nein
„Lüften alleine reicht nicht aus“	Stoßlüften < 8°C, Dauerlüften > 8°C passt	nein
„HEPA Filter entfernt 99.99% aller Viren“	HEPA Filter reduziert Virus Konz. um ~40%	nein
„Durch integrierte Wärmerückgewinnung... geht nur sehr wenig Heizenergie verloren“	meistens eher kontraproduktiv - während des Unterrichts wird kaum Heizung benötigt.	ja, aber nutzlos
„Die Feuchterückgewinnung ... sorgt für Wohlfühlklima im Raum “	Sommer: kontraproduktiv, Frühling, Herbst: irrelevant, Winter: wenig Feuchtigkeit vorhanden zum regenerieren	Nein
„...innovatives und effektives System für optimale Lufthygiene im Klassenraum...“	s.o., zusätzliches Stoßlüften erforderlich, zu geringe Frischluftkapazität, „intelligente“ Regelung erhöht Infektionsrisiko.	nein

„suff.“: according to reference scenario

# Zusammenfassung und Vergleiche:

- Stoßlüften: macht nur Sinn, wenn Außentemperatur niedrig und Fensterspalt nicht fein einstellbar ist.
  - Dauerlüften: kann bei geeigneter / optimierter Fensterfront und Einlass erhebliche hygienische bzw. energetische Vorteile haben.
  - Quelläftung: können bei erheblichen vorhandenen Wärmelasten (Klassenraum) enorme Vorteile bringen, bis zu Faktor 4.
  - Hauben: bringen abhängig von Flussrate und Design und Setting einen Faktor 2 - 10.
  - Kippfenster: im Prinzip wirksam, aber besonders bei niedrigen Temperaturen oder Wind schwer dosierbar.
  - CO<sub>2</sub> Messgeräte: Ampeln „problematisch“, digital anzeigende Geräte im Prinzip nutzbar.
  - Luftreiniger lüften nicht. In Kombi mit dem weiterhin nötigen Stoßlüften geringe Effekte, Faktor 1.3 – 1.7.
  - Masken: Community ca. Faktor 2-3, FFP2 ca. Faktor 5 (lecklimitiert).
  - Wärmerückgewinnung kann man machen, muss aber nicht, zugluftlimitiert.
  - Konvektoren: besser Radiatoren benutzen.
-

## ***Herausforderungen Projektierung:***

- Budget: projektiertes Limit der Materialkosten: ca. 10 Euro pro Schüler
- Brandschutz: minimale Mengen an unbedenklichen, einfach bearbeitbaren Materialien
- Baurecht: keine Änderungen an Fassaden oder Fenstern
- Statik: Umgehung von Befestigungsproblemen durch minimales Gewicht

## ***Herausforderungen Umsetzung:***

- Behörden, Verbände, Vereine (z.B. DGUV), Experten:  
wegen Budget, Brandschutz, Baurecht, Statik, LÜAR, VDI 6022, DIN EN 12599, ...
  - Werkzeug: Entwicklung von laientauglichen Werkzeugen zur schnellen rationellen Fertigung der Komponenten
  - Humankapital: Organisation der Integration mit Firmen, Eltern und Schülern im Rahmen von Projektwochen.
-

- Stoßlüften reicht aus.
- Lüftungseffekt nicht nachgewiesen. Aerosolabsaugung nicht nachgewiesen.
- negativen Strömungseffekte, Querströmungen, Hauben funktionieren nicht.
- Energieverschwendung.
- „Selbstgebaute“ Anlagen (von Laien) aus „Baumarktmaterialien“ können erforderlichen Luftaustausch nicht sicherstellen.
- Keine Zuluft oder fehlende Kontrolle der Zuluft.
- Verschleppung kontaminierter Luft durch die Tür.
- Zu schwache Ventilatoren, Windeinfluss.
- Rezirkulation kontaminierter Luft.
- Fensteranschlüsse nicht sturmsicher, Einbruchssicherheit nicht gegeben.
- Nicht nachhaltig, geringe Lebensdauer.
- Brandschutzauflagen verletzt.
- Arbeitsschutzauflagen verletzt, Straßenlärm, Lärm vom Flur.
- VDI 6022, DIN EN 12599 nicht beachtet, kein CE, Kondensation, Hygiene.
- Fehlende Planung im Umfeld, z.B. Toiletten, Kantinen, Nasskühltürme,....

# Zum auf der Zunge zergehen lassen...

## *Verhältnismäßigkeit?*

weltweite Pandemie

Lockdowns

Einschränkung von Persönlichkeitsrechten

überforderte Gesundheitsämter und  
Kliniken, nicht-Covid-Eingriffe verschoben

>80000 Todesfälle in Deutschland

hunderte Milliarden Euro

Neuverschuldung

Unmengen Insolvenzen im  
Dienstleistungsbereich

Bildungsnotstand

überforderte Eltern

Gewaltprobleme im familiären Bereich

„Bedenken“ gegen  
ein paar Folienrohre  
und einen Ventilator  
für Fensterlüftungs-  
Unterstützung.

# Danksagung

## ***MPI, privat***

Elena Klimach

Anlagenbau, Organisation

Franziska Köllner

Ablufthauben Pionier Experimente

Ursula Rack

Allround Hilfe, Anlagenbau

Hella Riede

Zulufthauben Experimente

## ***Integrierte Gesamtschule Mainz-Bretzenheim***

Roland Wollowski

Netzwerk zu Stadt und Behörden

Uli Rothhaar

Organisation, Experimentierraum

Detlev Lebershausen

Organisation, Anlagenbau

Viele Lehrer, Eltern, Schüler

Anlagenbau

## ***Gebäudewirtschaft Mainz***

Gilbert Korte, Peter Schickle

Organisation, Gutachten, Förderung

Orest Fuchs

Organisation, Anlagenbau

## ***FGK, ILK Dresden, TU Berlin, FHE Erfurt, TU Aachen***

Prof. Kaup, Kriegel, Müller, Hahn

Reviews & Anregungen



# Und zum Schluss...



...vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!