

Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen

White-Paper Veröffentlichung

■ Übertragungsmechanismen Atemwegserkrankungen

1. Direkte Kontaktübertragung: z. B. direkter Haut- und Schleimhautkontakt
→ Eindämmung durch Verzicht von Körperkontakt
2. Tropfenübertragung: z. B. durch Versprühen von infektiösen Tröpfchen auf Schleimhäute
→ Eindämmung durch Nutzung von Masken
3. Aerosolübertragung: durch kleine Tröpfchen ($d < 5 \mu\text{m}$) über die Raumluft
→ kaum wirksame Schutzmaßnahmen

Abschätzung des Infektionsrisikos

Wie entstehen Aerosole?

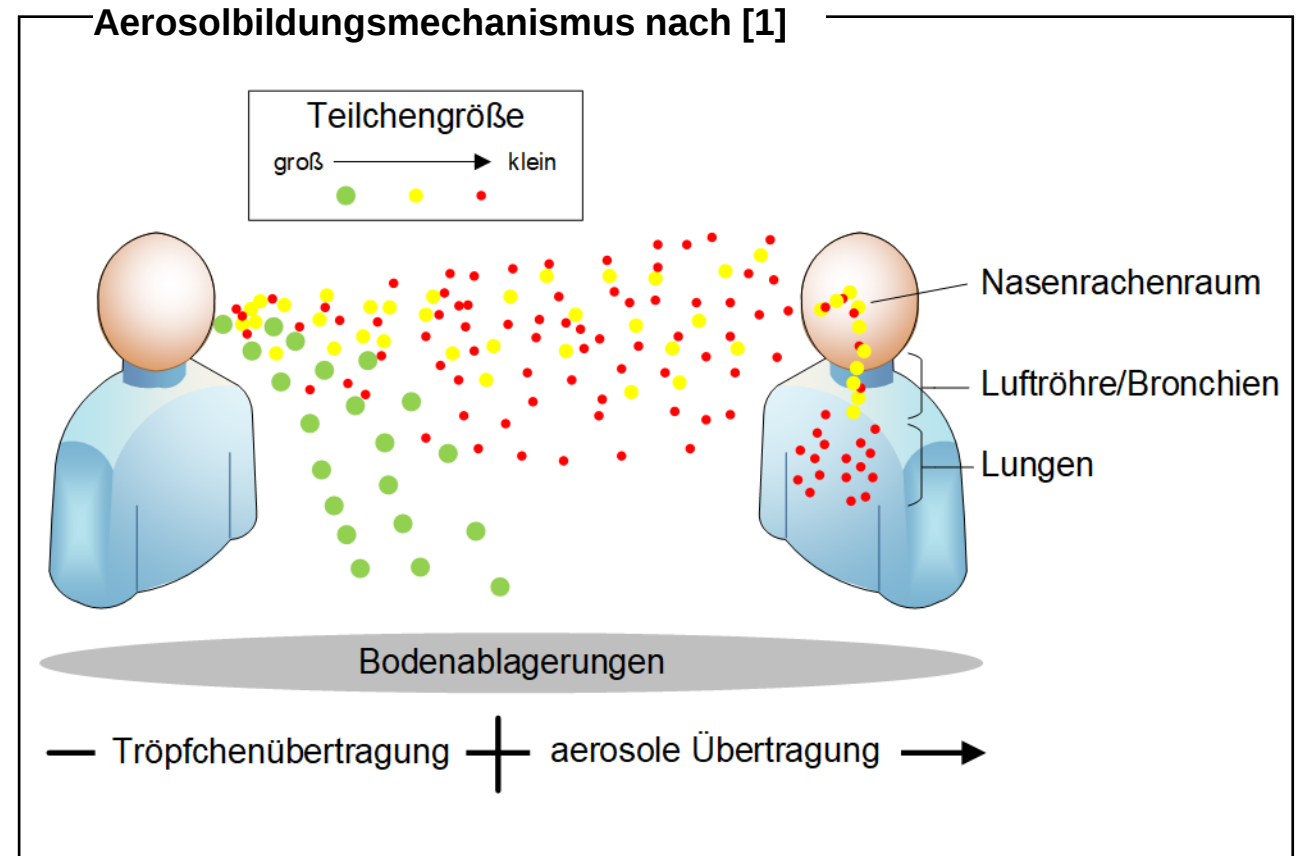
- Bildung aus Auswurf durch respiratorische Aktivitäten (Atmen, Husten, Sprechen, Singen,...)

1. größere Tropfen: Ablagerung mit maximalen Distanzen von 1,5 m
2. kleinere Tropfen: Verdunstung auf Tröpfchenkerne ($d < 5 \mu\text{m}$) → Bildung von Aerosolen

- Transport durch die Raumluft über mehrere Stunden möglich

- Infektiösität der Viren bleibt über mehrere Stunden erhalten

- Einatmen der Aerosole kann zu einer Infektion führen



[1] Pan, M.; Lednicky, J. A.; Wu, C-Y (2019): Collection, particle sizing and detection of airborne viruses. In: *Journal of applied microbiology* 127 (6), S. 1596–1611. DOI: 10.1111/jam.14278.

Abschätzung des Infektionsrisikos

Aerosolübertragung bei der SARS-CoV-2-Pandemie

WHO LENKT EIN

Unterschätzte Gefahr durch Corona-Aerosole

239 Forschende forderten von der WHO eine Aktualisierung der Corona-Leitlinien, da die Übertragung über feinste Schwebstoffe in der Luft nicht ausreichend berücksichtigt sei. Jetzt sieht auch die WHO die Gefahr.



Bericht aus China

Lüftungsanlagen könnten Corona verbreiten

Ein Corona-Patient hat in einem Restaurant in China zwei Familien mit dem Virus angesteckt - vermutlich über die Klimaanlage. Was das für Abstandsregeln in Restaurants bedeutet.

22.04.2020, 18.00 Uhr

Vorsicht Luftumwälzung: Corona-Aerosole fliegen acht Meter weit

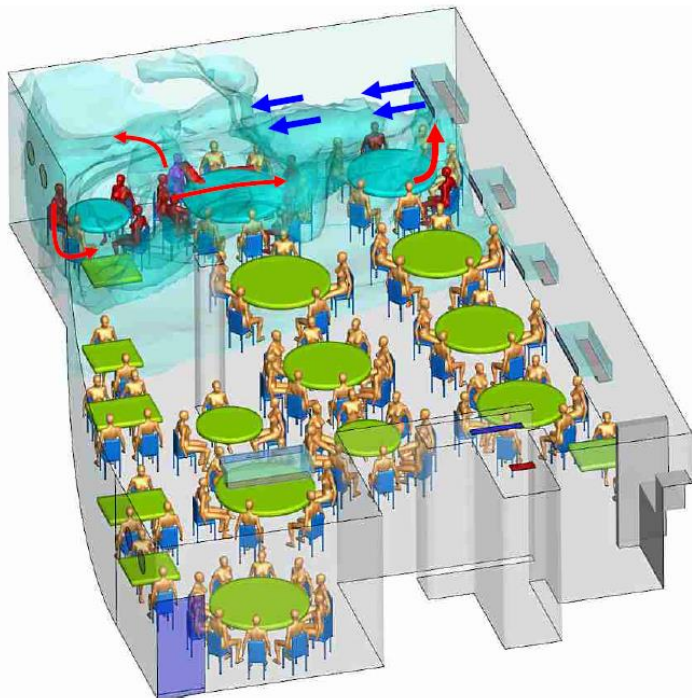
STUTTGART - 24.07.2020, 15:20 UHR



Aerosole verbreiteten Viren am Fließband

CORONA BEI TÖNNIES

In Tönnies' Fleischfabrik soll ein Superspreader Kollegen über acht Meter Entfernung angesteckt haben. Zentrum des Ausbruchs: der Zerlegebereich Rinder, wie eine Rekonstruktion zeigt.



[2] Li, Yuguo; Qian, Hua; Hang, Jian; Chen, Xuguang; Hong, Ling; Liang, Peng et al. (2020): Evidence for probable aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant. DOI: 10.1101/2020.04.16.20067728

Abschätzung des Infektionsrisikos

Vereinfachter Ansatz zu Bestimmung eines relativen Infektionsrisikos (1/2)

- Annahme: Absolutes Infektionsrisiko AR_{Inf} steigt linear mit der Anzahl der eingeatmeten Viren n_V

$$AR_{\text{Inf}} = n_V \cdot \kappa_{\text{Inf}} \longrightarrow \text{Allgemeiner Infektionsparameter}$$

mit:

Bestimmung der Anzahl eingeatmeter Viren

$$n_V = \int_{t=0}^{\tau} \xi(t) \cdot \dot{V}_A \cdot dt = \bar{\xi} \cdot \dot{V}_A \cdot \tau$$

Annahme: Stationäre RB
→ mittlere Virenkonzentration $\bar{\xi}$

Bestimmung der mittleren Virenkonzentration

$$\bar{\xi} = \frac{\dot{n}_{\text{Aerosol}}}{\dot{V}_R} \cdot E_{\text{KPR}}$$

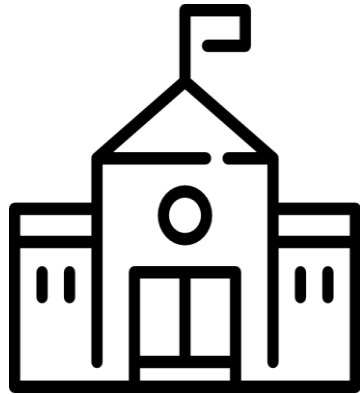
Erwartungswert für Anwesenheit infizierter Person im Raum $E_{\text{KPR}} = n_R \cdot \frac{n_{\text{inf}}}{n_p}$

→ Daraus folgt für das absolute Infektionsrisiko AR_{Inf} :

$$AR_{\text{Inf}} = \frac{\dot{n}_{\text{Aerosol}}}{\dot{V}_R} \cdot \left(n_R \cdot \frac{n_{\text{inf}}}{n_p} \right) \cdot \dot{V}_A \cdot \tau \cdot \kappa_{\text{Inf}}$$

Abschätzung des Infektionsrisikos

Definition einer akzeptablen Referenzumgebung



Klassenraum

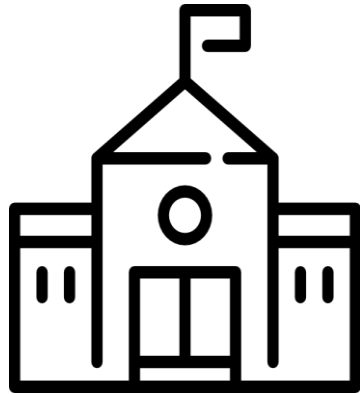
Bei Anwesenheit einer infektiösen Person beträgt das absolute Risiko für eine neue Infektion ca. 1%

→ 1 Neuinfektion bei 25 Personen nach 4 Schulstunden

	Einheit	Parameter	Wert
Grundfläche	m ²	A_{ref}	66,7
Raumhöhe	m	h_{ref}	3
Luftwechselrate	h ⁻¹	LW_{ref}	4,375
Luftvolumenstrom	m ³ /h	$\dot{V}_{\text{R,ref}}$	875
Anzahl anwesender Personen	–	$n_{\text{R,ref}}$	25
Aufenthaltsdauer	h	τ_{ref}	1
Wahrscheinlichkeit, mindestens einer infizierten Person zu begegnen	–	$P_{\text{KPR,ref}}$	0,087
Gruppe 1 (Lehrer)			
Anzahl Personen	–	$n_{\text{R,g1,ref}}$	1
Atemvolumenstrom	m ³ /h	$\dot{V}_{\text{A,g1,ref}}$	0,54 (Sitzen)
Emittierte Aerosolkonzentration	ml/m ³	$\zeta_{\text{Aerosol,g1,ref}}$	0,0096 (Sprechen)
Filtrationseffizienz MNB	–	$PR_{\text{g1,ref}}$	0 (kein MNB)
Gruppe 2 (Schüler)			
Anzahl Personen	–	$n_{\text{R,g2,ref}}$	24
Atemvolumenstrom	m ³ /h	$\dot{V}_{\text{A,g2,ref}}$	0,54 (Sitzen)
Emittierte Aerosolkonzentration	ml/m ³	$\zeta_{\text{Aerosol,g2,ref}}$	0,0018 (Atmen)
Filtrationseffizienz MNB	–	$PR_{\text{g2,ref}}$	0 (kein MNB)

Abschätzung des Infektionsrisikos

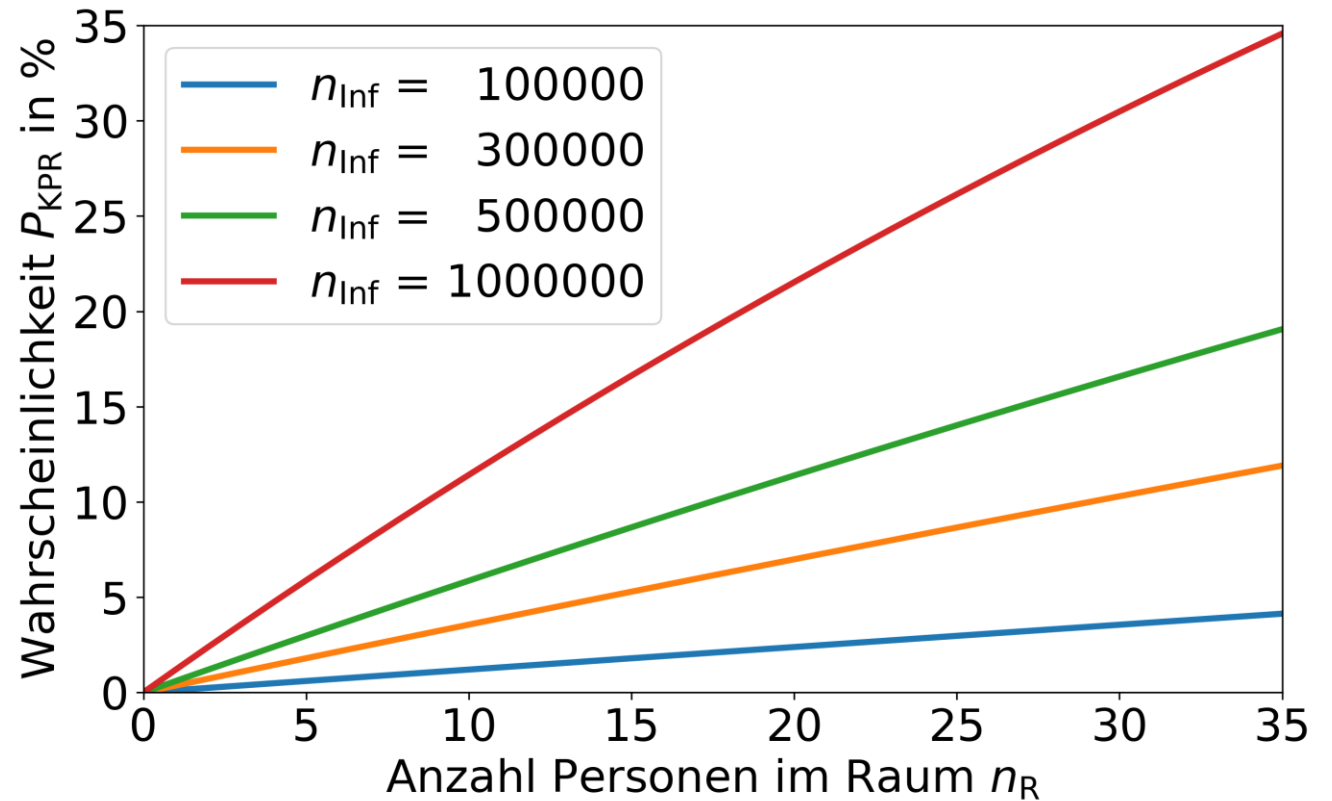
Definition einer akzeptablen Referenzumgebung



Klassenraum

Bei Anwesenheit einer infektiösen Person beträgt das absolute Risiko für eine neue Infektion ca. 1%

→ 1 Neuinfektion bei 25 Personen nach 4 Schulstunden



$P_{KPR} = 8,7 \%$

Wahrscheinlichkeit eine infizierte Person in einem Raum mit 25 Personen anzutreffen:

Abschätzung des Infektionsrisikos

Vereinfachter Ansatz zu Bestimmung eines relativen Infektionsrisikos (1/2)

Bestimmung eines relativen Infektionsrisikos im Vergleich zu einer Referenzsituation

$$RR_{\text{Inf}} = \frac{\frac{\dot{n}_{\text{Aerosol}}}{\dot{V}_R} \cdot \left(n_R \cdot \frac{n_{\text{inf}}}{n_p} \right) \cdot \dot{V}_A \cdot \tau \cdot \kappa_{\text{inf}}}{\frac{\dot{n}_{\text{Aerosol,ref}}}{\dot{V}_{R,\text{ref}}} \cdot \left(n_{R,\text{ref}} \cdot \frac{n_{\text{inf}}}{n_p} \right) \cdot \dot{V}_{A,\text{ref}} \cdot \tau_{\text{ref}} \cdot \kappa_{\text{inf}}}$$

➔ Medizinische Parameter kürzen sich aus der Betrachtung raus!

$$RR_{\text{Inf}} = \frac{\dot{n}_{\text{Aerosol}}}{\dot{n}_{\text{Aerosol,ref}}} \cdot \frac{\dot{V}_{R,\text{ref}}}{\dot{V}_R} \cdot \frac{n_R}{n_{R,\text{ref}}} \cdot \frac{\dot{V}_A}{\dot{V}_{A,\text{ref}}} \cdot \frac{\tau}{\tau_{\text{ref}}}$$

mit: $\dot{V}_R = V_R \cdot LW$

$$\bar{n}_{\text{Aerosol}} = \frac{1}{n_R} \sum_i (1 - PR_{gi}) \cdot \dot{V}_{A,gi} \cdot \xi_{\text{Aerosol,gi}} \cdot n_{gi}$$

Mittlere emittierte Aerosolmenge für mehrere Gruppen

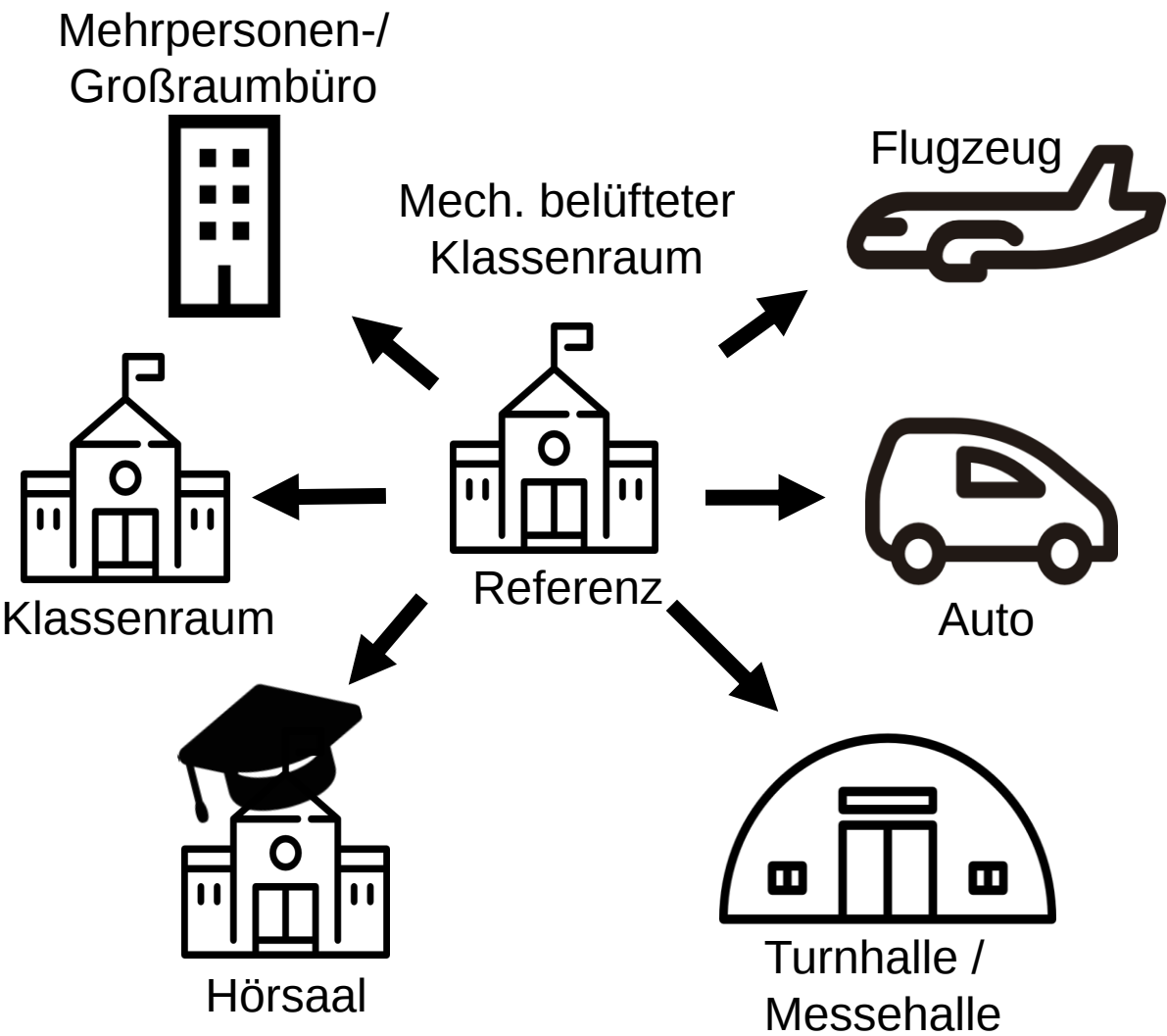


$$RR_{\text{Inf}} = \frac{\bar{n}_{\text{Aerosol}}}{\bar{n}_{\text{Aerosol,ref}}} \cdot \frac{V_{R,\text{ref}} \cdot LW_{\text{ref}}}{V_R \cdot LW + \dot{V}_{\text{LR,eff}}} \cdot \frac{n_R}{n_{R,\text{ref}}} \cdot \frac{\dot{V}_A}{\dot{V}_{A,\text{ref}}} \cdot \frac{\tau}{\tau_{\text{ref}}}$$

Betrachtung von Luftreinigern
mit: $\dot{V}_{\text{LR,eff}} = \dot{V}_{\text{LR}} \cdot \eta_{FAG} \cdot \epsilon_i^c$

Abschätzung des Infektionsrisikos

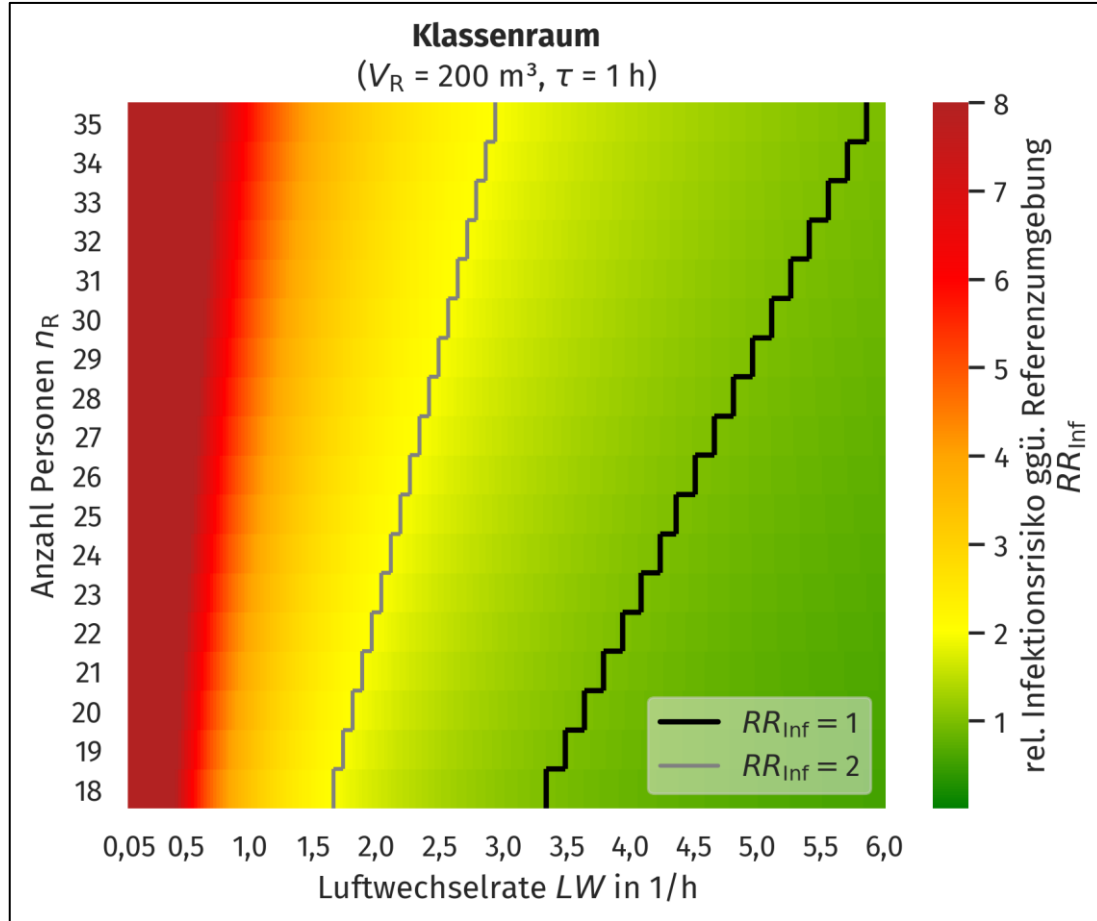
Anwendung des Modells



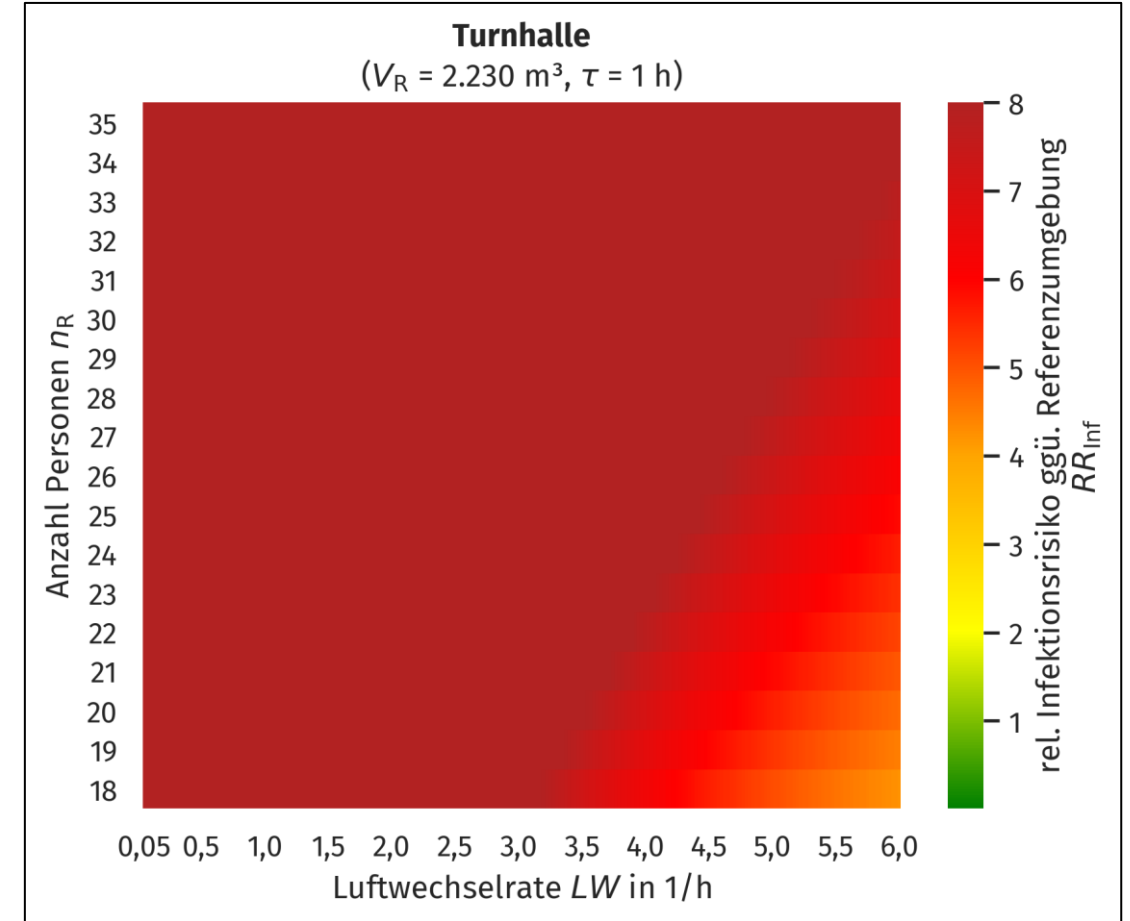
Raumtyp	V in m ³	LW in 1/h	n_R -	PR -
Referenz	200	4,4	25	0

Abschätzung des Infektionsrisikos

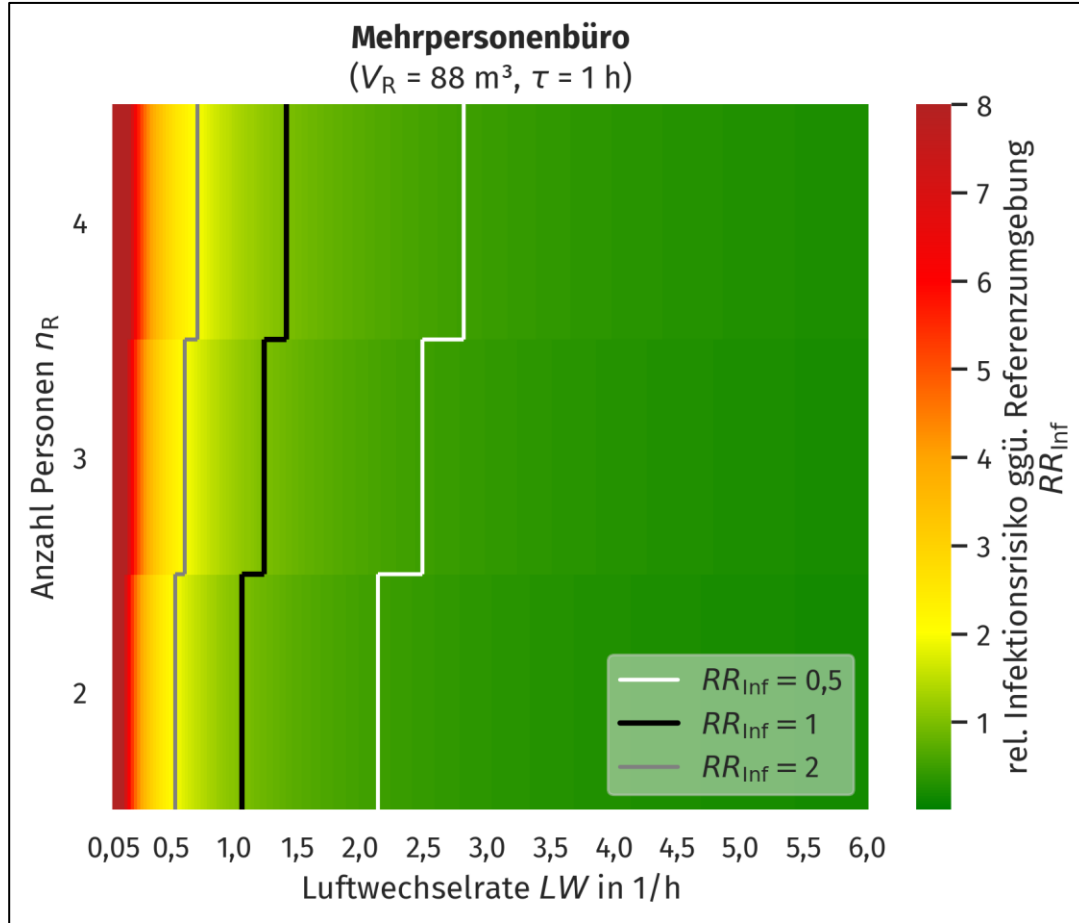
Relatives Risiko ggü. Referenz: Ergebnisse Immobilien (1/3)



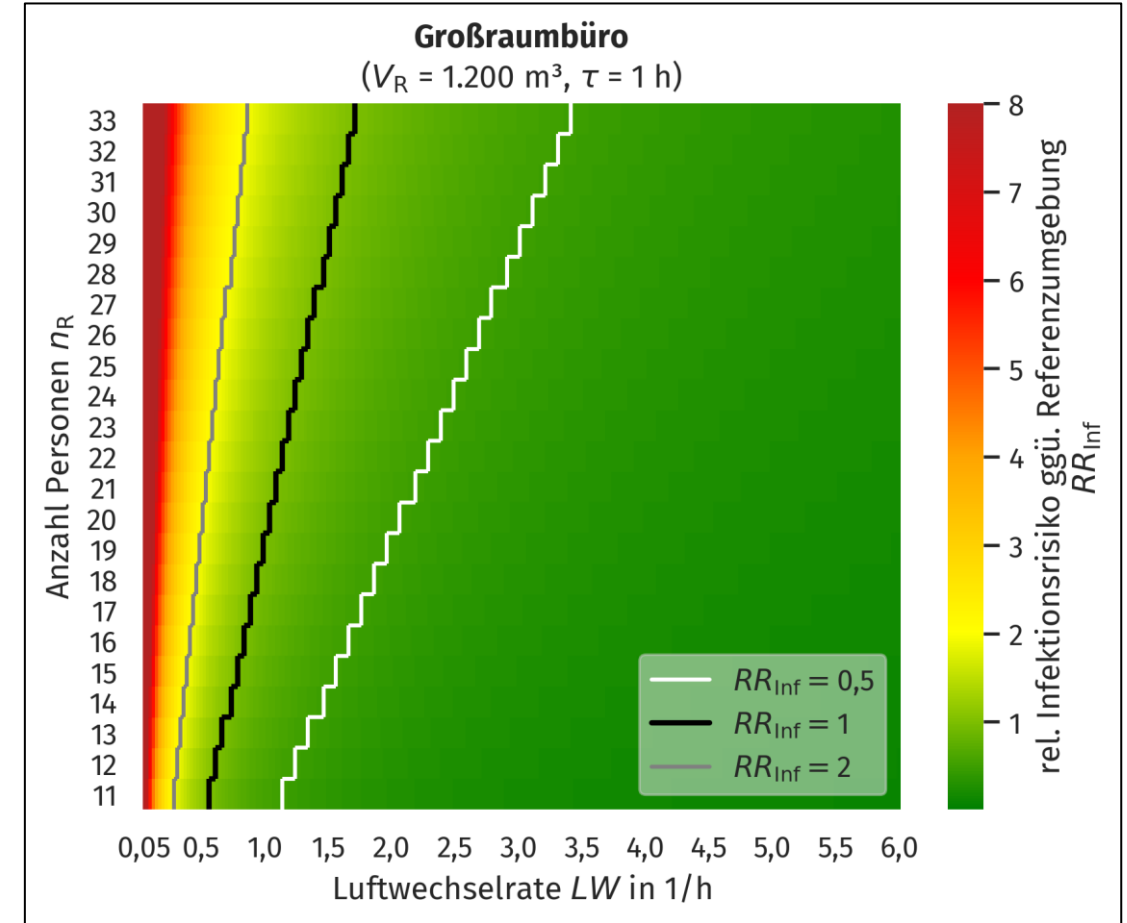
- Stark erhöhtes Risiko bei natürlicher Infiltration (0,5/h) ohne zusätzliche Lüftungsmaßnahmen



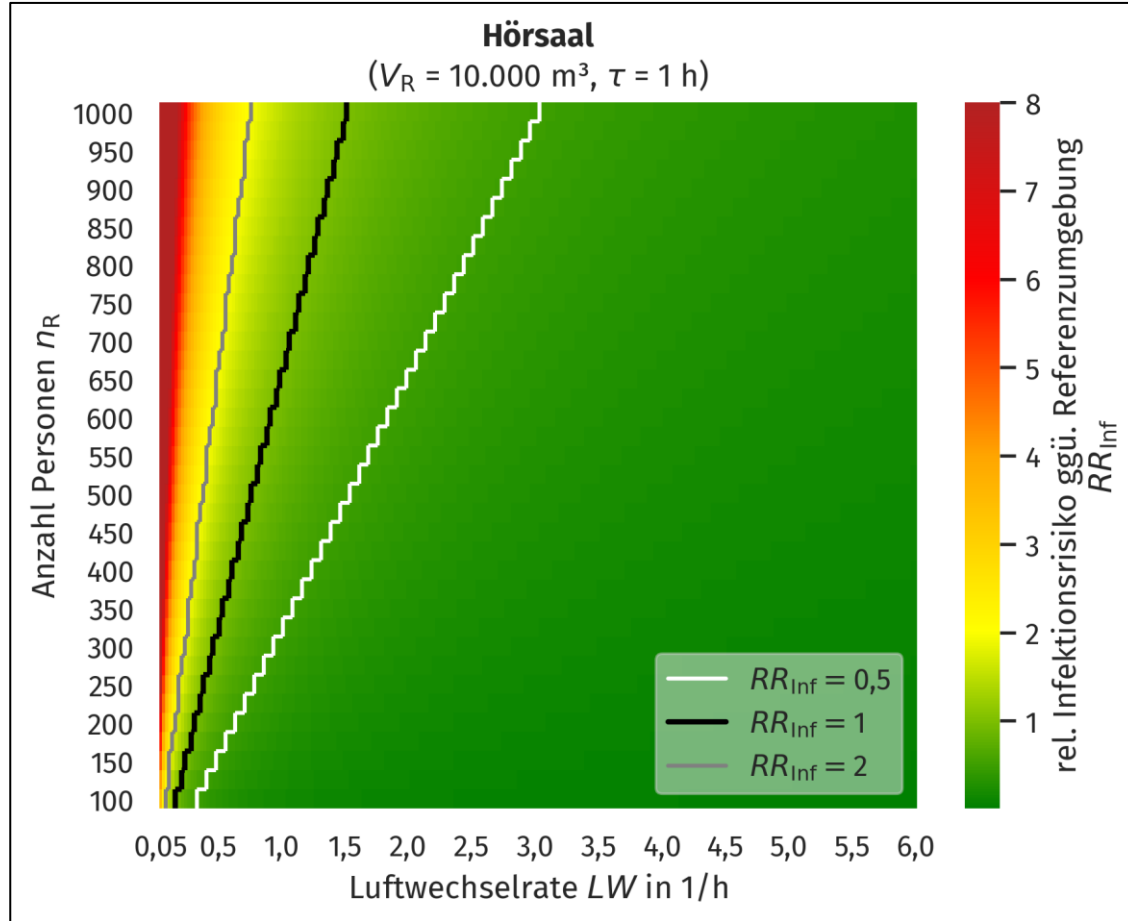
- bei 0,94/h und 35 Personen: 52-faches Risiko
- Sport möglichst in den Außenbereich verlagern



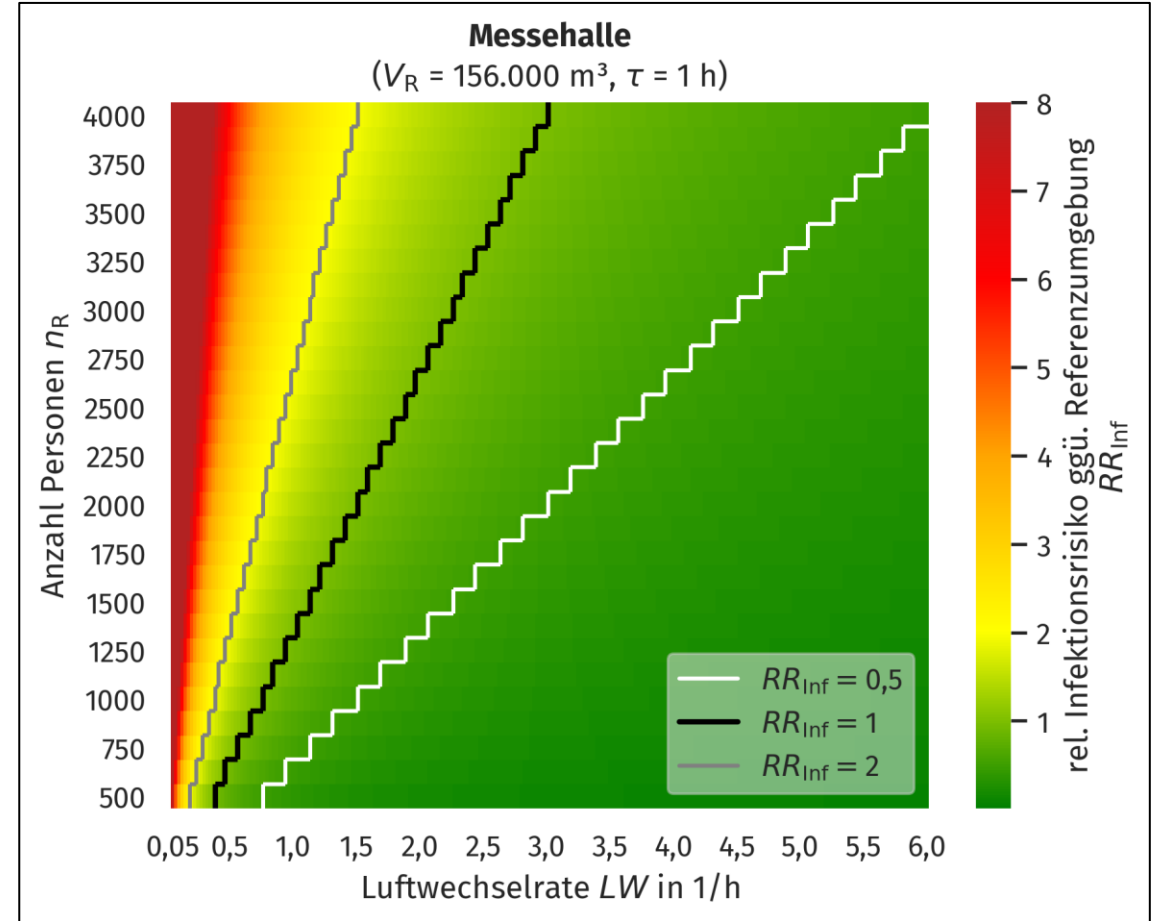
- MNB mit $PR = 0,5$
- Luftwechselraten von ca. 1/h bis 1,4/h ausreichend, um $RR_{\text{Inf}} = 1$ zu erreichen



- Kein MNB
- Luftwechselraten von ca. 0,5/h bis 1,7/h ausreichend, um $RR_{\text{Inf}} = 1$ zu erreichen



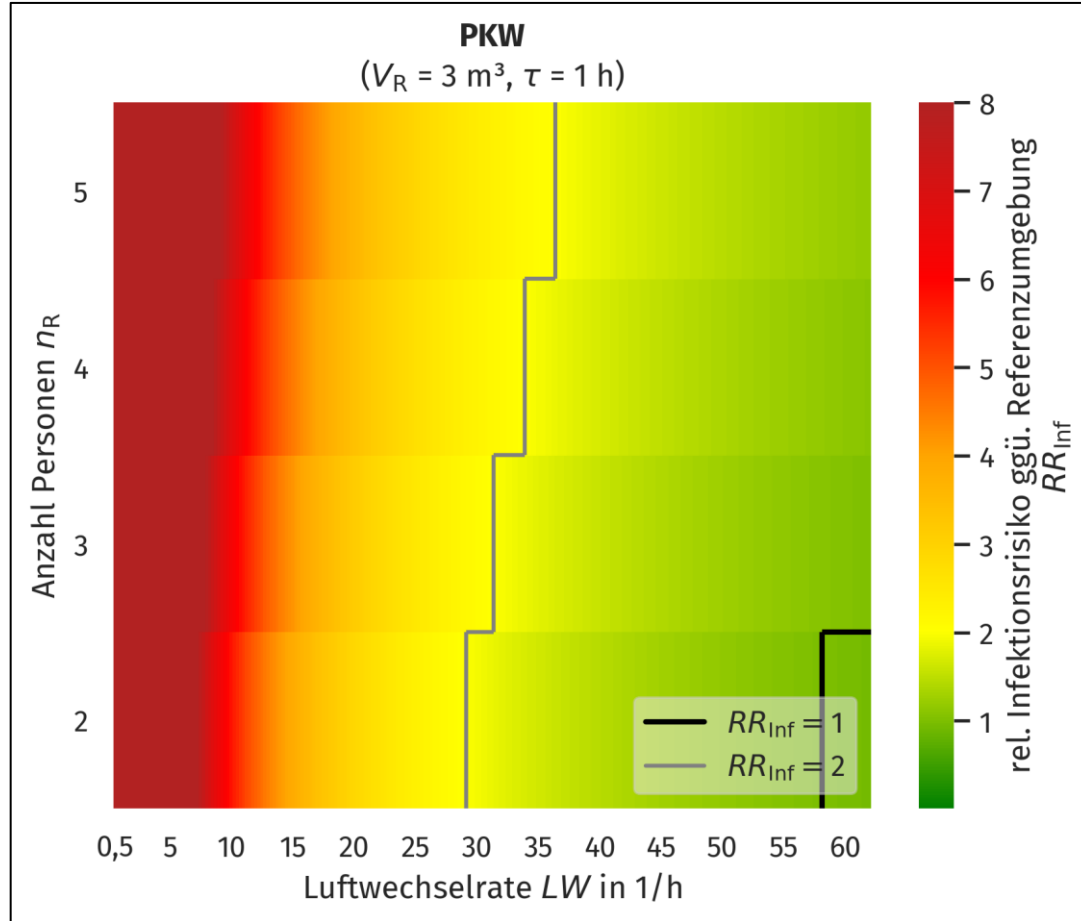
- MNB mit $PR = 0,5$
- Luftwechselraten von 1,5/h für $RR_{\text{Inf}} = 1$
- Prüfung der Annahme der idealen Durchmischung



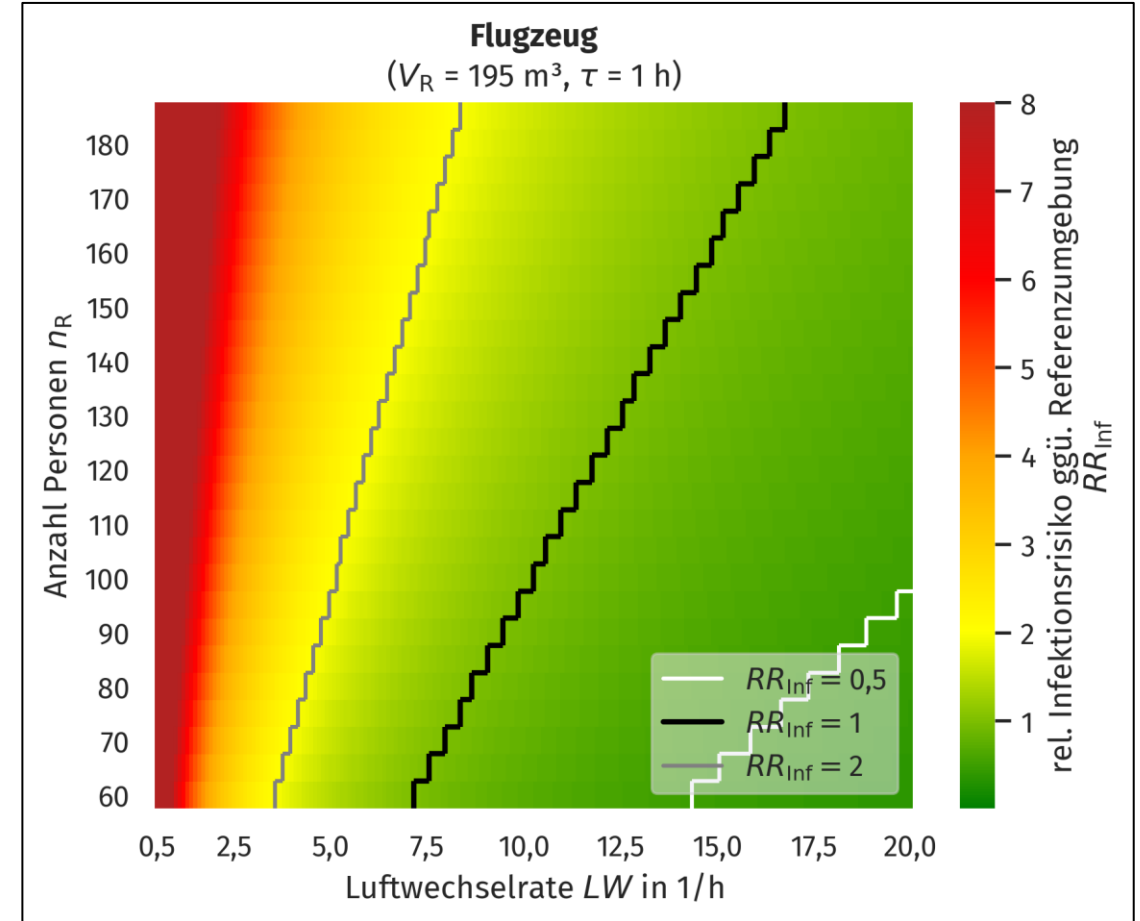
- $RR_{\text{Inf}} = 1$ bei 3/h und Vollbelegung
- Prüfung der Annahme der idealen Durchmischung
- Speichereffekte des Raumvolumens

„Risiko-Paper“

Relatives Risiko ggü. Referenz: Ergebnisse Transportmittel



- Kein MNB
- für $RR_{\text{Inf}} = 1$ und 2 Personen: 58/h notwendig
- $RR_{\text{Inf}} = 1,9$ für 30/h und 2 Personen



- MNB mit PR = 0,5
- für RR_{Inf} von 1 bei Vollbesetzung: 16,7/h notwendig
- für typische LW bei Vollbesetzung RR_{Inf} zw. 1,11 und 1,52

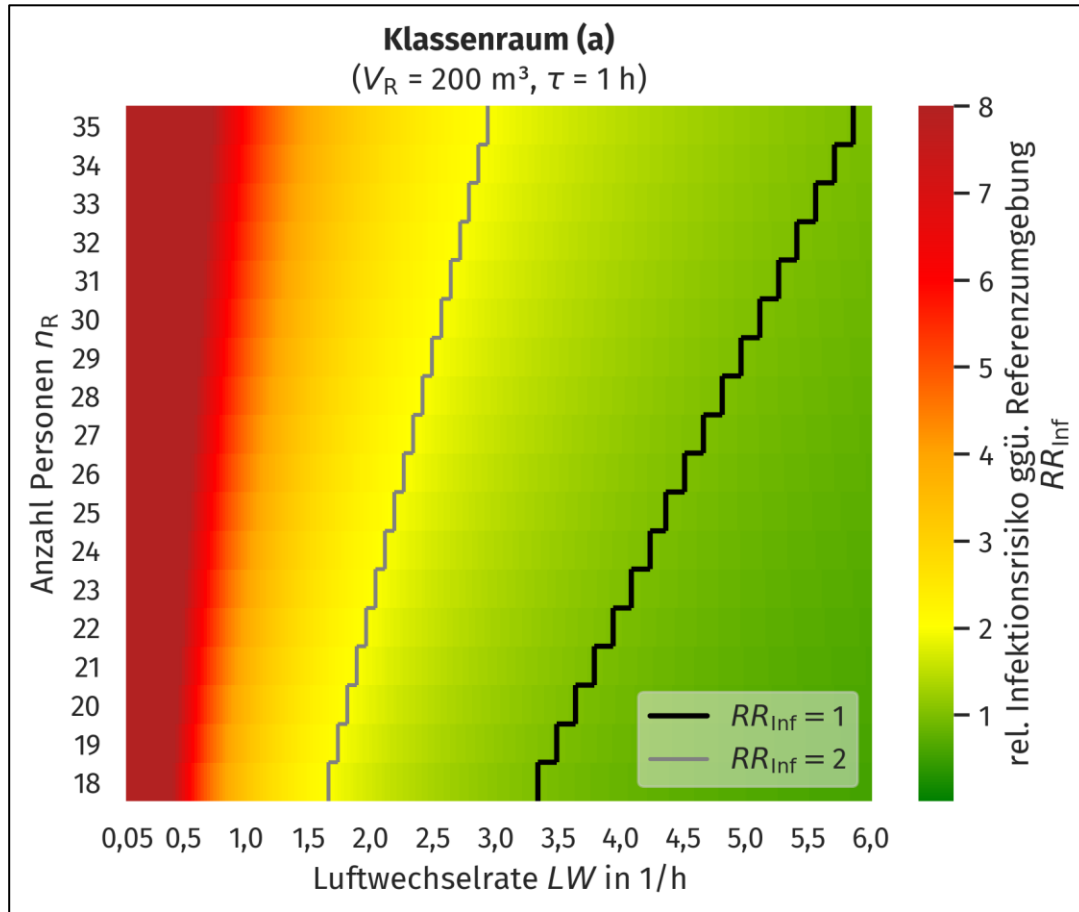
Abschätzung des Infektionsrisikos

Unterschiedliche Unterrichtssituationen

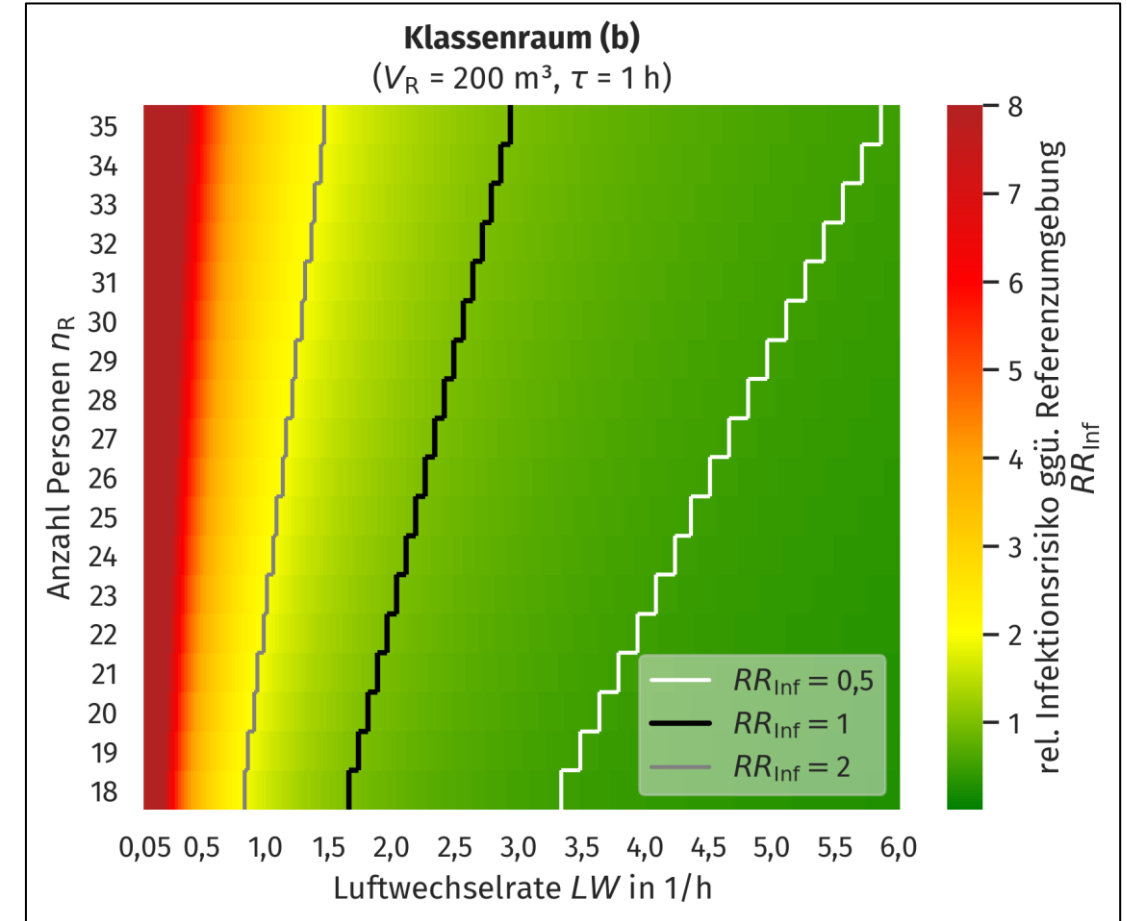
		Klassenraum					
		a	b	c	d	e	f
		Frontalunterricht ohne MNB (Referenz)	Frontalunterricht mit MNB	Singen/Musik- unterricht ohne MNB	Gruppenarbeit ohne MNB	Gruppenarbeit mit MNB	Gruppenarbeit mit MNB und Luftreiniger
V_R	m ³	200					
LW	h ⁻¹	bis 5					
$n_{R,max}$	-	35					
τ	h	1					
$\dot{V}_{LR,eff}$	m ³ /h	0	0	0	0	0	500
Gruppe 1							
$n_{R,g1}$	-	1	1	100 %	33 %	33 %	33 %
$\dot{V}_{A,g1}$	m ³ /h	0,54 (Sitzen)					
$\zeta_{Aerosol,g1}$	ml/m ³	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)	0,06 (Singen)	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)
PR_{g1}		0	0,5	0	0	0,5	0,5
Gruppe 2							
$\dot{V}_{A,g2}$	m ³ /h	0,54 (Sitzen)					
$\zeta_{Aerosol,g2}$	ml/m ³	0,0018 (Atmen)					
PR_{g2}	-	0	0,5	0	0	0,5	0,5

„Risiko-Paper“

Relatives Risiko ggü. Referenz: Unterrichtssituationen (1/3)



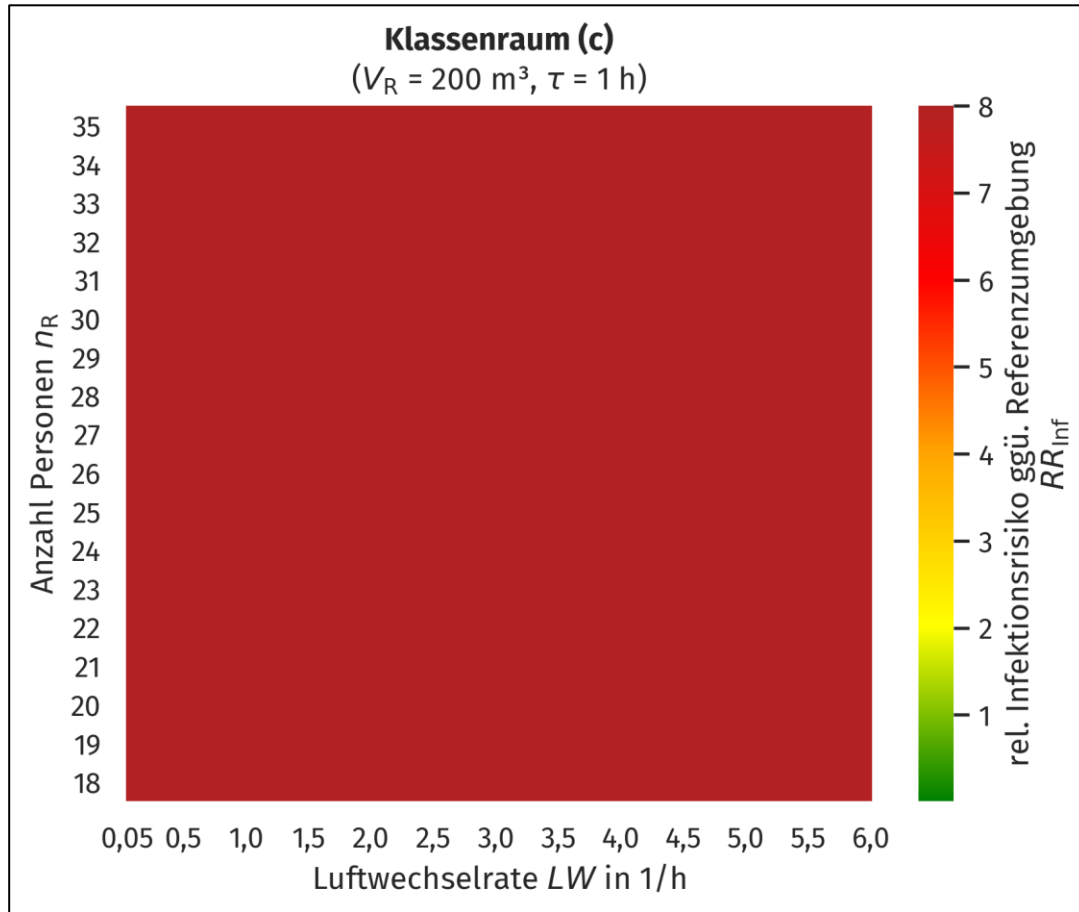
■ 1 Person sprechaktiv, ohne MNB, ohne Luftreiniger



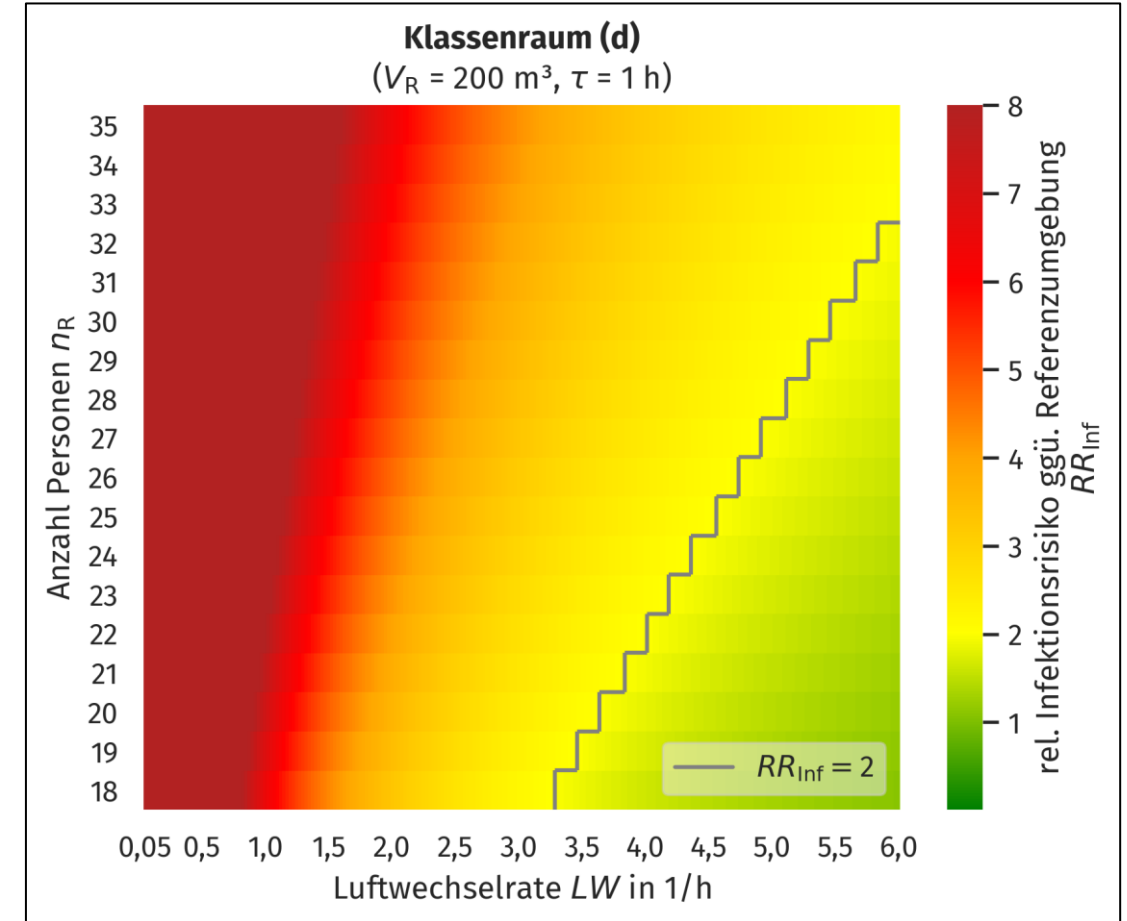
■ 1 Person sprechaktiv, mit MNB, ohne Luftreiniger

„Risiko-Paper“

Relatives Risiko ggü. Referenz: Unterrichtssituationen (2/3)



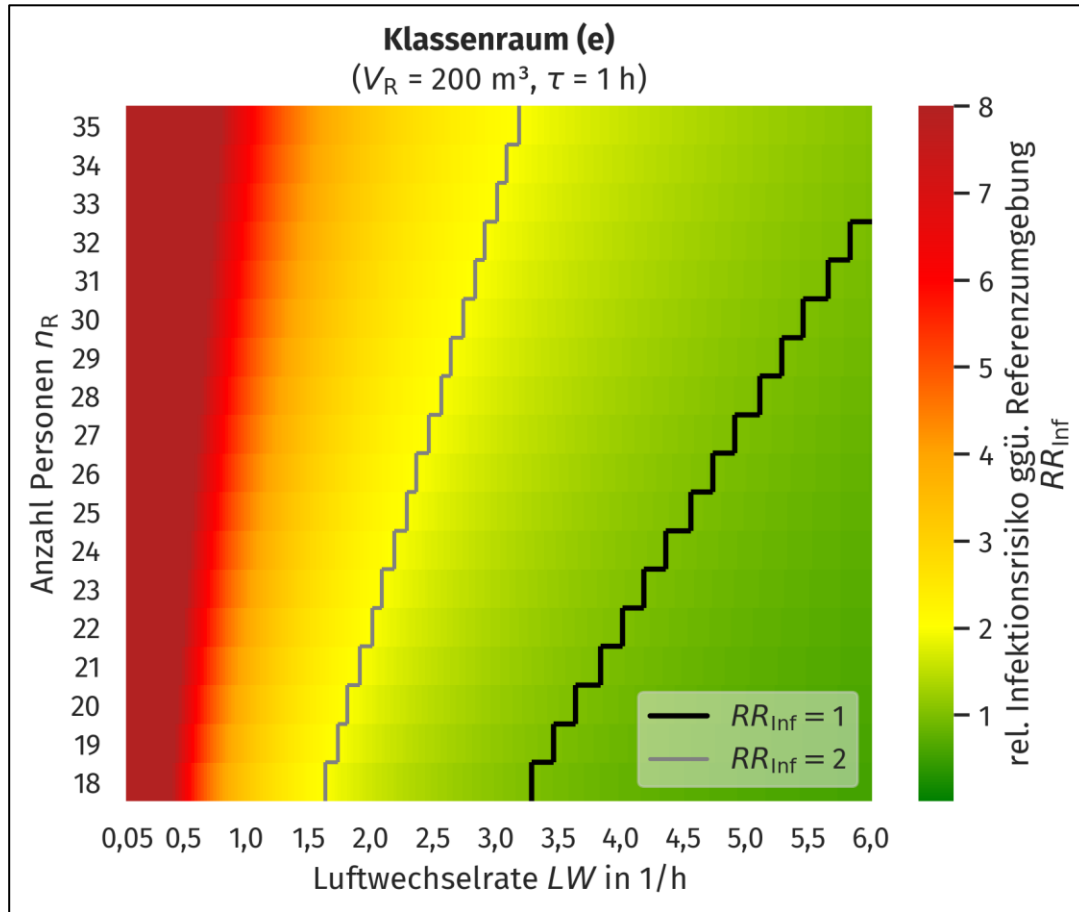
- Alle Personen sprechaktiv (Singen), ohne MNB, ohne Luftreiniger



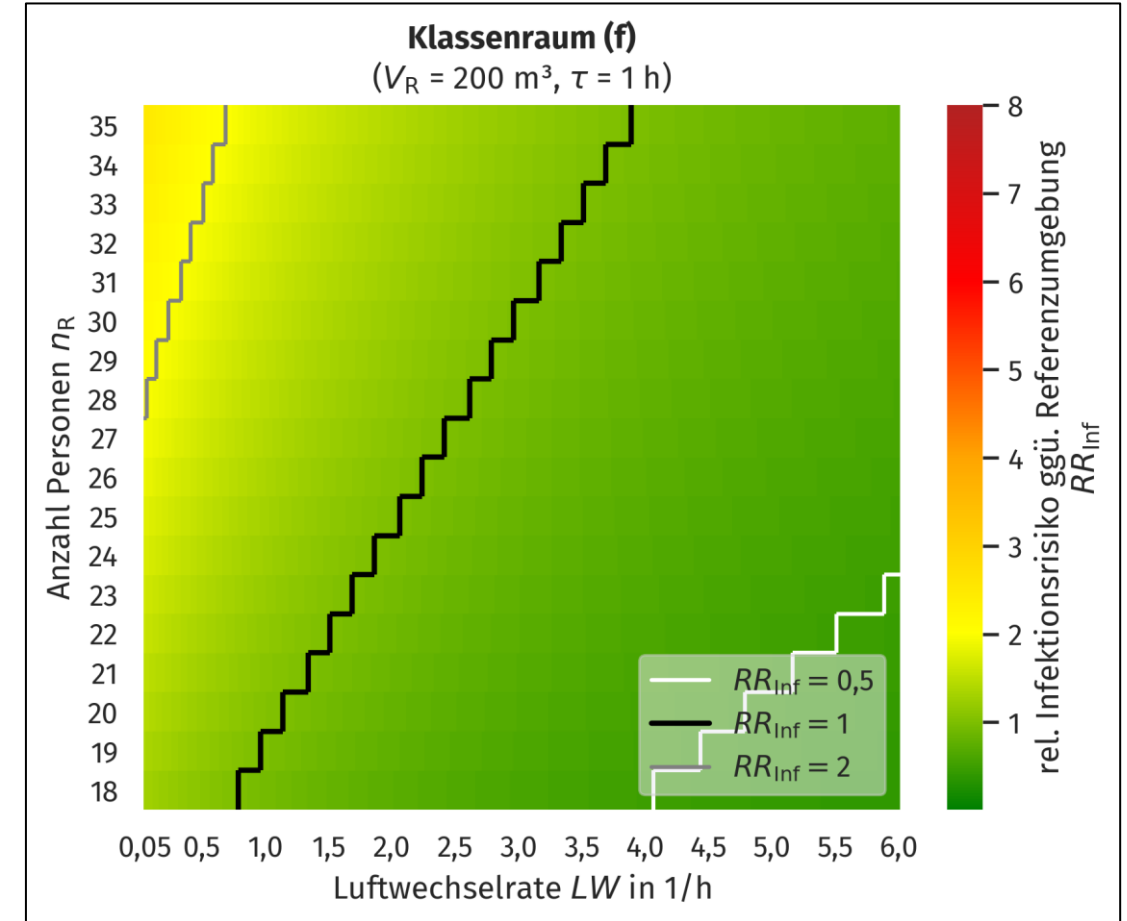
- 9 Personen sprechaktiv (Gruppenarbeit), ohne MNB, ohne Luftreiniger

„Risiko-Paper“

Relatives Risiko ggü. Referenz: Unterrichtssituationen (3/3)



- 9 Personen sprechaktiv (Gruppenarbeit), mit MNB, ohne Luftreiniger



- 9 Personen sprechaktiv (Gruppenarbeit), mit MNB, mit Luftreiniger ($500 \text{ m}^3/h$)

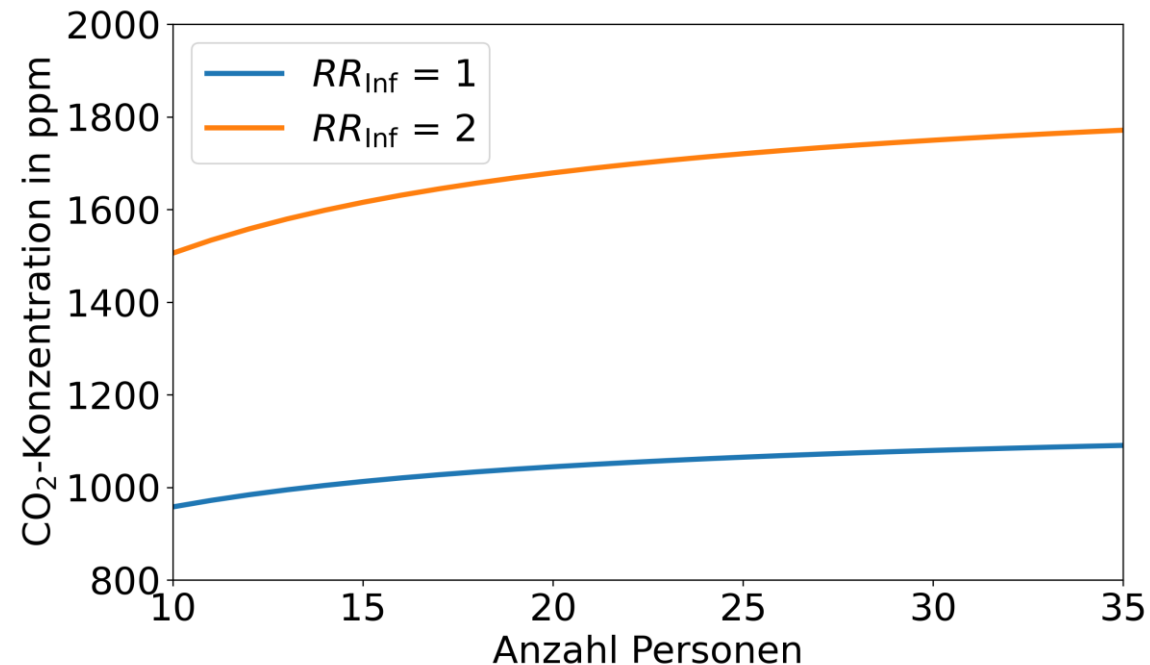
Abschätzung des Infektionsrisikos

CO₂-Konzentration als Indikator für das Infektionsrisiko

■ Massenbilanz für CO₂

$$\sigma_{\text{CO}_2, \text{Abluft}} = \sigma_{\text{CO}_2, \text{Zuluft}} + \dot{m}_{\text{CO}_2, \text{Produktion}} \cdot n_R \cdot \frac{1}{\dot{V}_R} \cdot \frac{R \cdot T \cdot 10^6 \text{ ppm}}{M_{\text{CO}_2} \cdot p}$$

■ Bestimmung der stationären Abluftkonzentration in Abhängigkeit des relativen Infektionsrisikos und der Anzahl der Personen

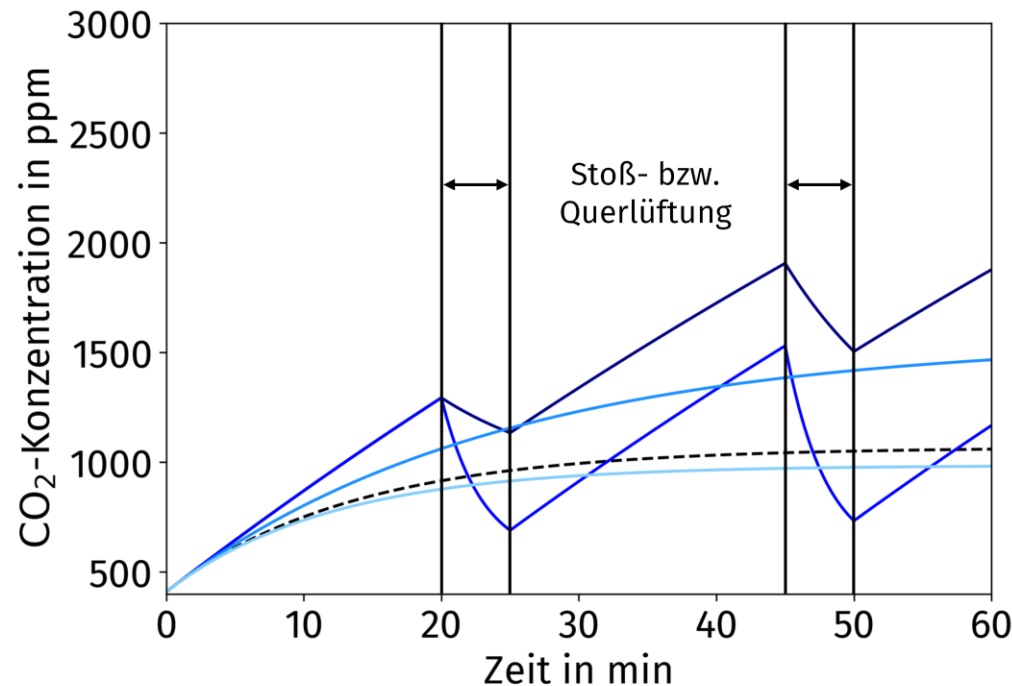


Abschätzung des Infektionsrisikos

CO₂-Konzentration als Indikator für das Infektionsrisiko

- Instationäre Betrachtung für 4 Lüftungsszenarien in einem Klassenraum mit 25 Personen (1 Person spricht)

Szenario	Beschreibung	Luftwechsel in h ⁻¹
a	UBA Stoßlüftung	0,5 / 6
b	UBA Querlüftung	0,5 / 20
c	Maschinelle Lüftung	2,5
d	Maschinelle Lüftung	5



Referenzszenario: maschinelle Lüftung

($LW = 4,375 \text{ h}^{-1}$, $\dot{V}_R = 875 \text{ m}^3/\text{h}$)

(a) natürliche Infiltration
+ Stoßlüftung nach UBA

(b) natürliche Infiltration
+ Querlüftung nach UBA

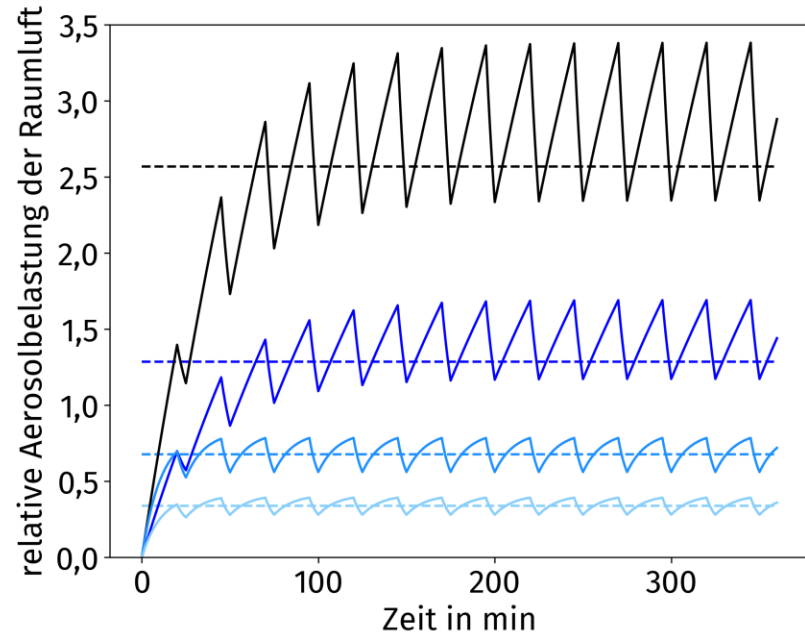
(c) maschinelle Lüftung
($LW = 2,5 \text{ h}^{-1}$, $\dot{V}_R = 500 \text{ m}^3/\text{h}$)

(d) maschinelle Lüftung
($LW = 5 \text{ h}^{-1}$, $\dot{V}_R = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$)

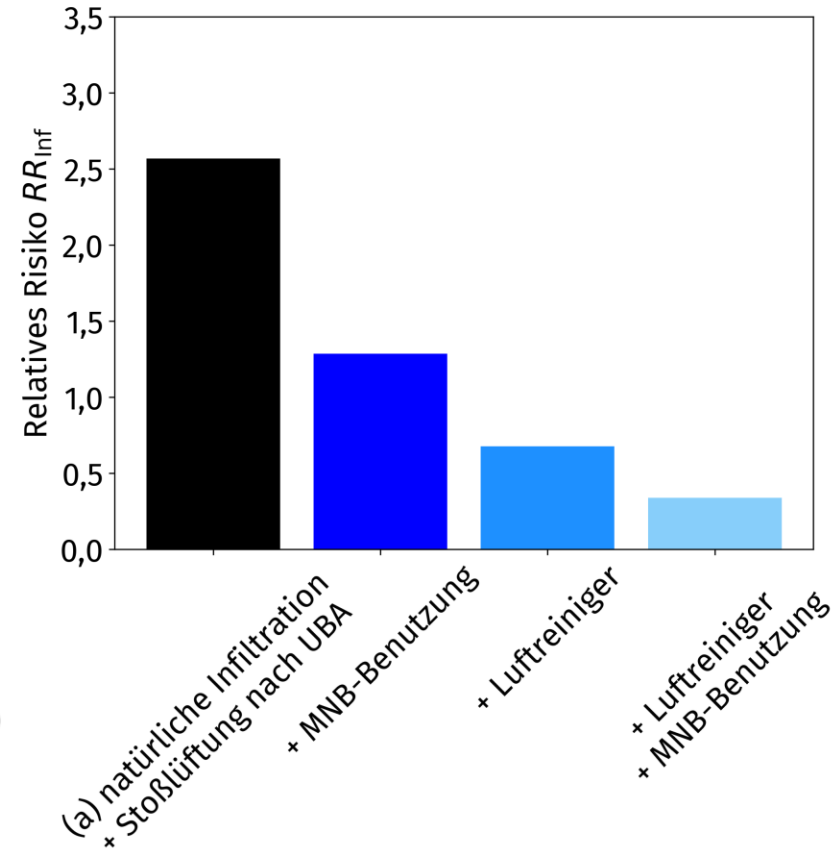
Abschätzung des Infektionsrisikos

Aerosol-Belastung als Indikator für das Infektionsrisiko – Szenario a

■ Korrelation zwischen relativer Aerosolbelastung und relativem Risiko



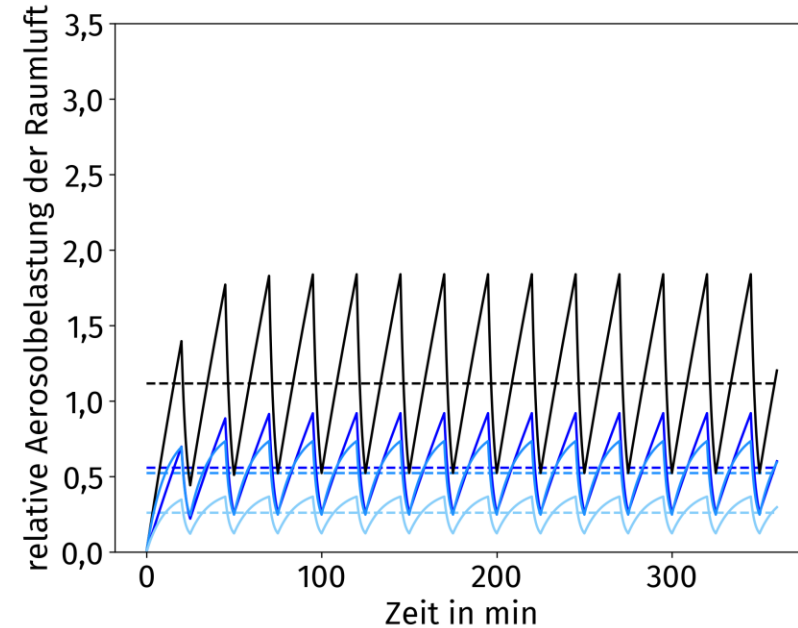
- (a) natürliche Infiltration ($LW = 0,5 \text{ h}^{-1}$, $\dot{V}_R = 100 \text{ m}^3/\text{h}$)
mit Stoßlüftung nach UBA ($LW = 6 \text{ h}^{-1}$, $\dot{V}_R = 1200 \text{ m}^3/\text{h}$)
- + MNB-Benutzung
- + Luftreiniger
- + Luftreiniger + MNB-Benutzung



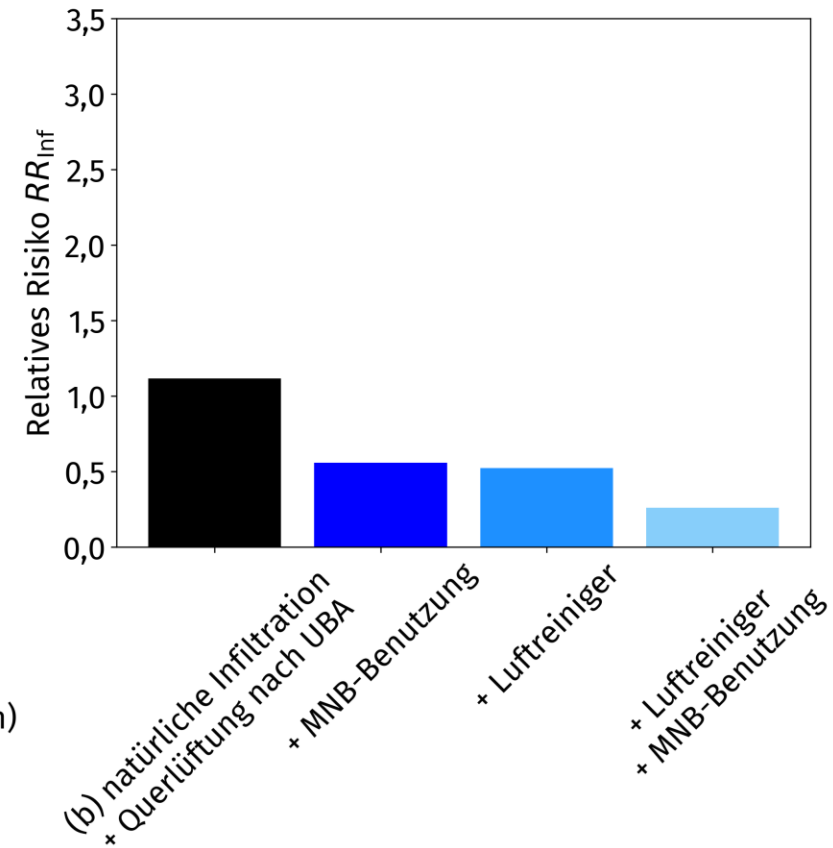
Abschätzung des Infektionsrisikos

Aerosol-Belastung als Indikator für das Infektionsrisiko – Szenario b

■ Korrelation zwischen relativer Aerosolbelastung und relativem Risiko



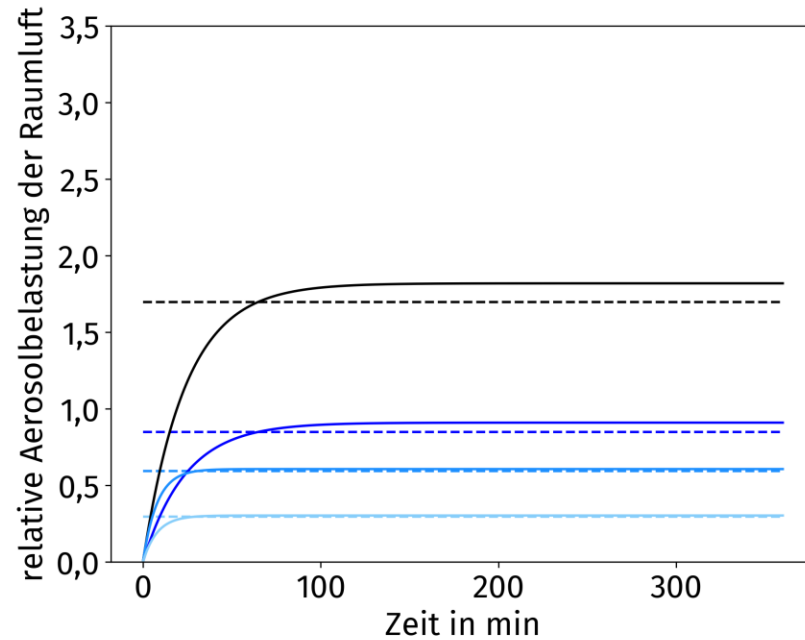
- (b) natürliche Infiltration ($LW = 0,5 \text{ h}^{-1}$, $\dot{V}_R = 100 \text{ m}^3/\text{h}$)
mit Querlüftung nach UBA ($LW = 20 \text{ h}^{-1}$, $\dot{V}_R = 4000 \text{ m}^3/\text{h}$)
- + MNB-Benutzung
- + Luftreiniger
- + Luftreiniger + MNB-Benutzung



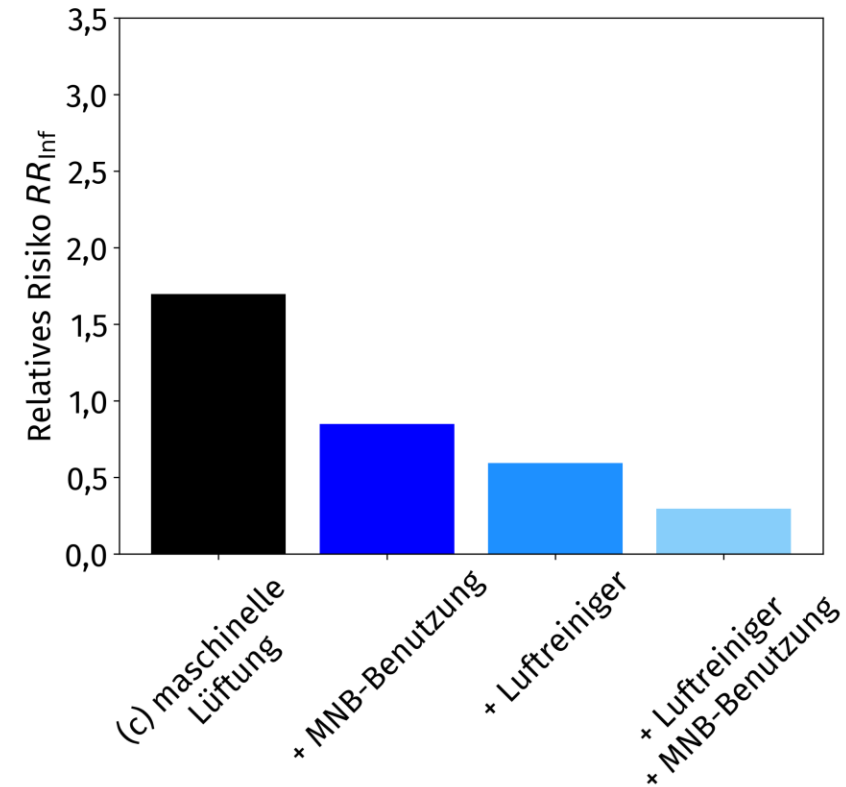
Abschätzung des Infektionsrisikos

Aerosol-Belastung als Indikator für das Infektionsrisiko – Szenario c

■ Korrelation zwischen relativer Aerosolbelastung und relativem Risiko



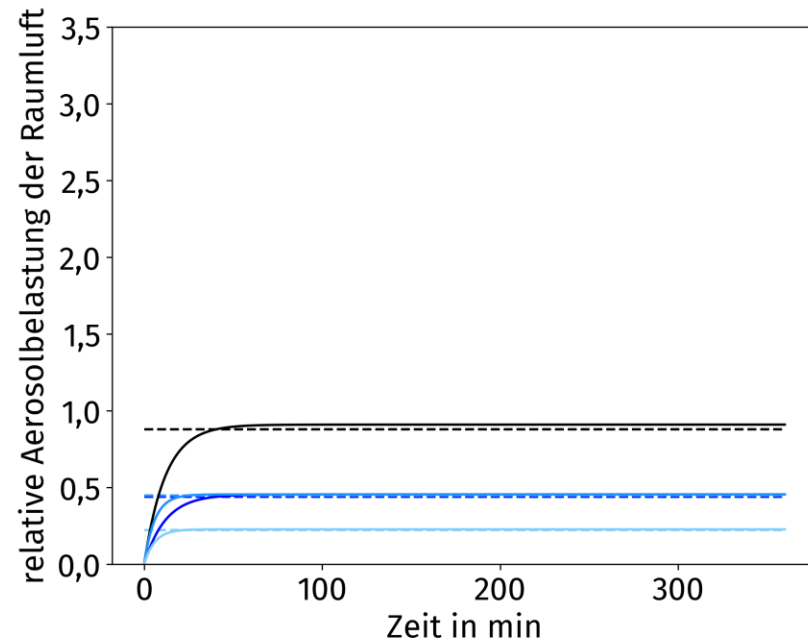
- (c) maschinelle Lüftung ($LW = 2,5 \text{ h}^{-1}$, $\dot{V}_R = 500 \text{ m}^3/\text{h}$)
- + MNB-Benutzung
- + Luftreiniger
- + Luftreiniger + MNB-Benutzung



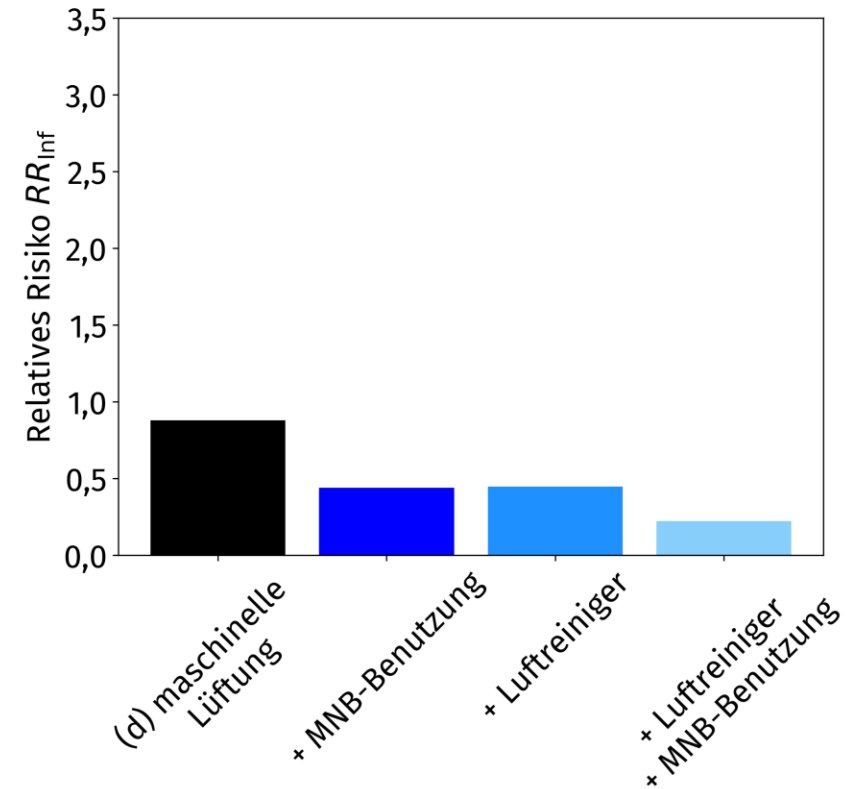
Abschätzung des Infektionsrisikos

Aerosol-Belastung als Indikator für das Infektionsrisiko – Szenario d

■ Korrelation zwischen relativer Aerosolbelastung und relativem Risiko



- (d) maschinelle Lüftung ($LW = 5 \text{ h}^{-1}$, $\dot{V}_R = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$)
- + MNB-Benutzung
- + Luftreiniger
- + Luftreiniger + MNB-Benutzung



- Vereinfachte Abschätzung des relativen Infektionsrisikos in Räumen in Abhängigkeit technischer Parameter
 - ≡ Raumgröße, Luftwechselrate, Aufenthaltszeit, Anzahl anwesender Personen
 - ≡ Körperliche Aktivität, Sprechaktivität
 - ≡ Partikelrückhalteraten von Masken
 - ≡ Luftreinigern
- Vereinfachungen der Modellgleichungen
 - ≡ linearer Zusammenhang Anzahl eingeatmeter Viren → Infektionswahrscheinlichkeit
 - ≡ ideale Mischlüftung
 - ≡ statistische Betrachtung, keine Berücksichtigung von Einzelperson-bezogenen Faktoren
- Ergebnisse
 - ≡ Räume mit hoher Personendichte und Aufenthaltszeit benötigen sehr hohe Luftwechselraten
 - ≡ Körperliche Aktivität und Sprechaktivität haben großen Einfluss auf die Ein- und Ausgeatmeten Aerosolmengen
 - ≡ Insbesondere an Schulen kann eine ausreichende Außenluftzufuhr durch Fensterlüftung kaum sicher gestellt werden
- Implementierung als Web-Applikation unter
 - ≡ <http://risico.eonerc.rwth-aachen.de/>



