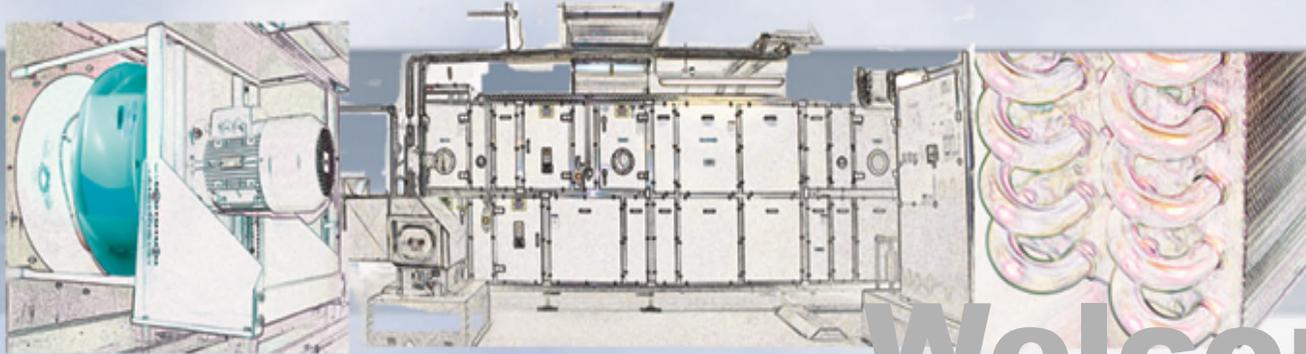


Willkommen



Bienvenue

Welcome

Bessere Raumluftqualität durch Raumluftechnik?

Wie im Vergleich Raumluftechnische Anlagen die
Aerosole und sonstige Schadstoffe in Räumen
verringern.

Prof. Dr.-Ing. Dr. Christoph Kaup
c.kaup@umwelt-campus.de



Umwelt-Campus
Birkenfeld

H O C H
S C H U L E
T R I E R

Übertragungswege

Schmierinfektion \Rightarrow Handdesinfektion

Tröpfcheninfektion $> 5 \mu\text{m}$ \Rightarrow Abstand, Maske

Aerosolinfektion $< 5 \mu\text{m}$ \Rightarrow Maske FFP2 oder FFP3

\Rightarrow Luftreinigung / -austausch
(Reduktion der Keimlast)

„Verdünnung“ der Belastung durch Außenluftzufuhr

Belastete **Abluft** wird **abgeführt** und durch **unbelastete Außenluft ersetzt**.

Vorteil

Belastete Raumluft wird durch „**Frischluf**t“ ersetzt. Der **CO₂-Anteil** wird niedrig gehalten. Auch andere **gasförmige Schadstoffe** werden reduziert.

Nachteil

Die enthaltene **Wärme** wird ebenfalls **abgeführt**. Dieser Nachteil kann durch WRG gemildert werden.

Die **Feuchte** im Raum wird auch **abgeführt**. Der Raum **trocknet** mit zunehmender AUL-Menge **aus**.

Befeuchtung wird „**notwendiger**“.

„Verdünnung“ der Belastung durch Filtration

Belastete **Abluft** wird **gefiltert** und als „unbelastete“ **Umluft** dem Raum erneut zugeführt.

Vorteil

Die **Wärme** und **Feuchte** im Raum werden **wenig beeinflusst**.

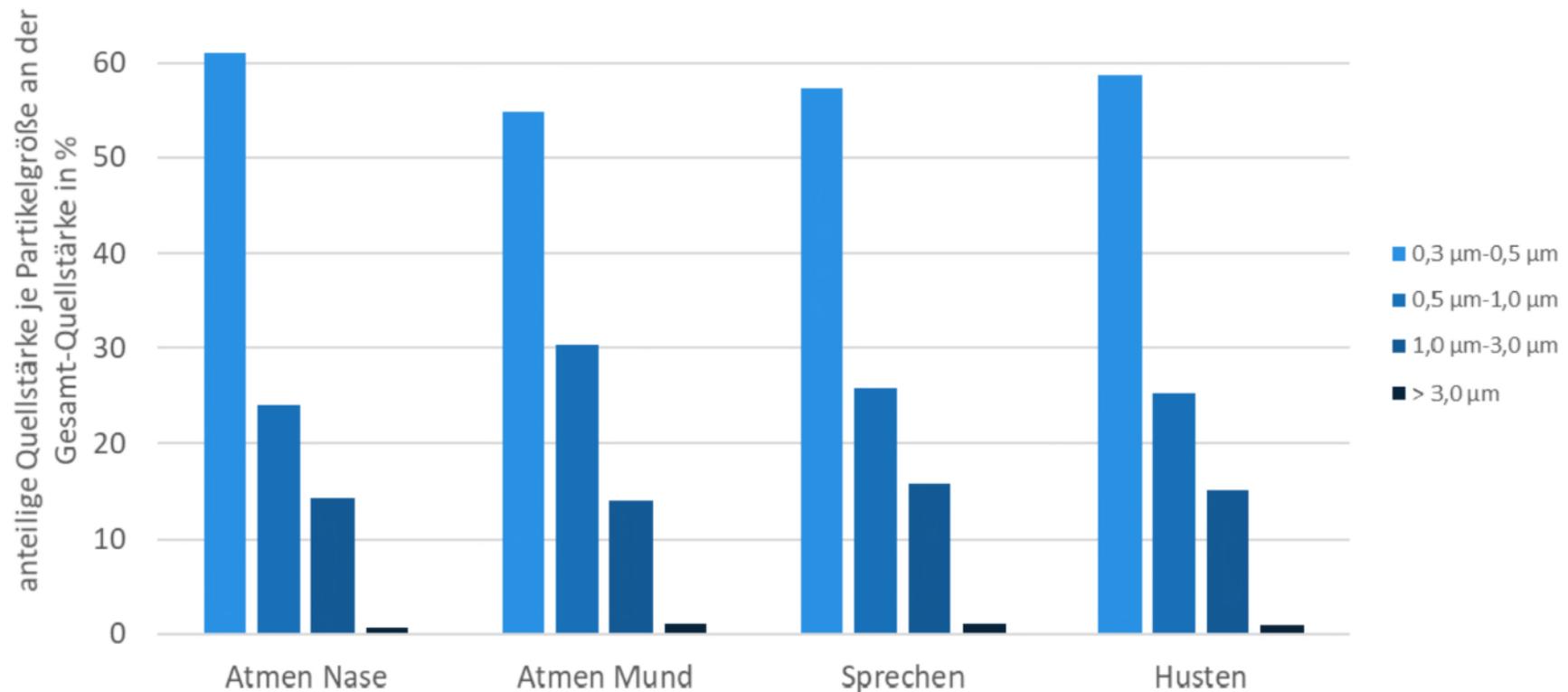
Nachteil

Die belastete Raumluft wird nicht durch „**Frischluf**t“ ersetzt.

Der **CO₂-Anteil** wird nicht reduziert.

Auch andere **gasförmige Schadstoffe** werden nicht verringert.

Aerosolverteilung (Messungen HRI)



Atmen rund 50 Partikel pro Sekunde **Sprechen** rund 200 P/s

Singen rund 3.000 Partikel pro Sekunde

erforderliche Lüftungsrate

$$Q_h = G_h / (C_{h,i} - C_{h,o}) / \varepsilon_V$$

Q_h durch Verdünnung erforderliche **Lüftungsrate** [m³/s]

G_h **die Stofflast einer Verunreinigung** [mg/s]

$C_{h,i}$ **der Richtwert für eine Verunreinigung** [mg/m³]

$C_{h,o}$ Konzentration in der Zuluft [mg/m³]

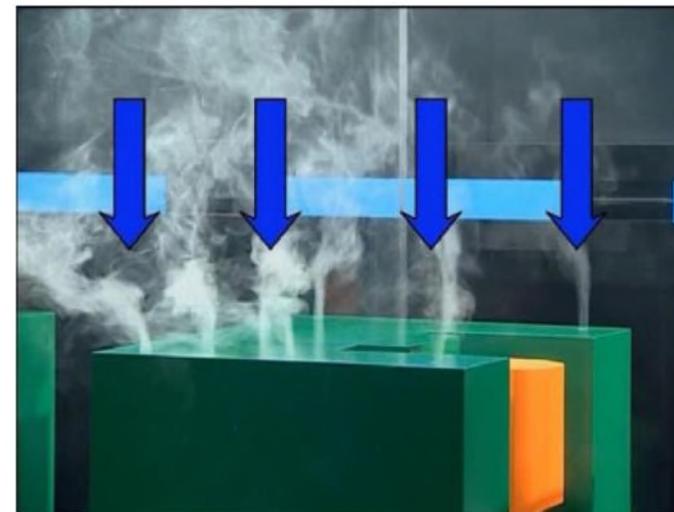
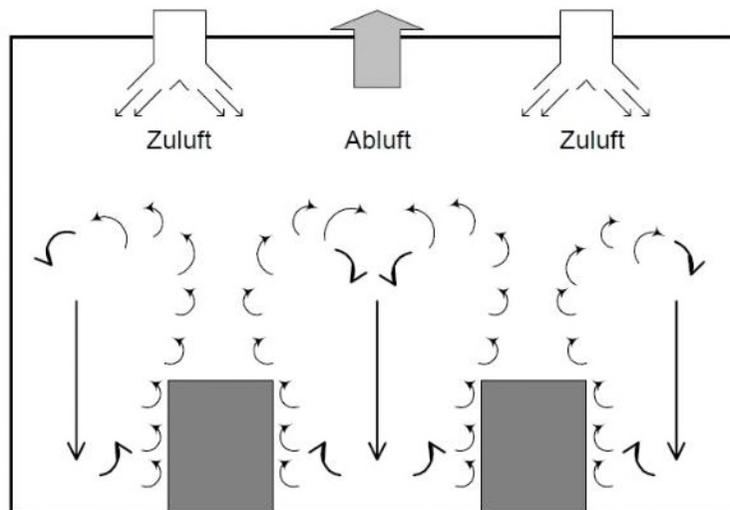
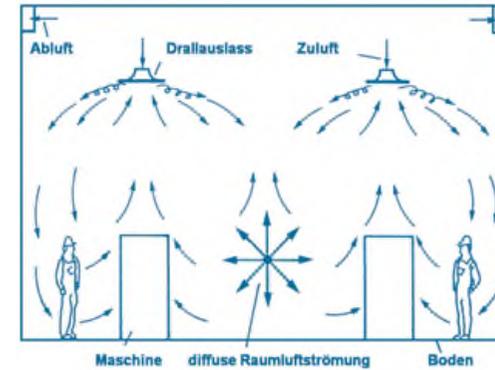
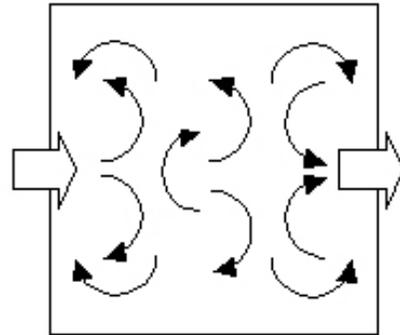
ε_V **Lüftungseffektivität**

Lüftungseffektivität

$$\varepsilon_V = (c_E - c_S) / (c_I - c_S)$$

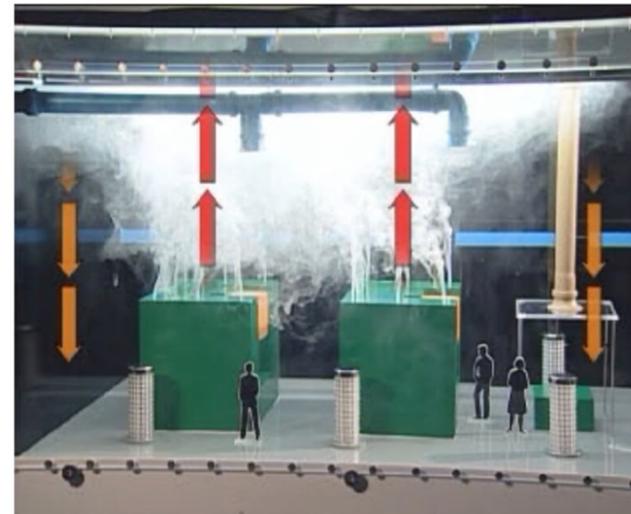
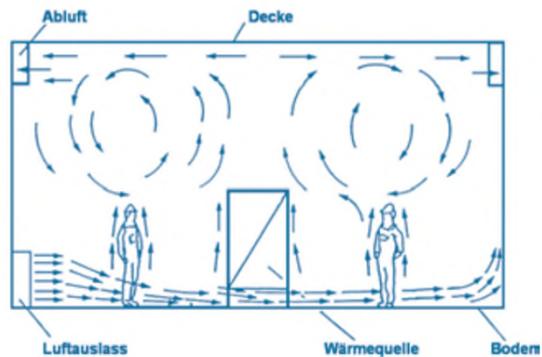
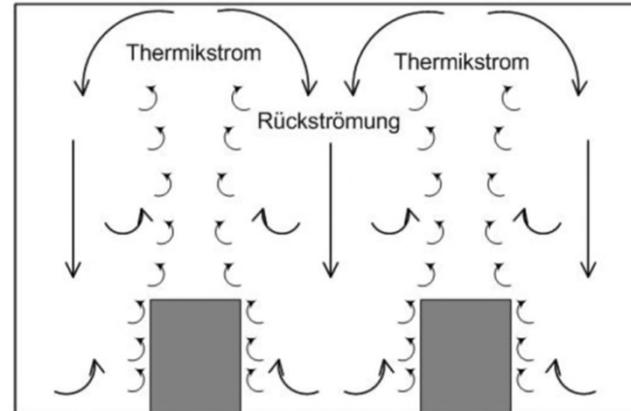
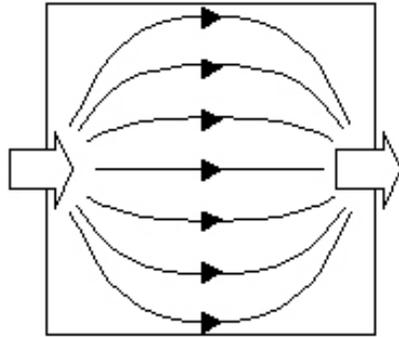
- ε_V Lüftungseffektivität (1 = ideale **Mischlüftung**
> 1 **Quelllüftung** und < 1 Kurzschlusslüftung)
- c_E Verunreinigungskonzentration Abluft [mg/m³]
- c_S Verunreinigungskonzentration Zuluft [mg/m³]
- c_I Verunreinigungskonzentration Atemluft [mg/m³]

Verdünnungslüftung



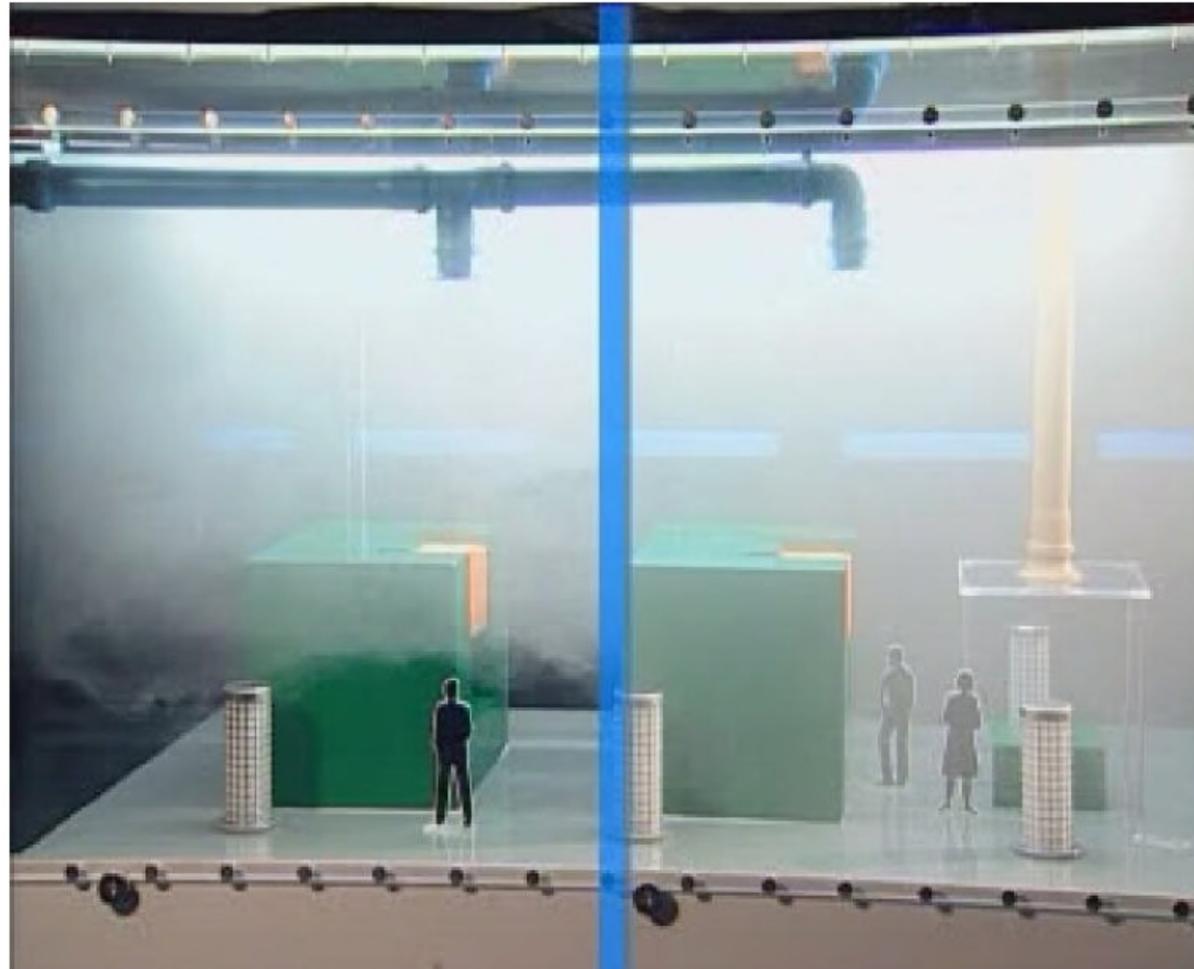
Prinzip der Mischlüftung / Verdünnungslüftung $TU = 30$ bis 60%

Verdrängungslüftung



Prinzip der Quelllüftung / Verdrängungslüftung $TU = 20$ bis 25%

Vergleich Quell-/Mischlüftung



Verdrängungslüftung / Verdünnungslüftung

Luftwechsel oder -erneuerungsrate

Luftwechselrate ist abhängig vom Volumenstrom und vom Raumvolumen.

Lufterneuerung

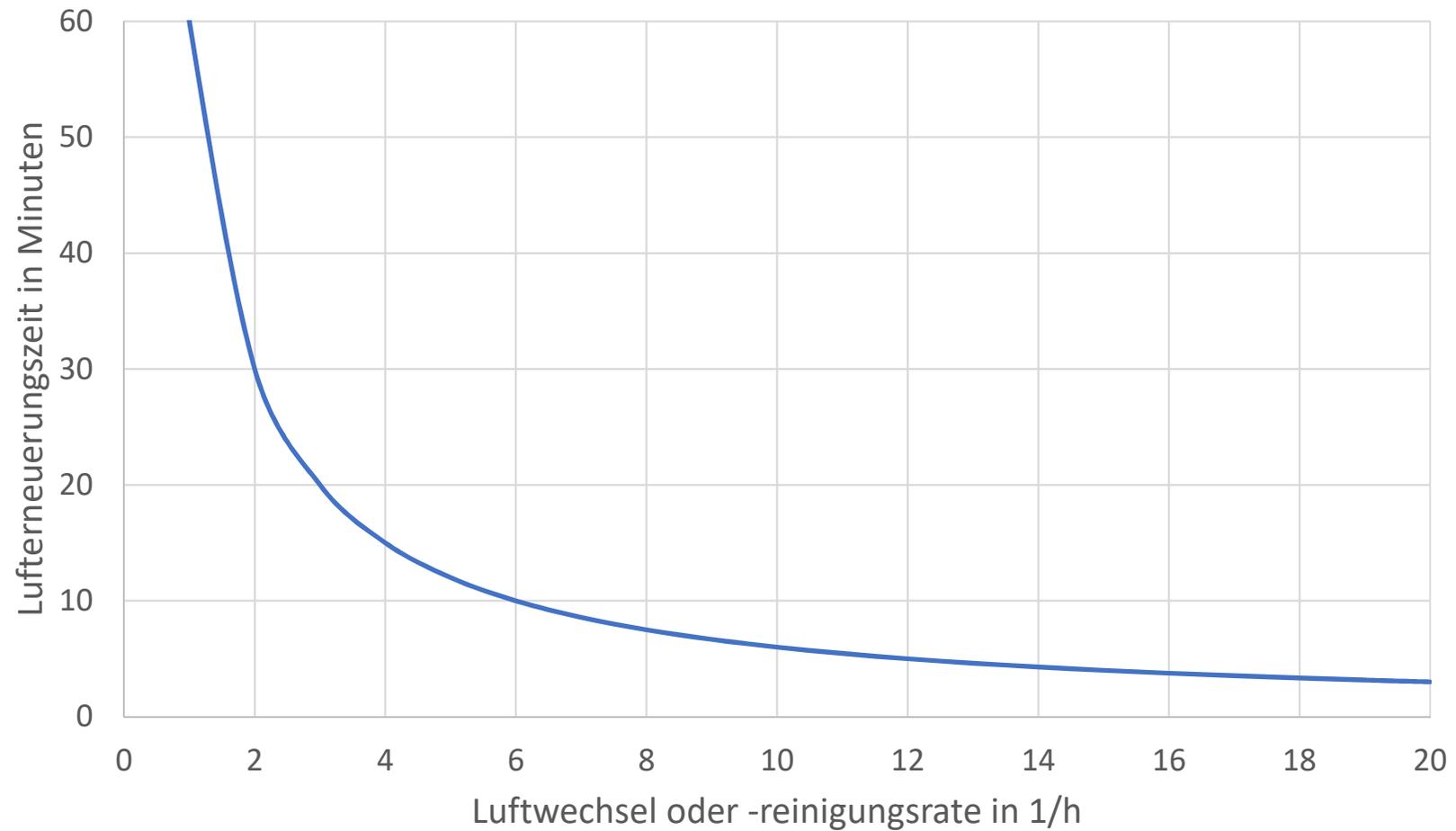
Soll alle **20 Minuten** die Raumluft erneuert werden ist eine **Luftwechselrate von 3** notwendig. Mindestens ist eine $LW = 3$ notwendig um eine stabile Raumströmung zu erreichen.

Empfehlung

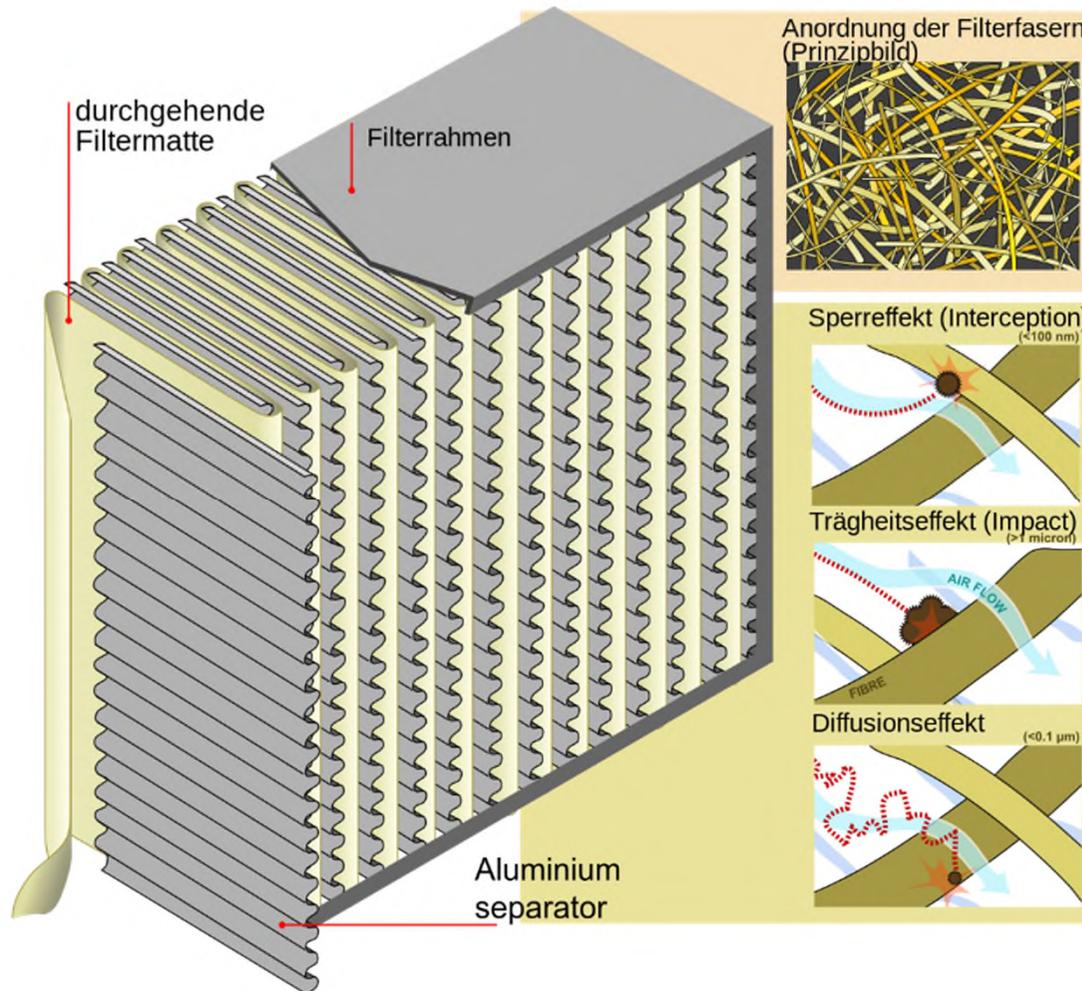
Bis 6-fachem Luftaustausch bestehen meist **keine Bedenken** in Bezug auf Zugerscheinungen.

Laut **VDI EE 4300 Blatt 14** ist mindestens **4-facher Luftwechsel** entsprechend empfohlen.

Luftwechsel- oder -erneuerungsrate zur -zeit



HEPA = High-Efficiency Particulate Air/Arrestance



Abscheidegrade

H13 99,95 %

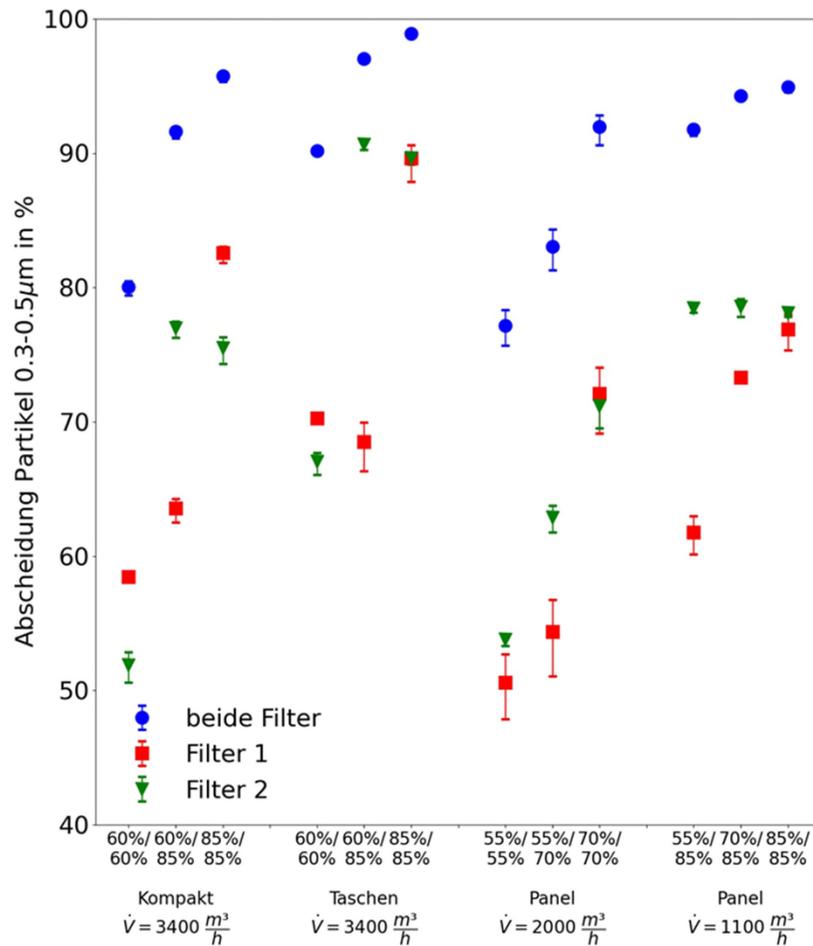
H14 99,995 %

0,1 bis 0,3 μm

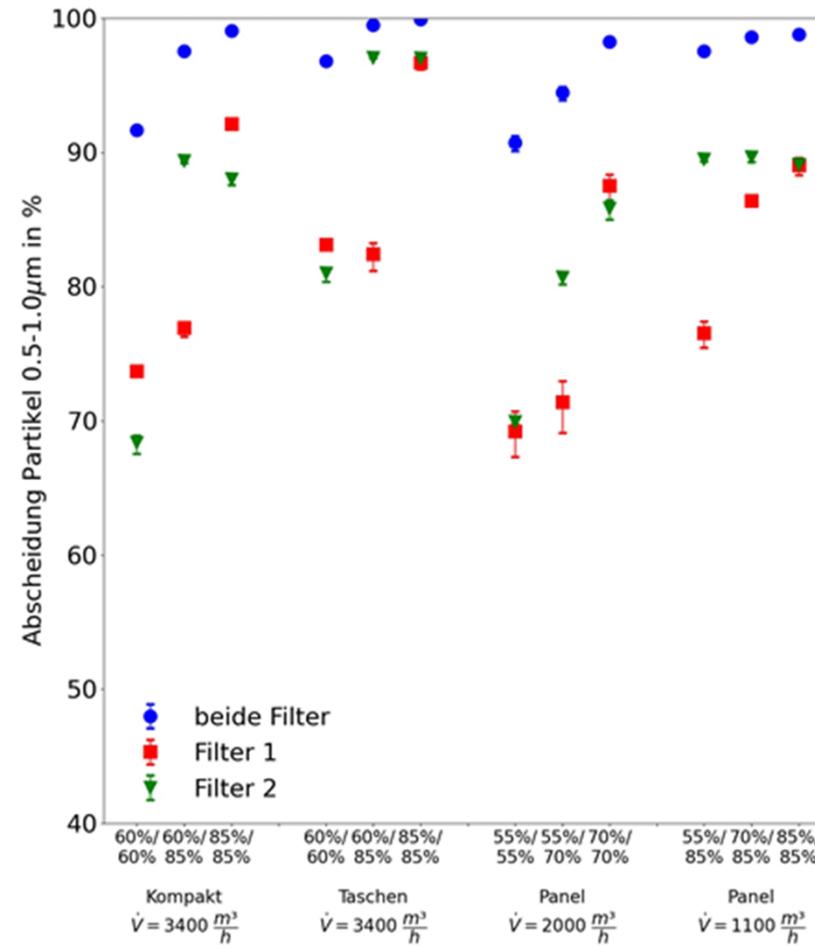
nach EN 1822

MPPS = most penetrating particle size

Feinfilter-Abscheidegrade (Messungen HRI 2020)

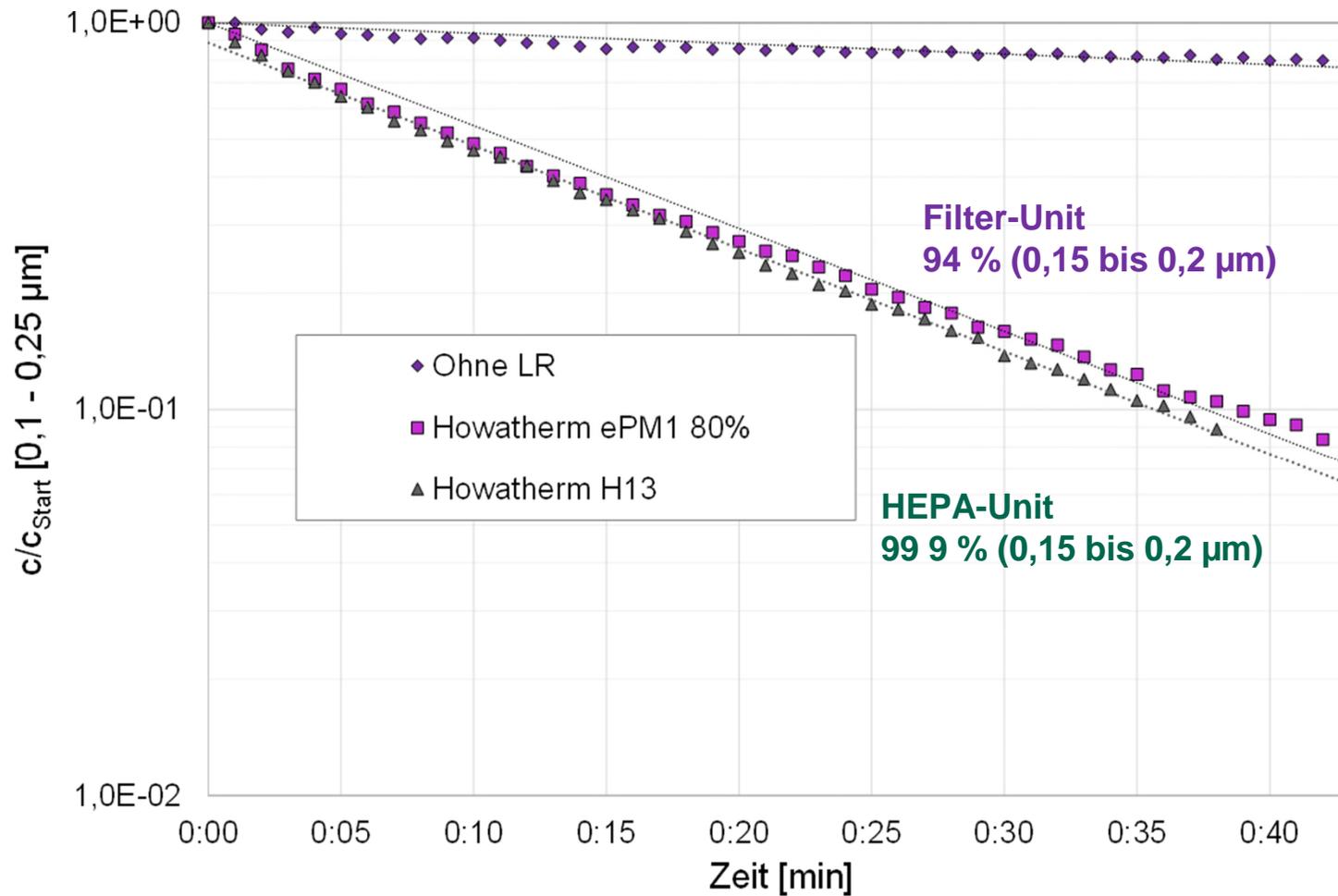


Aerosolpartikel 0,3 bis 0,5 μm

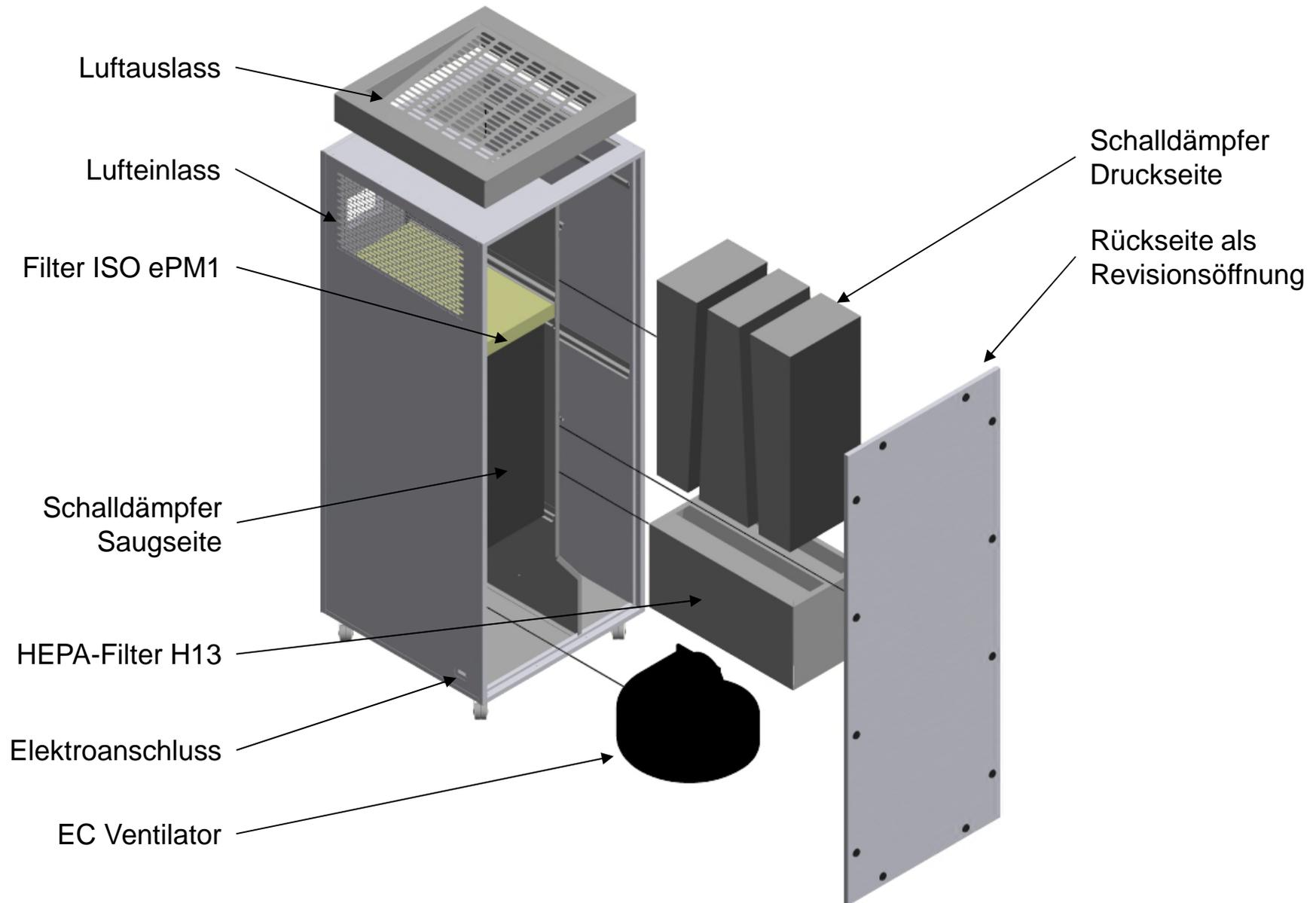


Aerosolpartikel 0,5 bis 1,0 μm

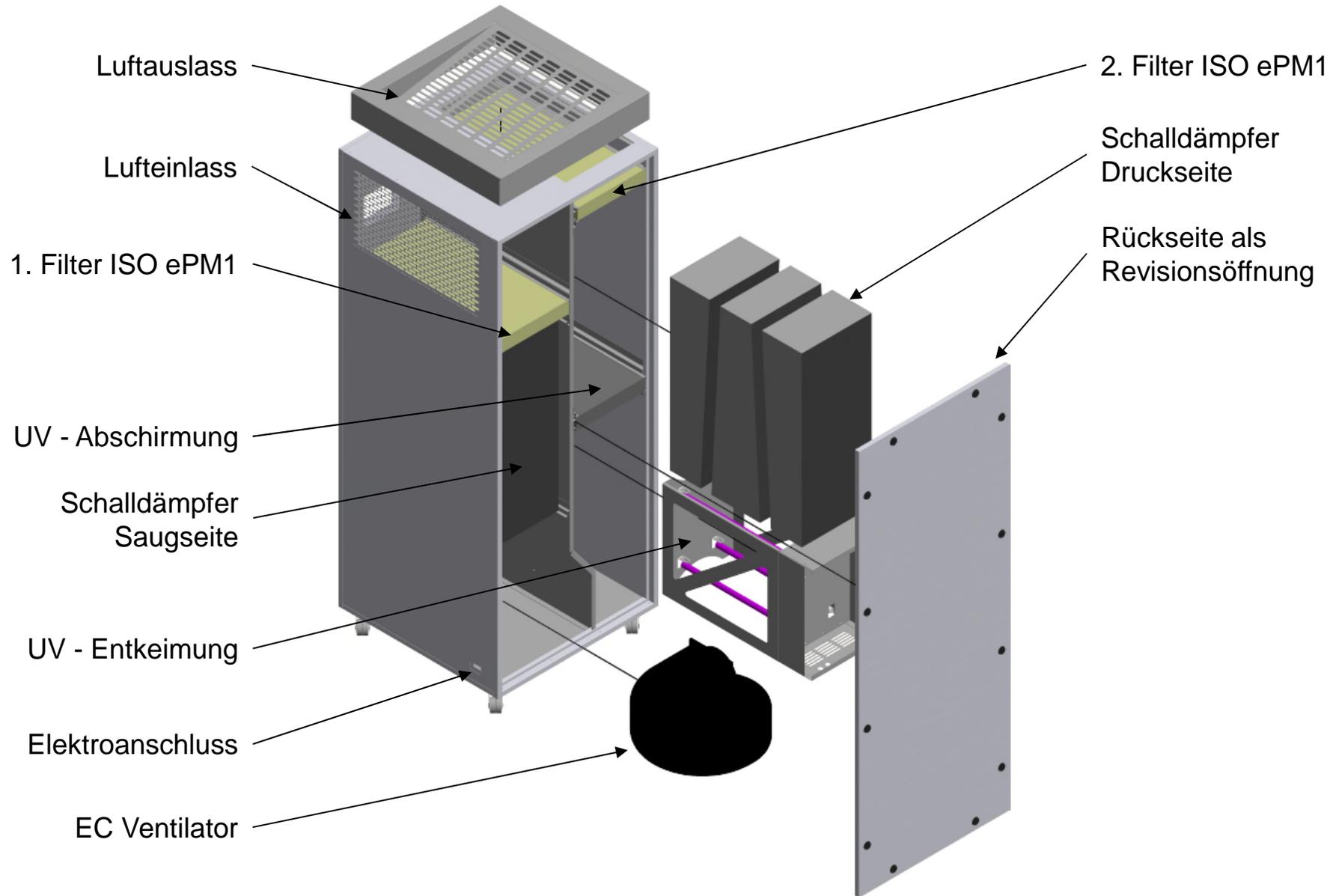
Messung des ILK Dresden 2020



Filter-Unit+ compact



UV-Unit compact



Unit compact



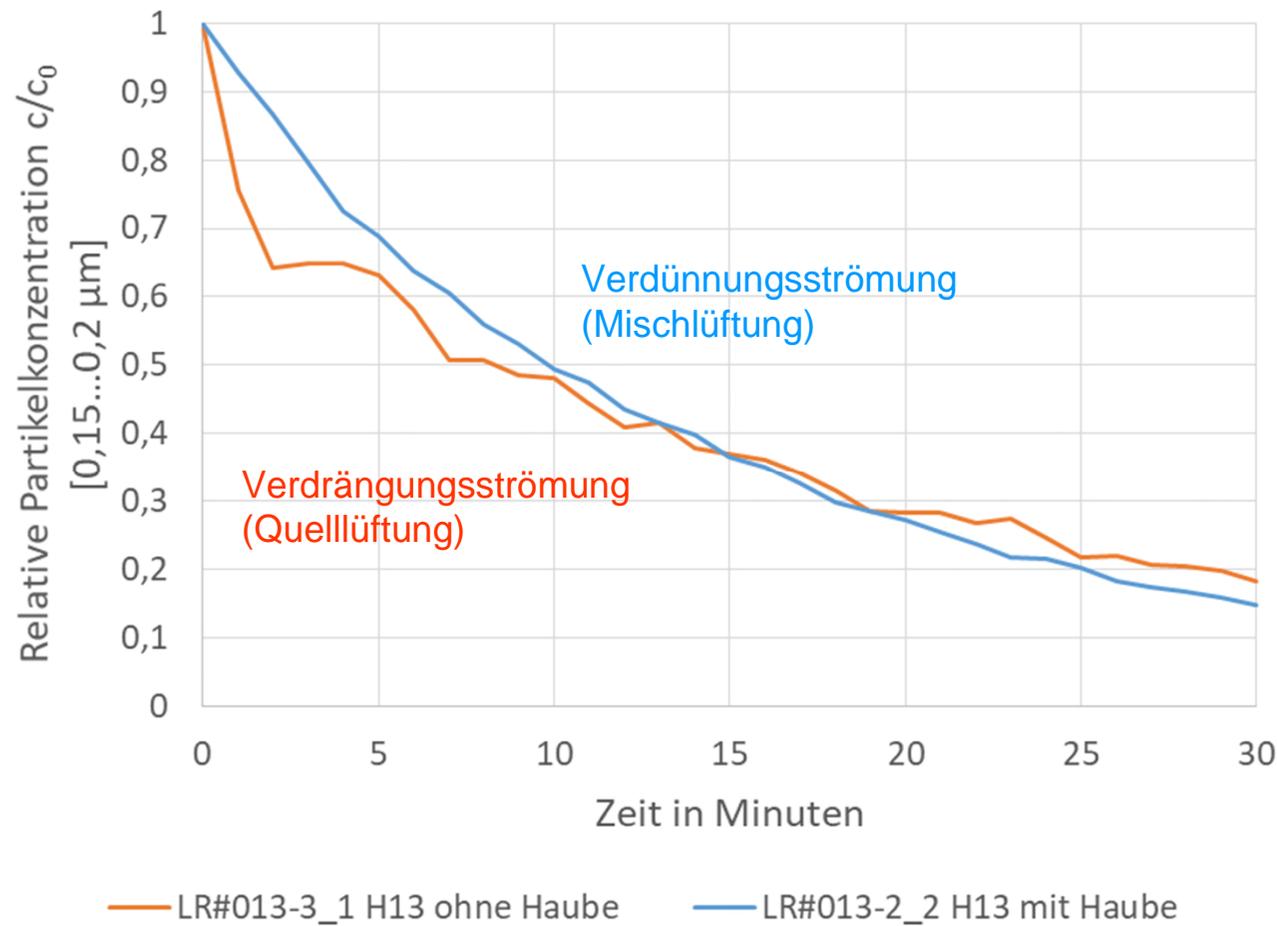
Messung des ILK Dresden 2020 (Mischluftaufsatz) LW = 3



Messung des ILK Dresden 2020 (Quellluftaufsatz) LW = 3



Messung des ILK Dresden 2020

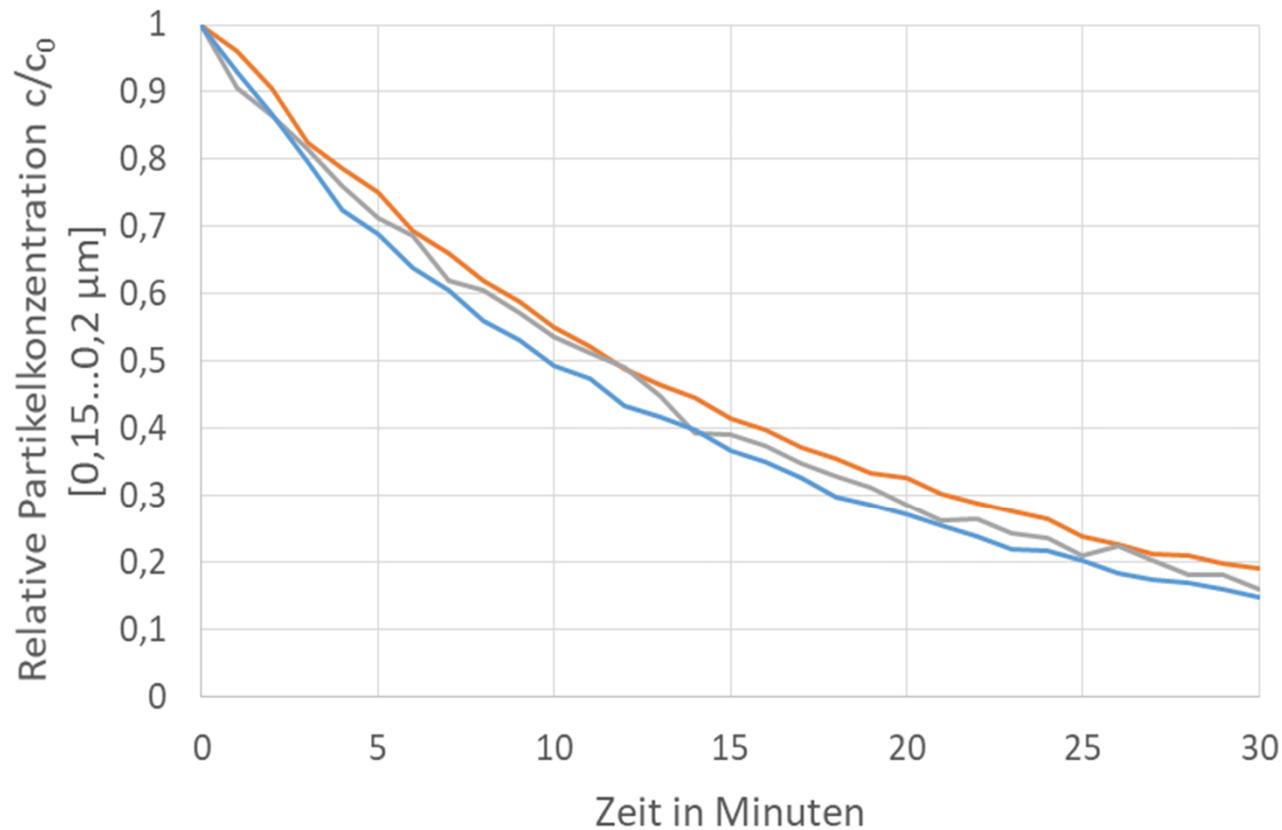


LR = 3,7 h⁻¹

RL = 3,6 h⁻¹ mit ML

RL = 3,0 h⁻¹ mit QL

Messung des ILK Dresden 2020



LR = 3,7 h⁻¹

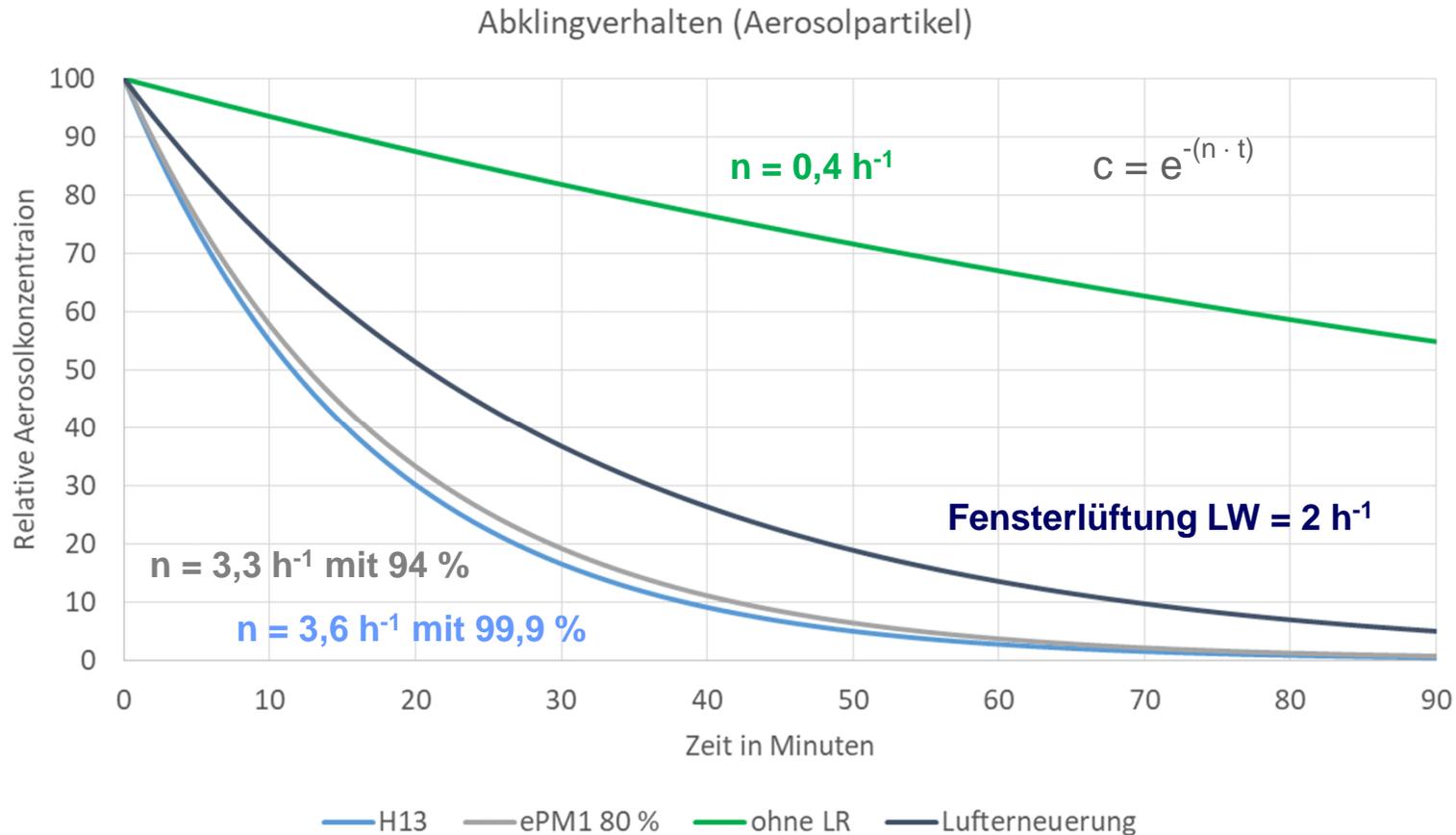
RL = 3,6 h⁻¹ mit HEPA

RL = 3,3 h⁻¹ mit ePM1

— LR#013-1 ePM1_80 mit Haube — LR#013-2 H13 mit Haube

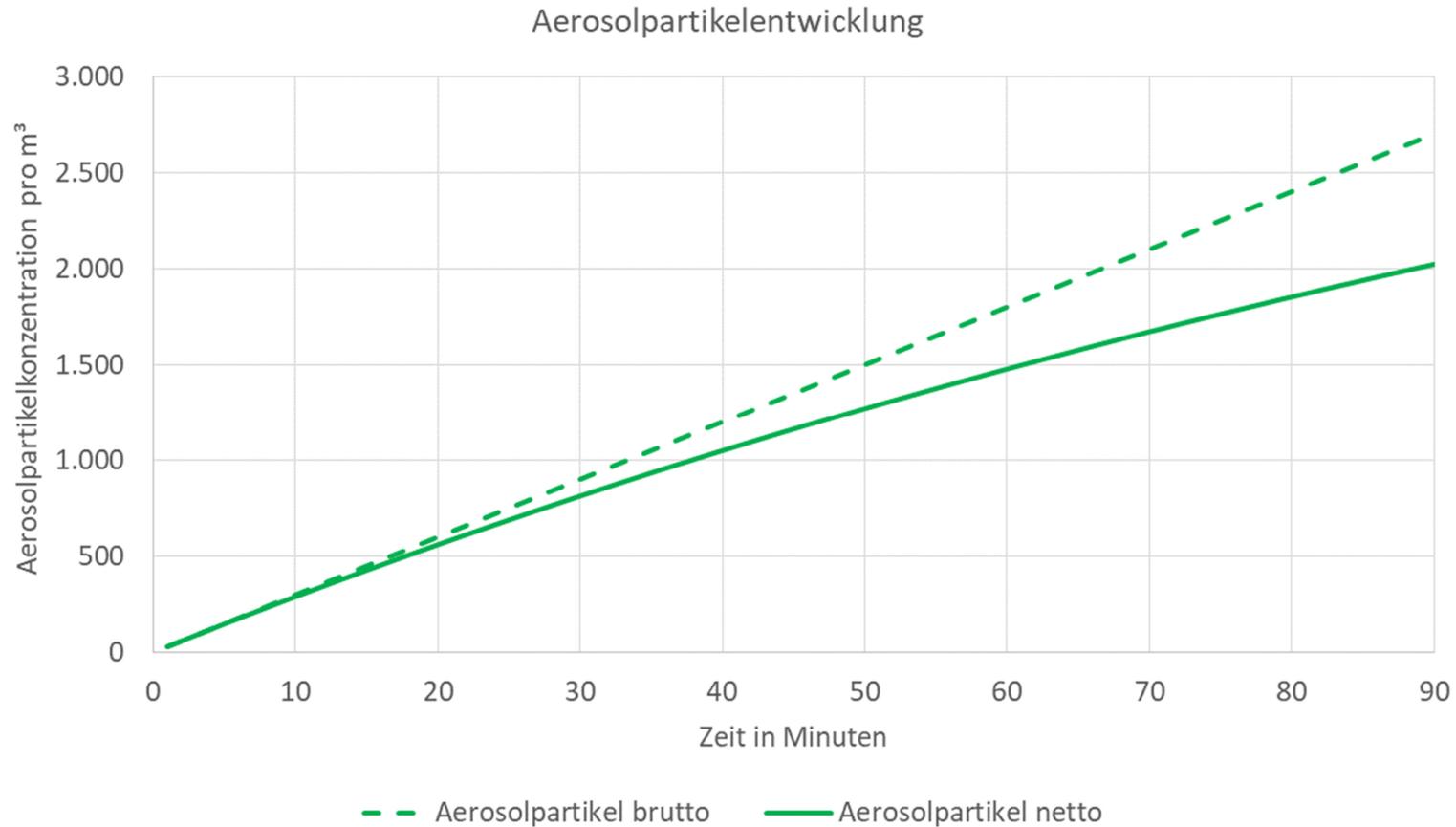
— LR#013-2_2 H13 mit Haube

Reduktion nach „Anfangsbelastung“



Reduktion einer Anfangskonzentration mit LR = 3,6 h⁻¹ (Messung HEPA H13) im **Vergleich** zur **Lüftung (LW = 2 h⁻¹)**

„Reale“ Partikelentwicklung mit infektiöser Person



Person spricht mit \varnothing 100 Aerosolpartikeln pro Sekunde (Emission bei einem Raumvolumen von 200 m³) (**keine Maske**)

Konzentrationsänderung

$$c(t) = c_a + q / (n \cdot V) \cdot (1 - e^{-n \cdot t})$$

c(t) Konzentrationsverlauf über die Zeit (t) [z. B. ppm]

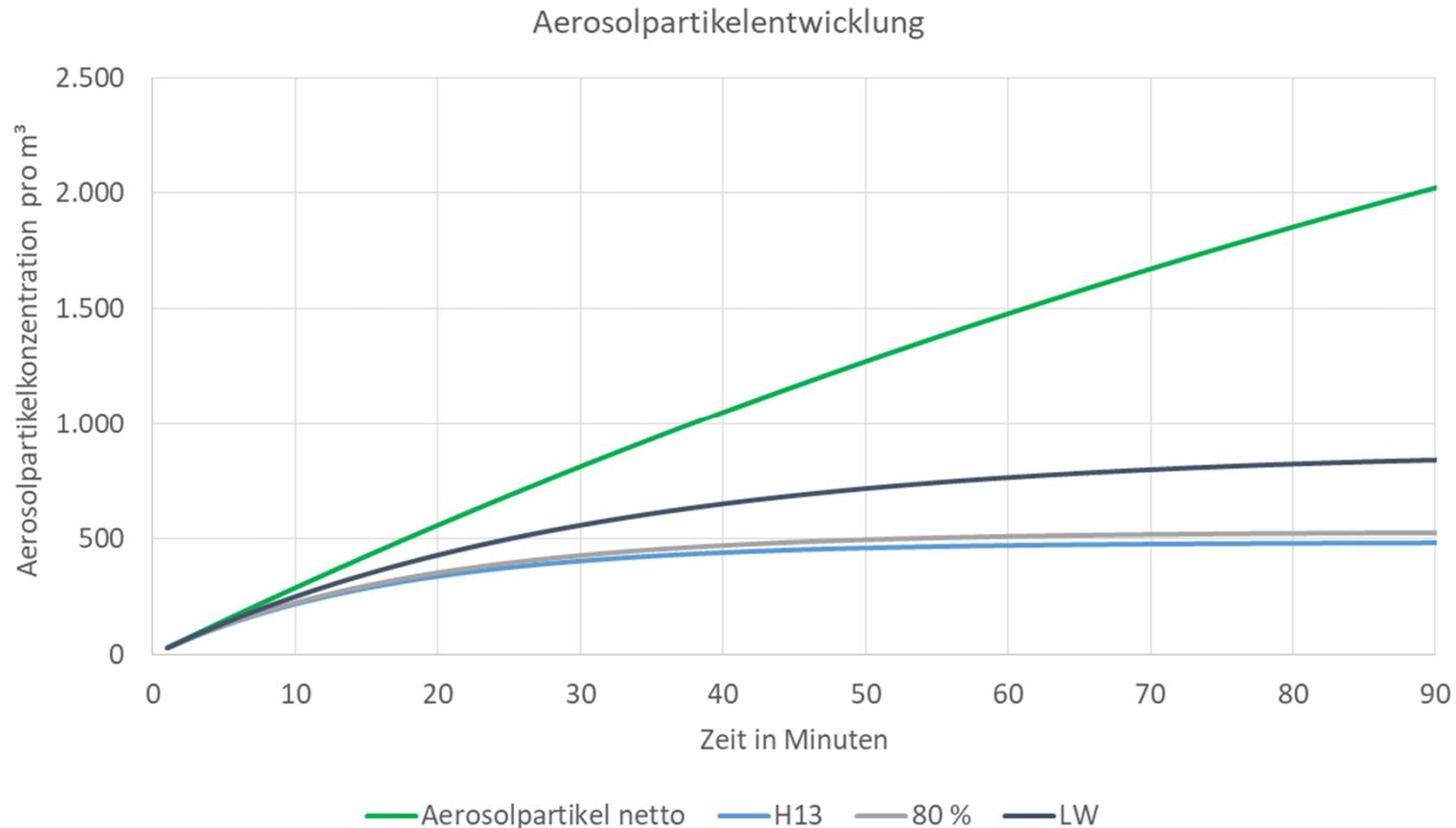
c_a Anfangskonzentration [z. B. ppm]

n **Luftwechsel je h** [h⁻¹]

q **Abgabe der Personen** z. B. CO₂ [z. B. l/h]

V **Raumvolumen** [m³]

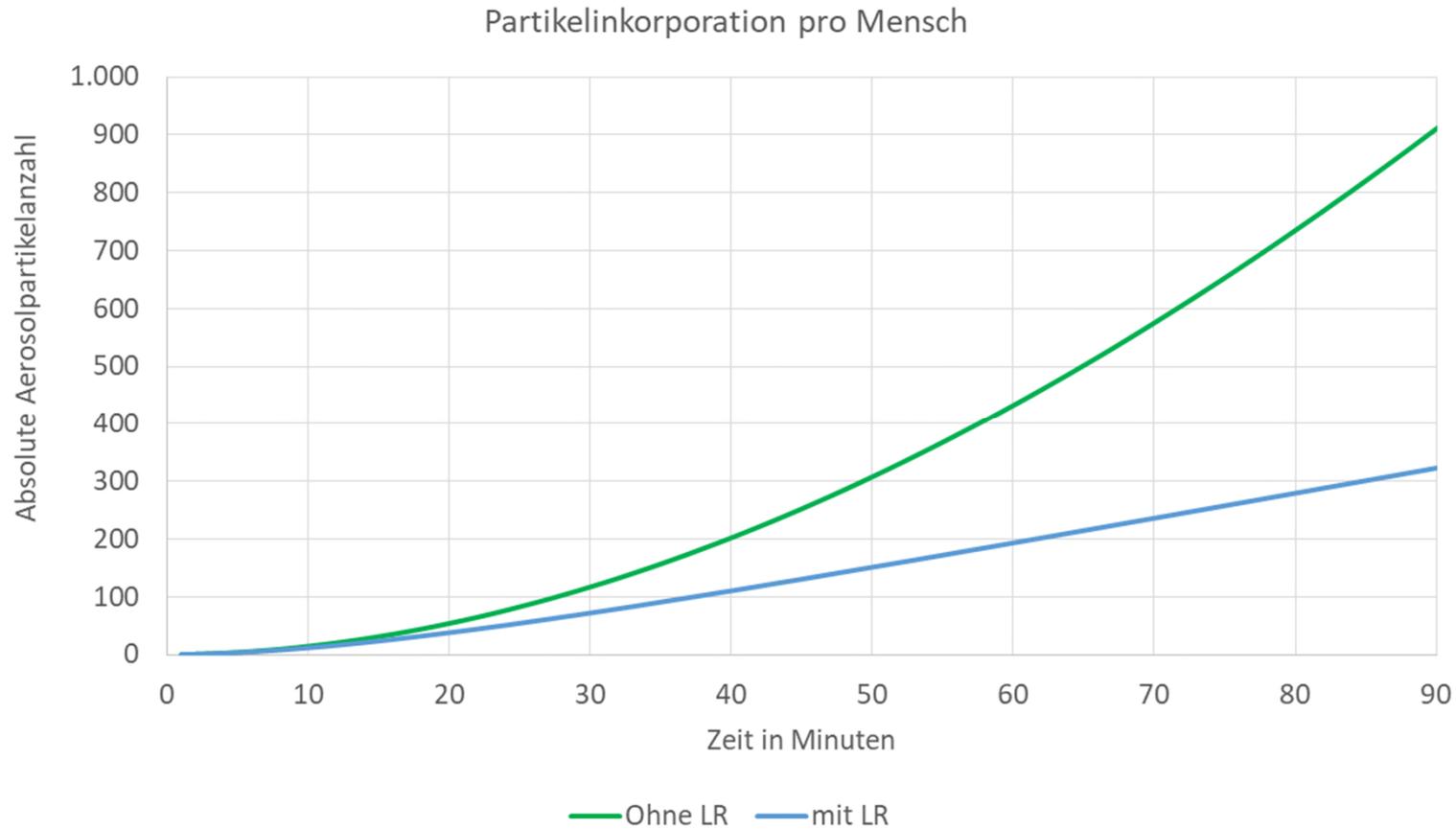
Partikelentwicklung mit einer infizierten Person



Konzentration an Aerosolen mit $LR = 3,6 \text{ h}^{-1}$ (HEPA H13) im **Vergleich** zur **Fensterlüftung mit $LW = 2 \text{ h}^{-1}$**

Person spricht mit $\varnothing 100$ Aerosolpartikeln pro Sekunde (Emission bei einem Raumvolumen von 200 m^3) (**keine Maske**)

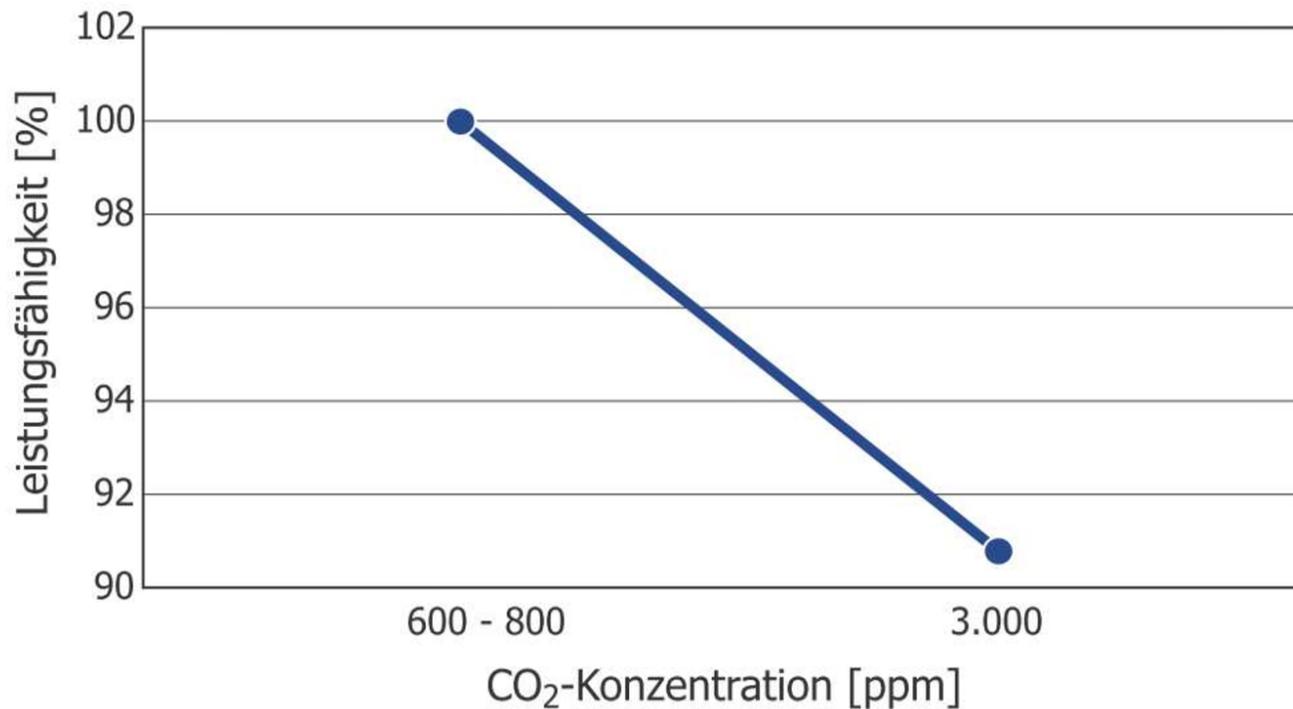
Partikelinkorporation



Inkorporation von Aerosolen mit $LW = 3,6 \text{ h}^{-1}$ (HEPA) im Vergleich ohne LR

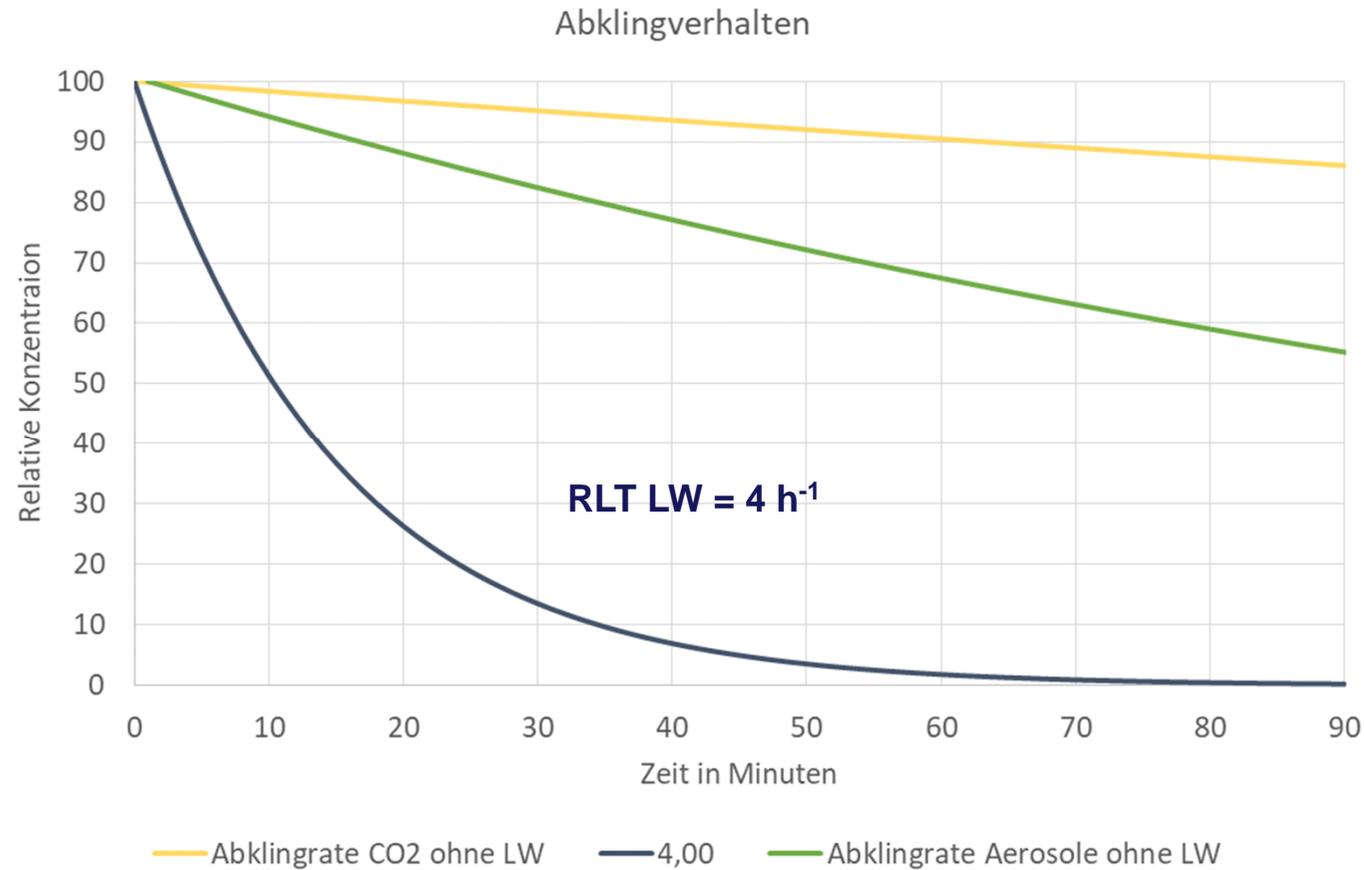
Person atmet $0,5 \text{ l/Atemzug}$ mit 18 Zügen pro Minute (**keine Masken**)

CO₂-Einfluss auf die kognitive Leistungsfähigkeit



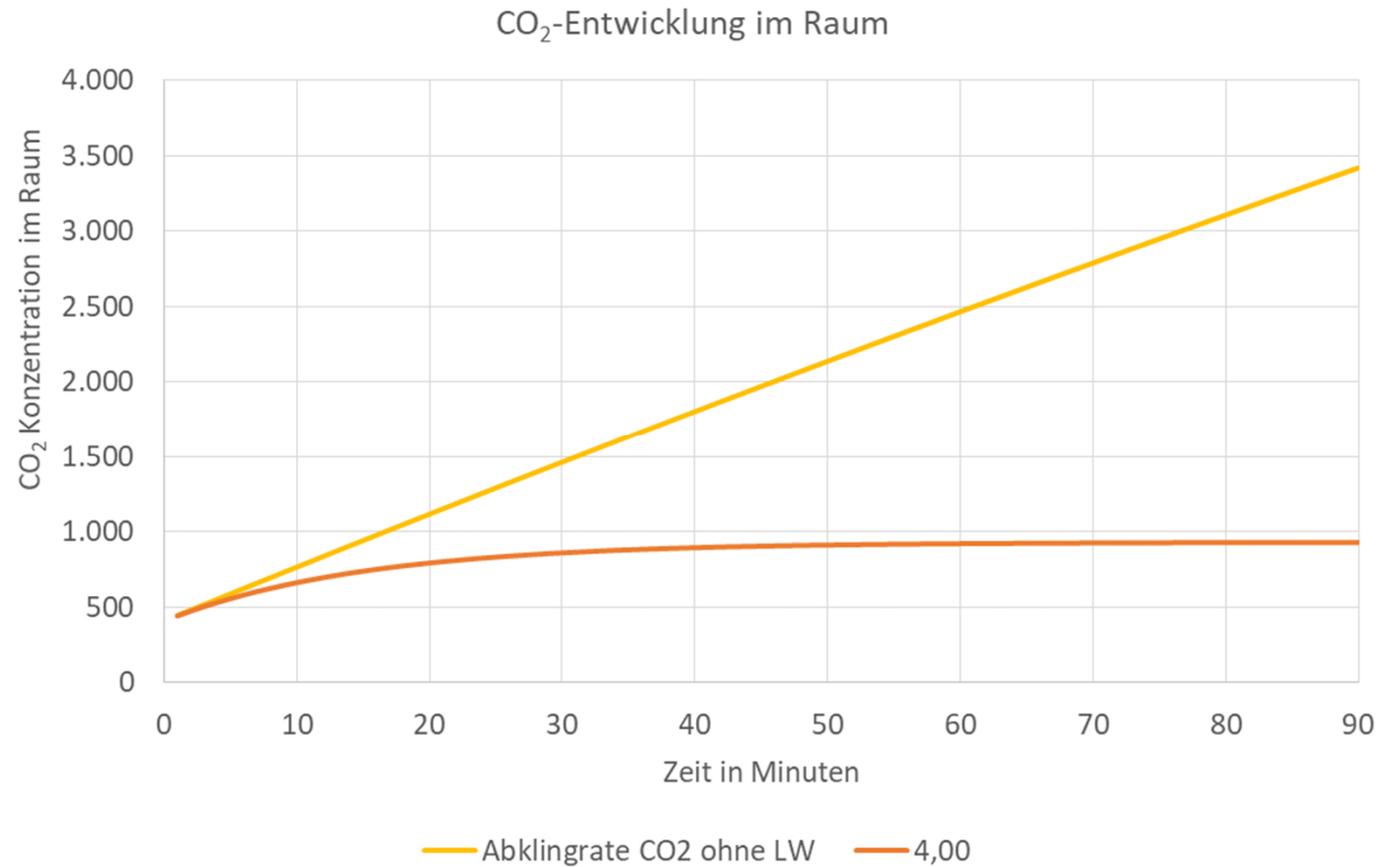
Ergebnis eines in österreichischen Schulen durchgeführten Aufmerksamkeits- und Konzentrationstests in Abhängigkeit unterschiedlicher CO₂-Konzentrationen, Quelle: Ribic, Unser Weg, Heft 5, 2007

Reduktion nach „Anfangsbelastung“



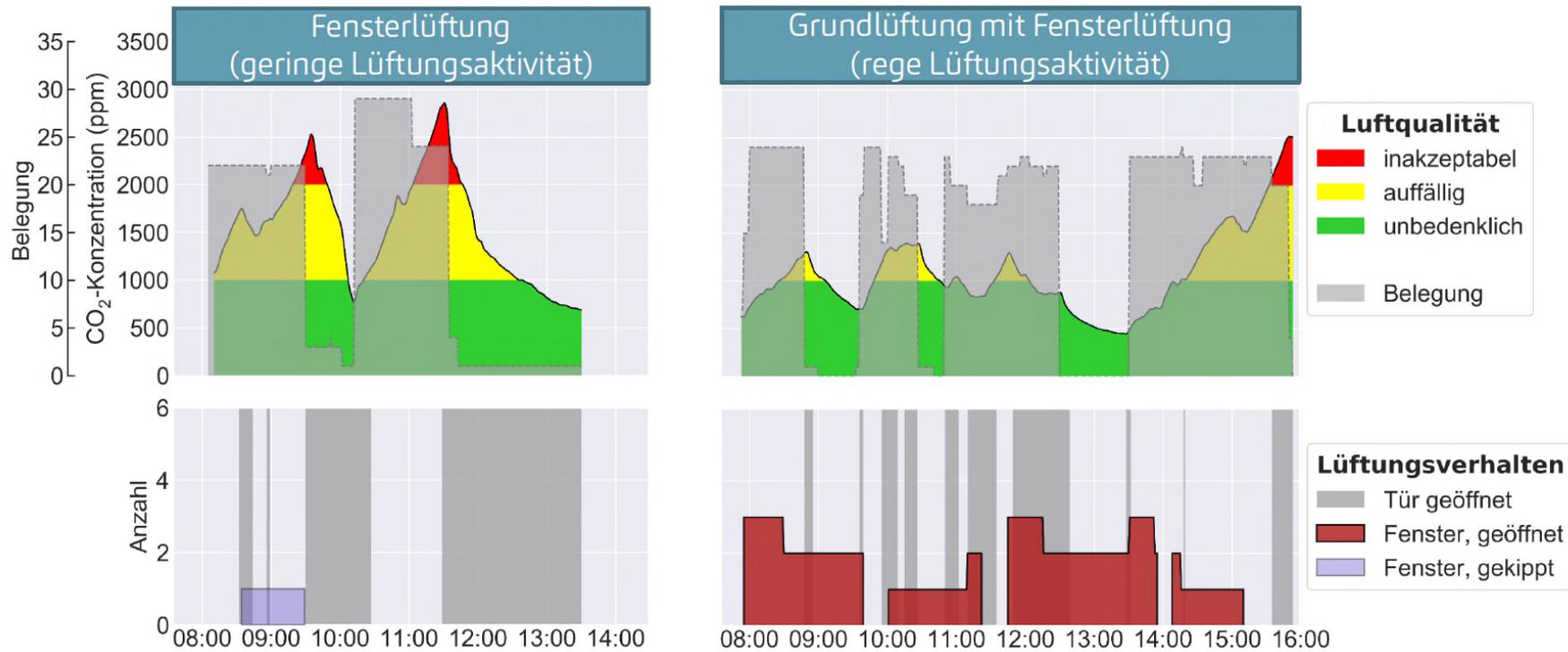
Reduktion einer Anfangskonzentration mit RLT-Anlage mit LW = 4 h⁻¹ / Abklingrate CO₂ 0,1 h⁻¹ / Abklingrate Partikel 0,4 h⁻¹

CO₂-Entwicklung im Raum

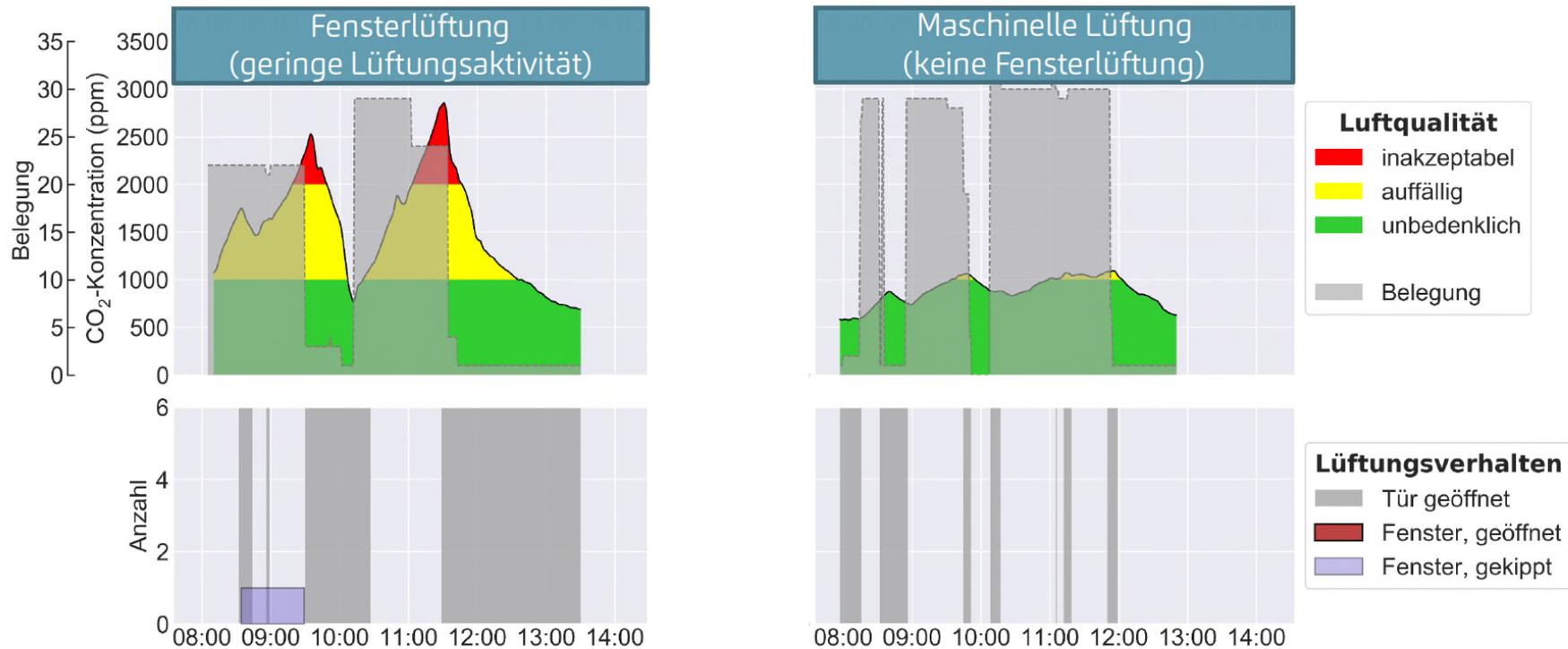


24 Personen mit 18 l/h CO₂-Produktion (Raumvolumen 200 m³) mit **RLT-Anlage** mit **LW = 4 h⁻¹**

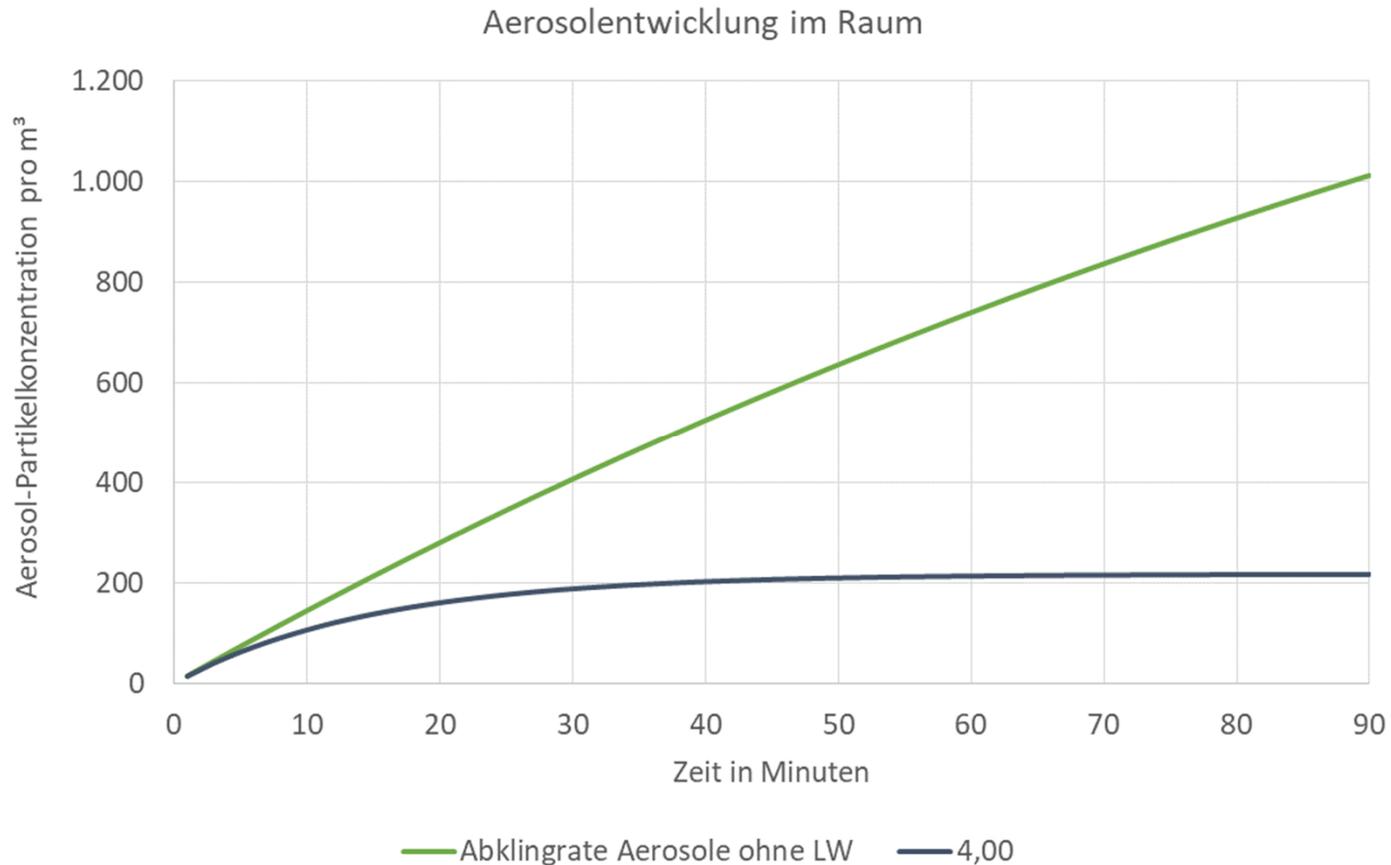
Fensterlüftung gekipptes vs. Offenes Fenster



Fensterlüftung vs. Mechanische Lüftung



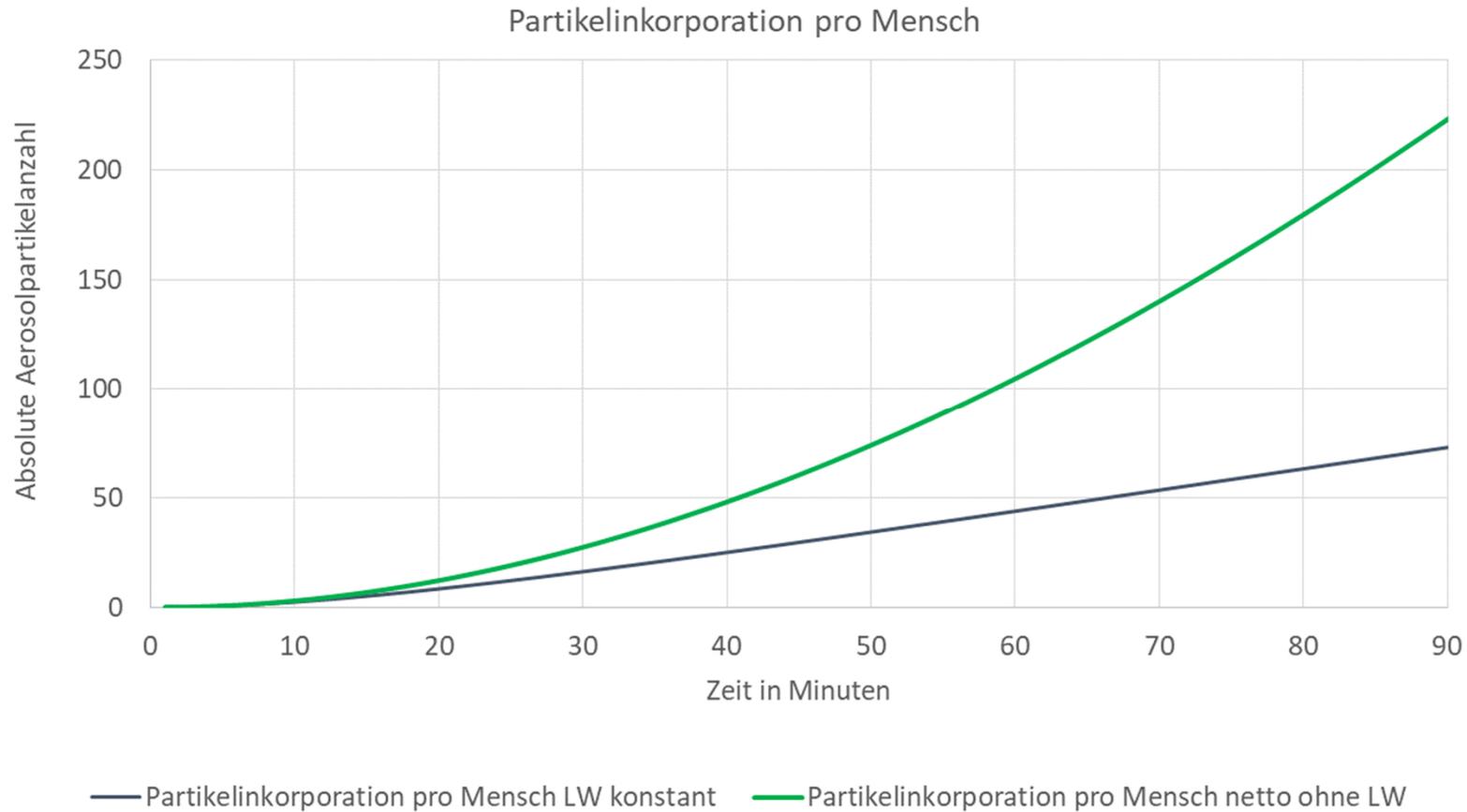
Partikelentwicklung mit einer infizierten Person



Partikelanzahl an Aerosolen **RLT-Anlage mit $LW = 4 \text{ h}^{-1}$ / Maskenreduktion 0,5 Infizierter**

1 Person spricht mit 100 Aerosolpartikeln pro Sekunde (Emission bei einem Raumvolumen von 200 m^3)

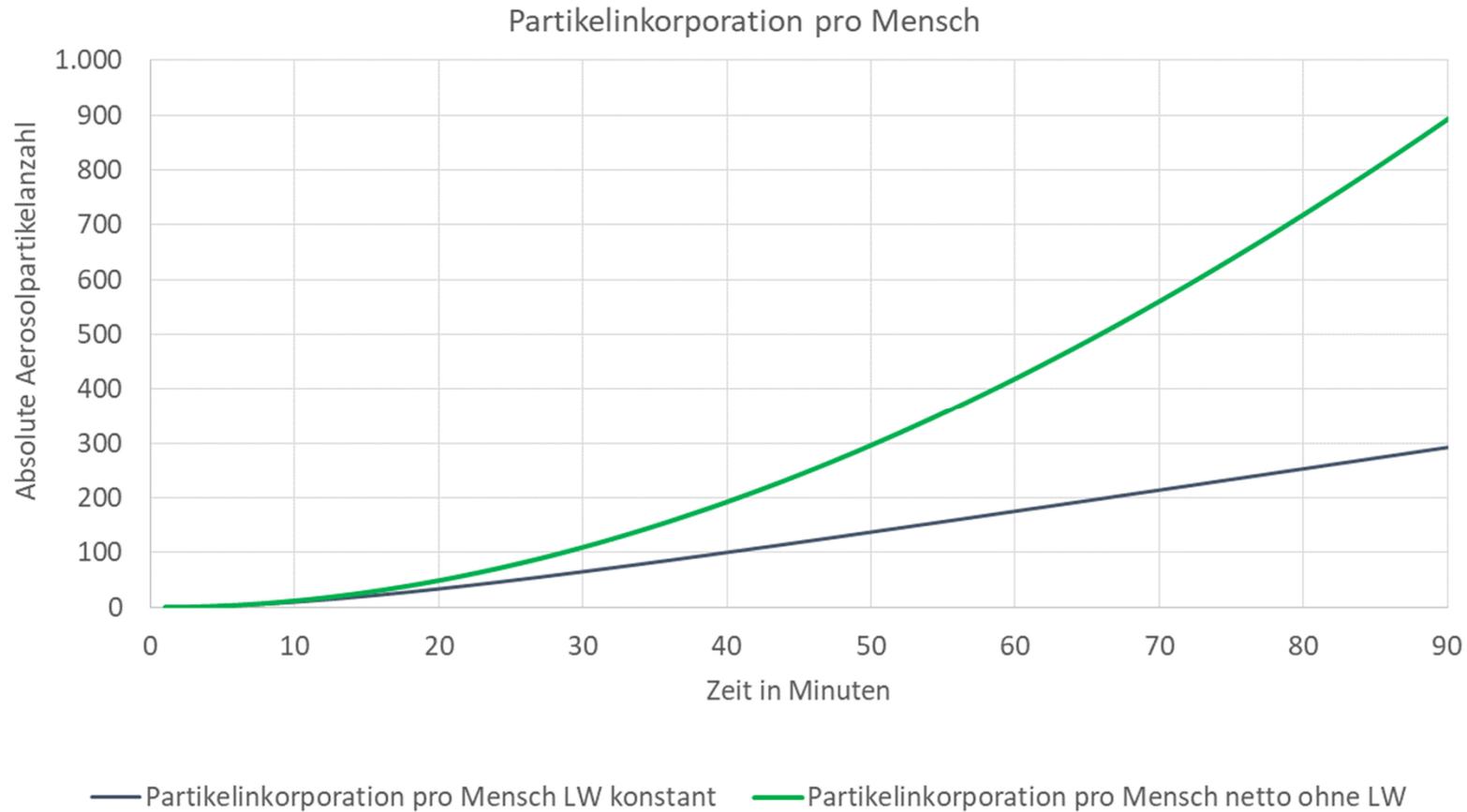
Partikelinkorporation mit Masken



Partikelanzahl an Aerosolen **RLT-Anlage** mit **LW = 4 h⁻¹** (Raumvolumen von 200 m³) 0,5 l/Atemzug bei 15 Atemzüge/Min.

1 Person spricht mit 100 Aerosolpartikeln pro Sekunde (Emission) / **Maskenreduktion 0,5 (Infizierter und Zuhörer)**

Partikelinkorporation ohne Masken

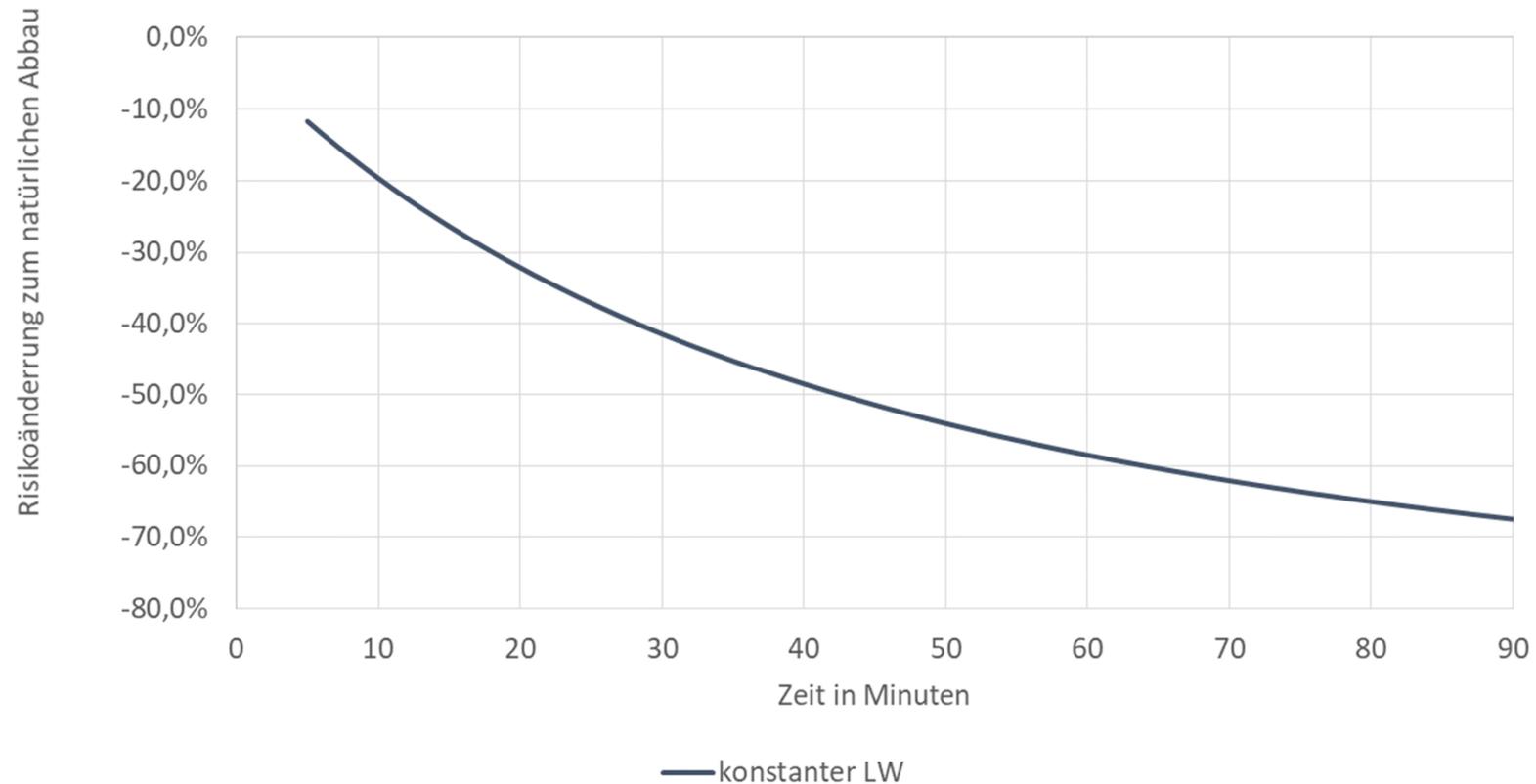


Partikelanzahl an Aerosolen **RLT-Anlage** mit **LW = 4 h⁻¹**

1 Person spricht mit 100 Aerosolpartikeln pro Sekunde (Emission) / **keine** Maskenreduktion (Infizierter und Zuhörer)

Relative Partikelinkorporationsänderung

Risikoänderung gegenüber natürlichem Abbau



RLT-Anlage mit $LW = 4 \text{ h}^{-1}$

1 Person spricht mit 100 Aerosolpartikeln pro Sekunde (Emission) / Maskenreduktion 0,5 (Infizierter und Zuhörer)

Wahrscheinlichkeit mindestens eines Infizierten $k \geq 1$

$$P_{KPR} = 1 - P(0|p, n_R) = 1 - (1 - n_{Inf} / n_P)^{n_R}$$

p Infektionshäufigkeit $p = n_{Inf} / n_P$

n_{Inf} Anzahl der Infizierten

n_P Gesamtmenge der Population

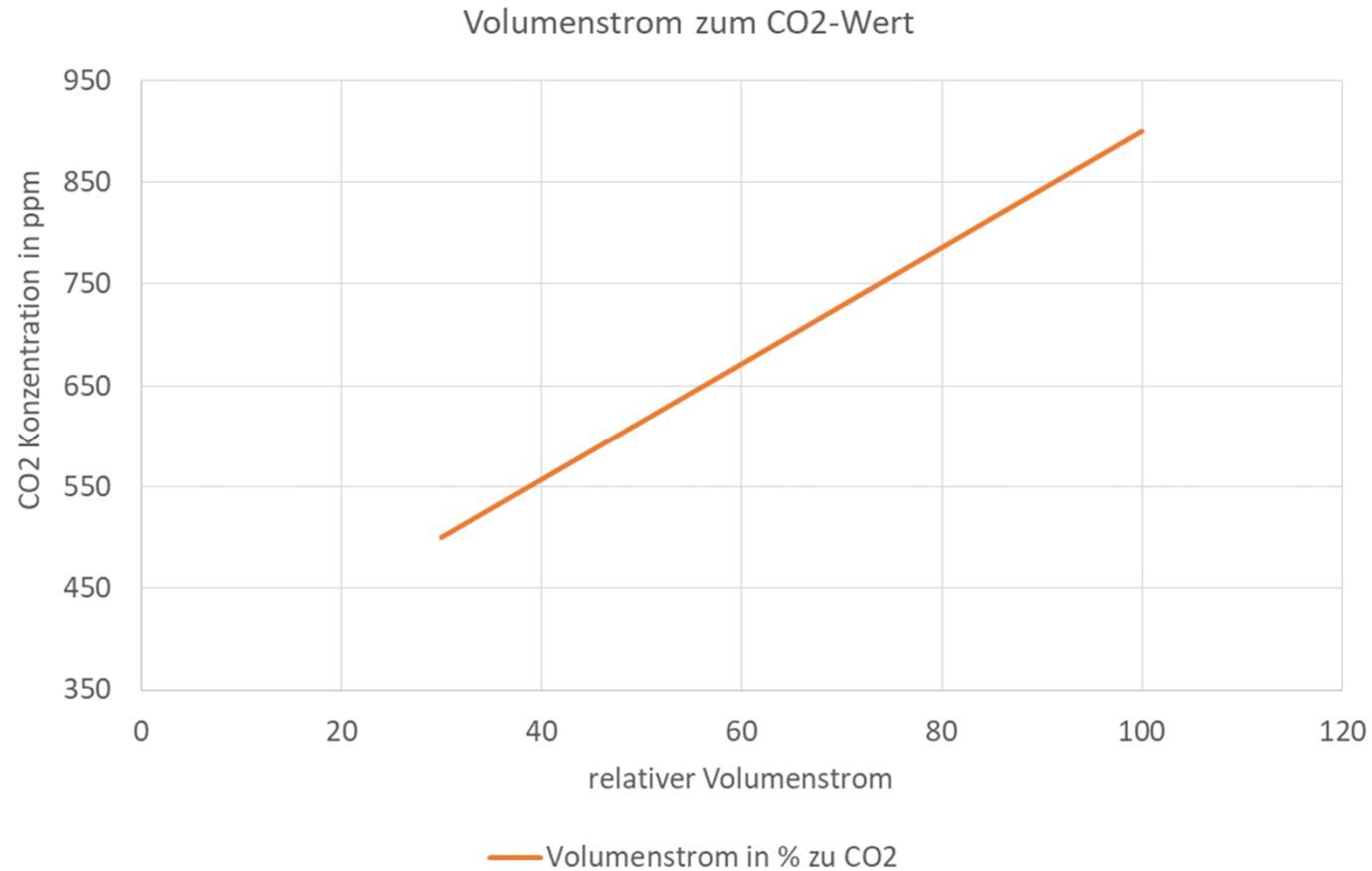
n_R **Anzahl der Personen im Raum**

D.Müller, K. Rewitz, D. Derwein, T.M. Burgholz, M. Schweiker, J. Bardey, P. Tappler Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen (2. überarbeitete und korrigierte Auflage), White Paper, RWTH-EBC 2021-002, Aachen, 2021, DOI: 10.18154/RWTH- 2021-02417

Wahrscheinlichkeit mindestens eines Infizierten $k \geq 1$

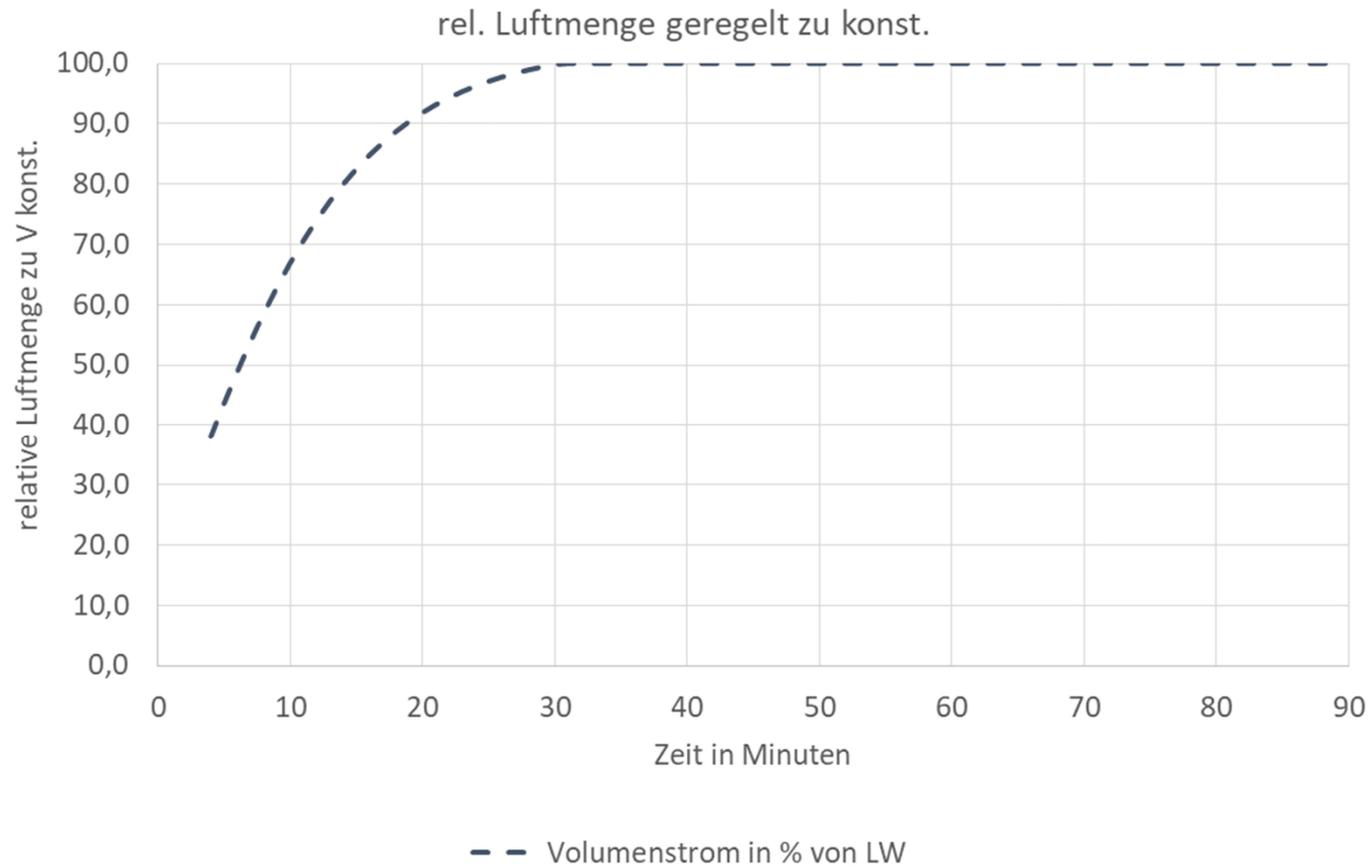
Anzahl Personen im Raum	Inzidenz				
	50	100	150	200	250
5	0,2%	0,5%	0,7%	1,0%	1,2%
10	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%	2,5%
15	0,7%	1,5%	2,2%	3,0%	3,7%
20	1,0%	2,0%	3,0%	3,9%	4,9%
25	1,2%	2,5%	3,7%	4,9%	6,1%
50	2,5%	4,9%	7,2%	9,5%	11,8%
100	4,9%	9,5%	13,9%	18,1%	22,1%
150	7,2%	13,9%	20,2%	25,9%	31,3%
250	11,8%	22,1%	31,3%	39,4%	46,5%
500	22,1%	39,4%	52,8%	63,2%	71,4%
1.000	39,4%	63,2%	77,7%	86,5%	91,8%

CO₂-Regelung der RLT-Anlage



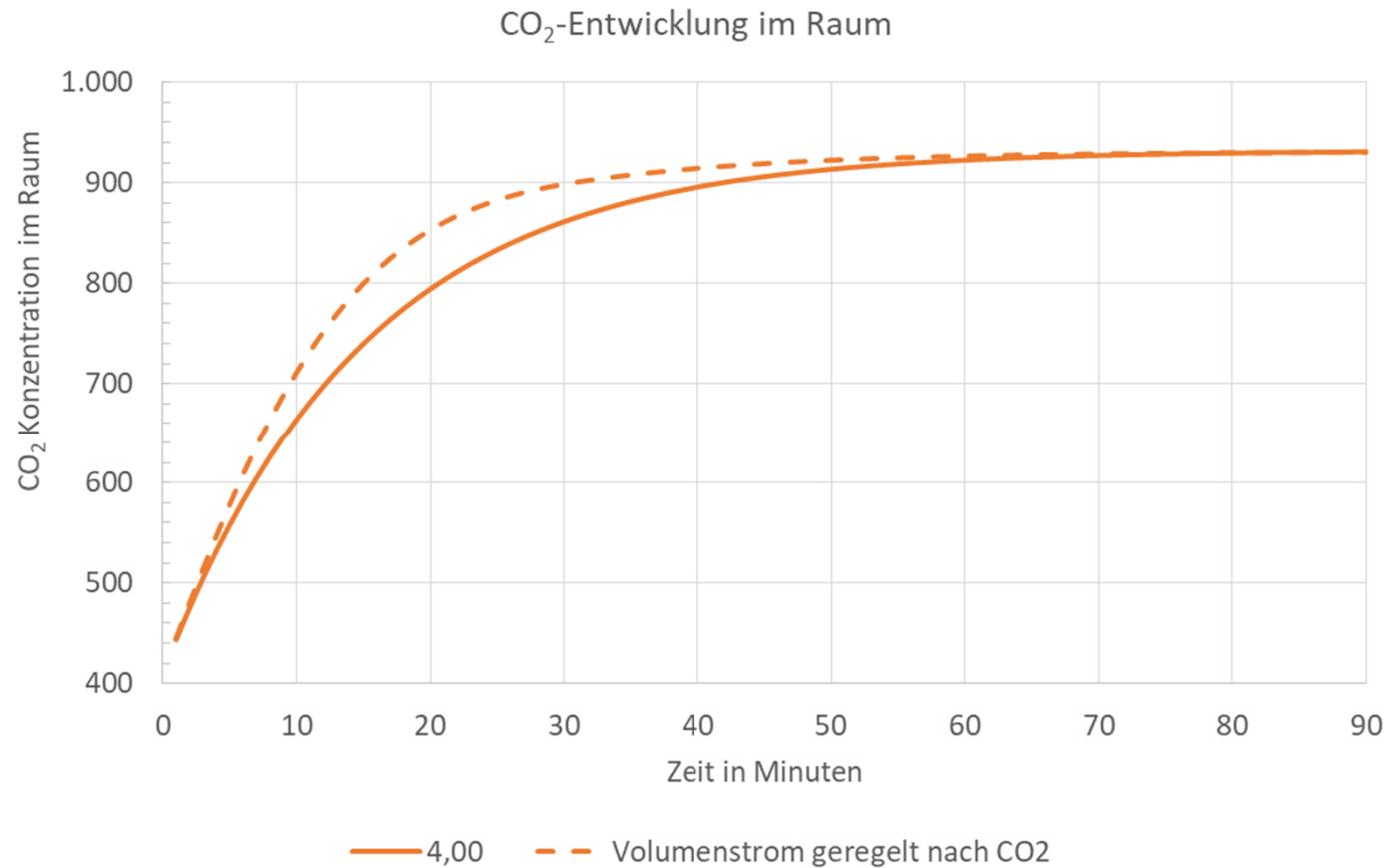
Regler Kennlinie CO₂ zum Volumenstrom

CO₂-Regelung der Anlage



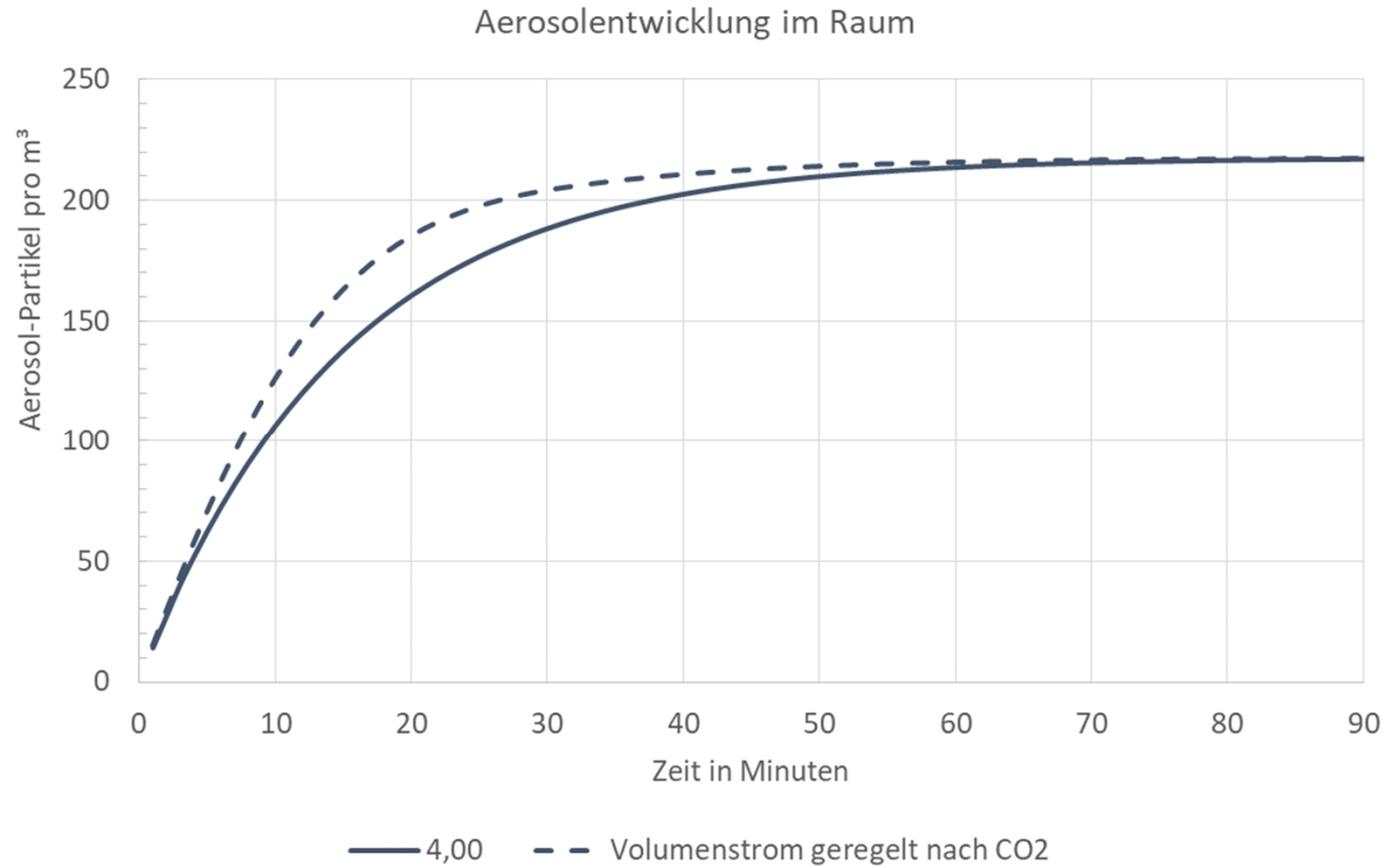
Volumenstrom Kennlinie bei **24 Personen** im Raum (18 l/h CO₂-Produktion pro Person)

CO₂-Entwicklung im Raum



24 Personen mit 18 l/h CO₂-Produktion (Raumvolumen 200 m³) mit RLT-Anlage mit LW = 4 h⁻¹

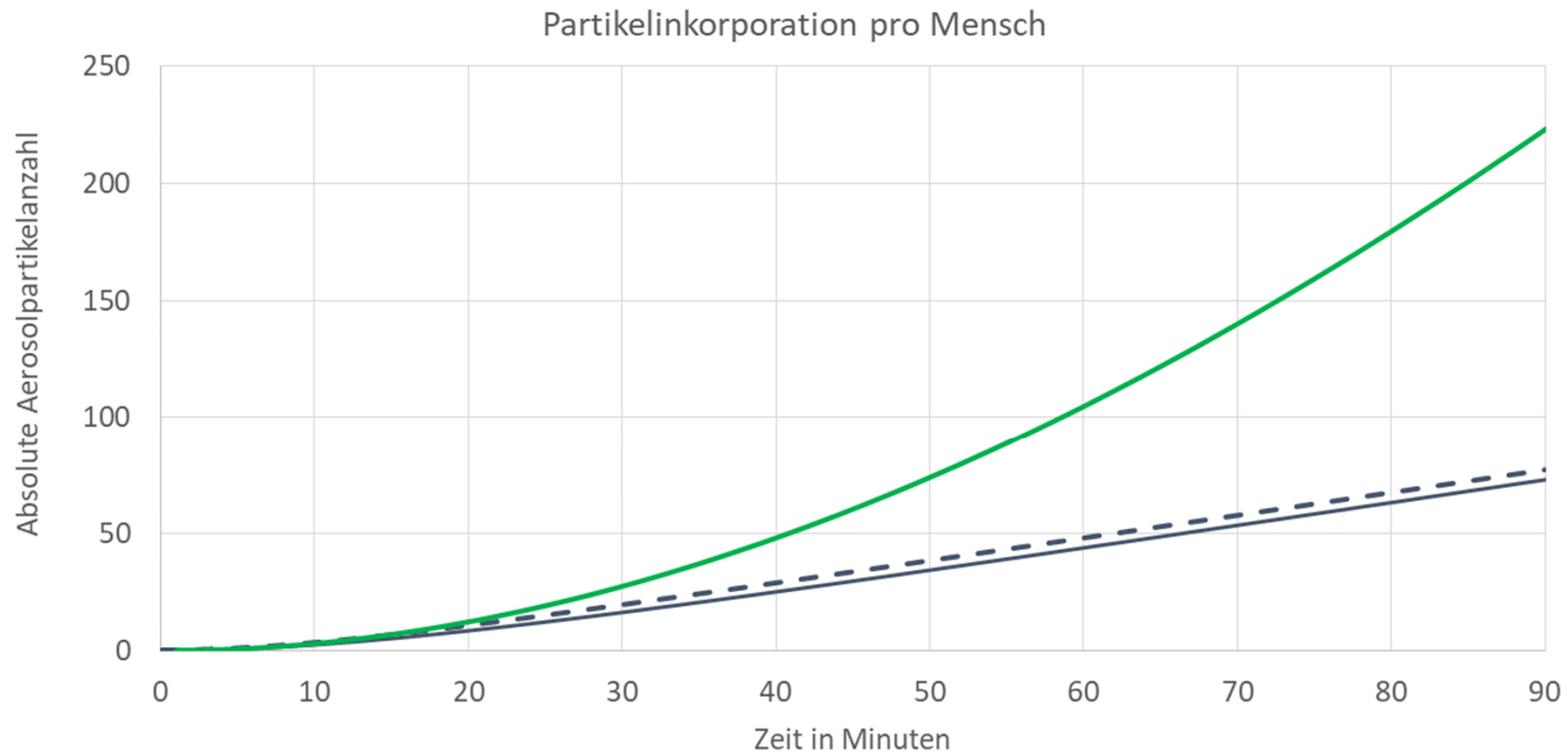
Partikelentwicklung mit einer infizierten Person



Partikelanzahl an Aerosolen **RLT-Anlage mit $LW = 4 \text{ h}^{-1}$** / Rahmenbedingungen wie zuvor

1 Person spricht mit 100 Aerosolpartikeln pro Sekunde (Emission) / Maskenreduktion 0,5 (Infizierter und Zuhörer)

Partikelinkorporation



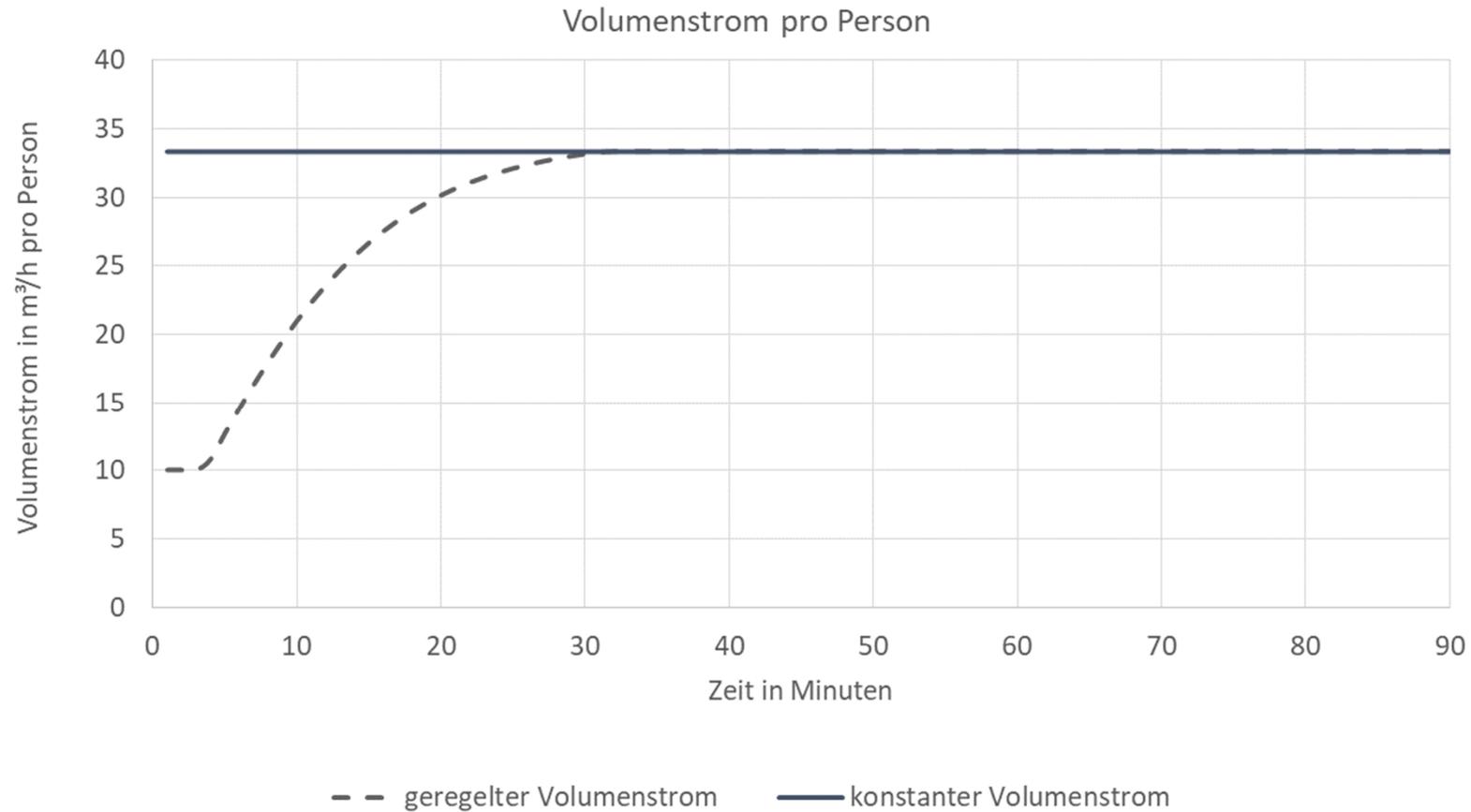
--- Partikelinkorporation pro Mensch LW geregelt — Partikelinkorporation pro Mensch LW konstant

— Partikelinkorporation pro Mensch netto ohne LW

Konzentration an Aerosolen **RLT-Anlage mit $LW = 4 \text{ h}^{-1}$**

Rahmenbedingungen wie zuvor

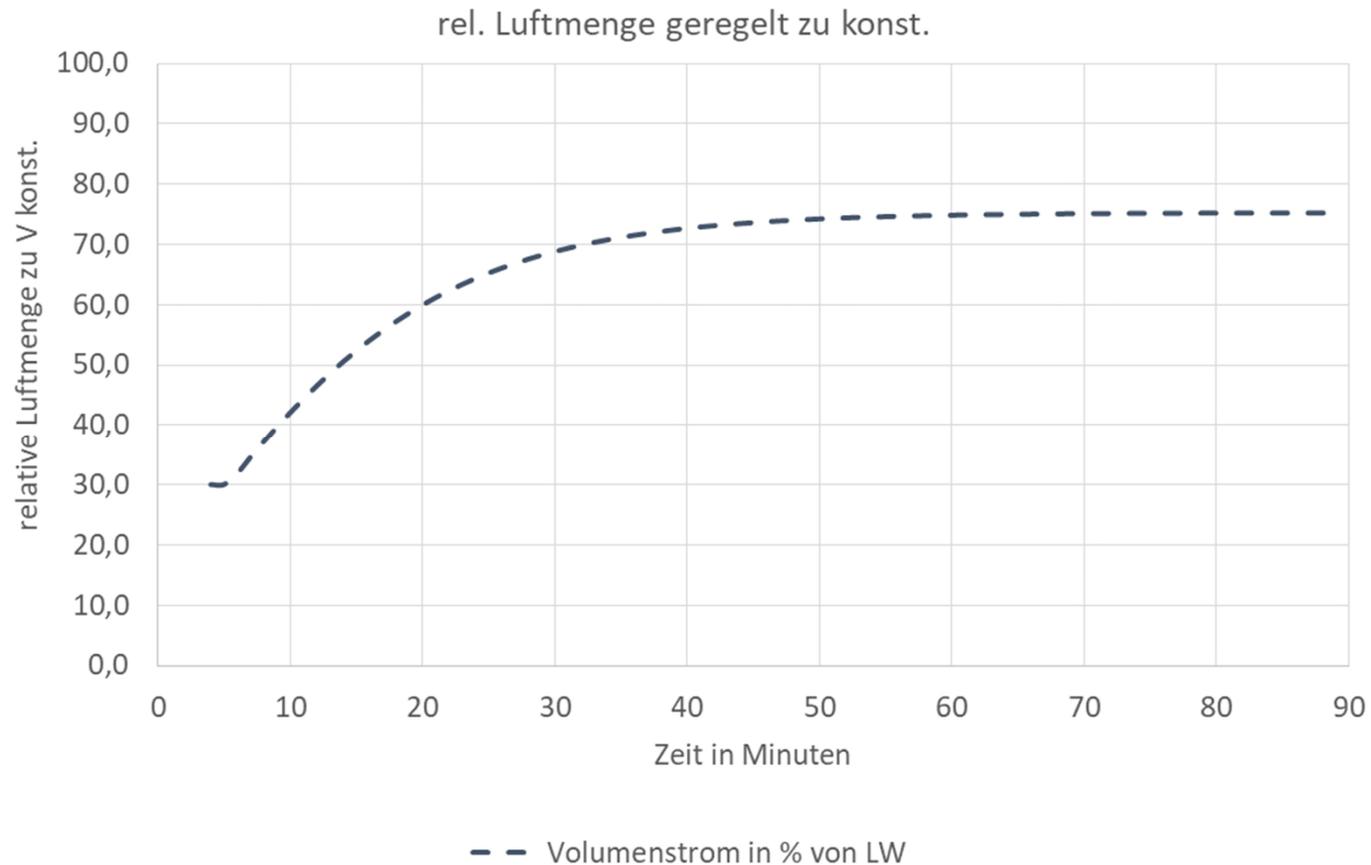
Virenfreie Luftmenge pro Person



Frischluft rate pro Person **RLT-Anlage mit $LW = 4 \text{ h}^{-1}$**

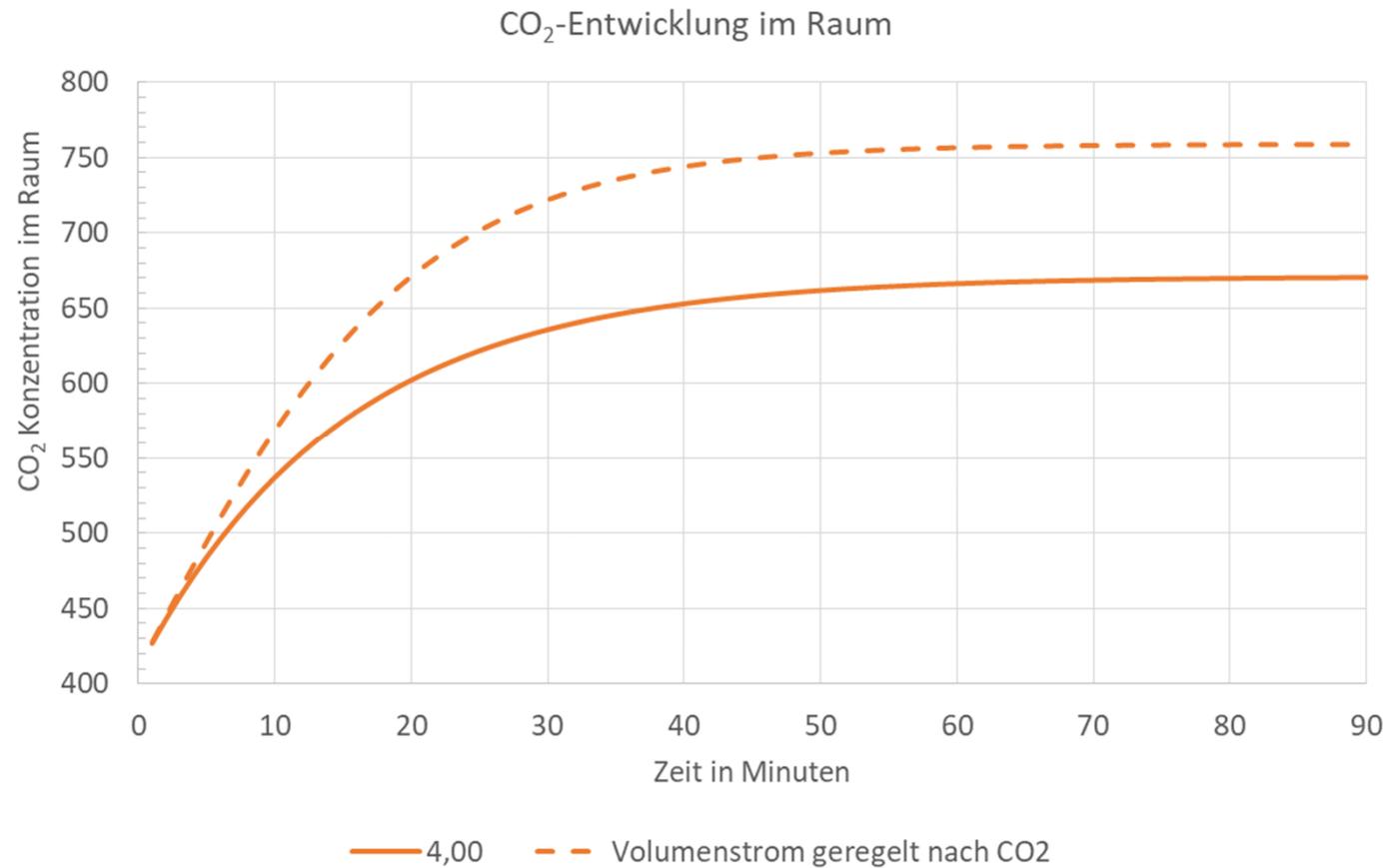
Rahmenbedingungen wie zuvor

CO₂-Regelung der Anlage (halbe Belegung)



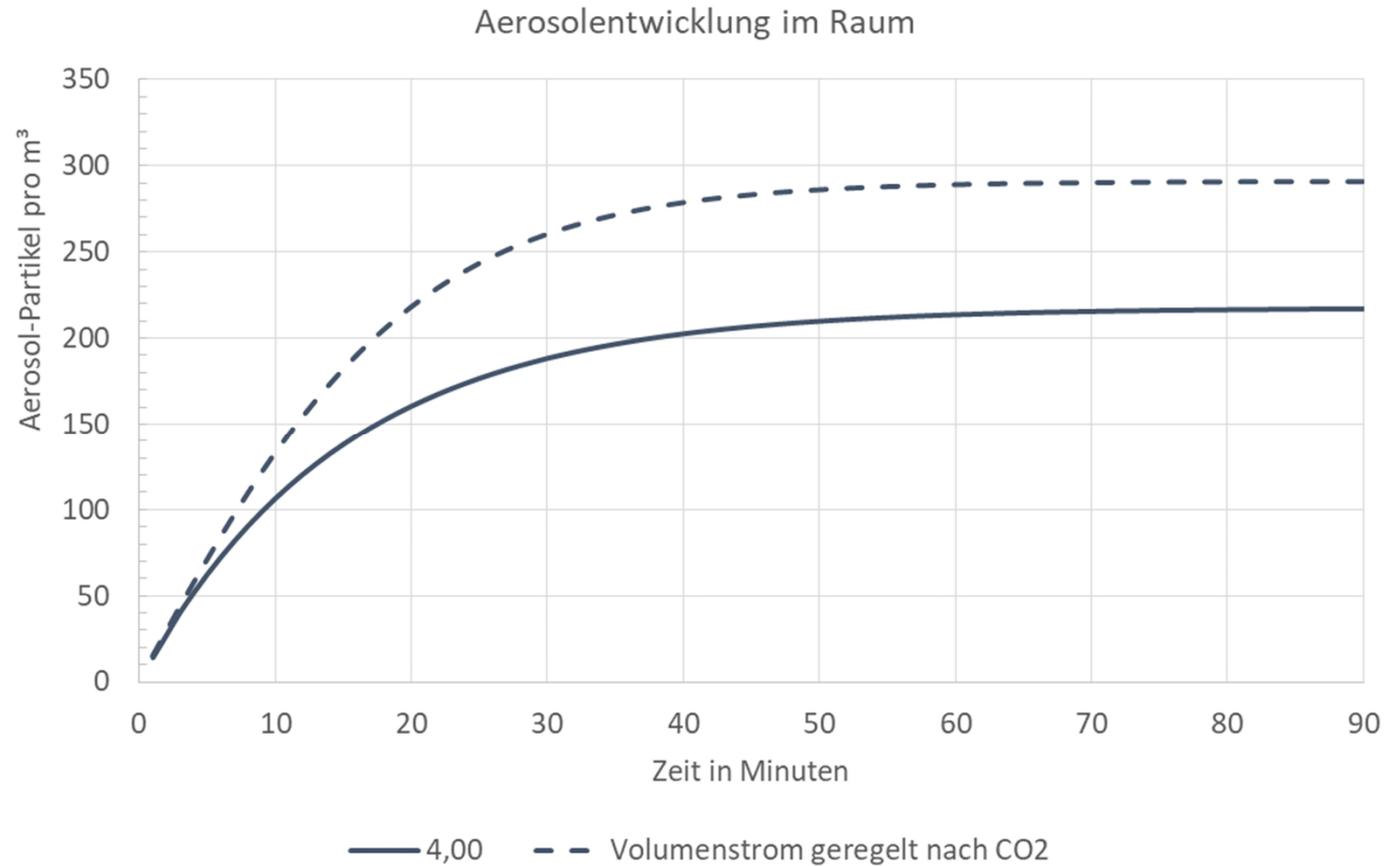
Volumenstrom Kennlinie bei **12 Personen** im Raum (18 l/h CO₂-Produktion pro Person)

CO₂-Entwicklung im Raum (halbe Belegung)



12 Personen mit 18 l/h CO₂-Produktion (Raumvolumen 200 m³) mit RLT-Anlage mit LW = 4 h⁻¹

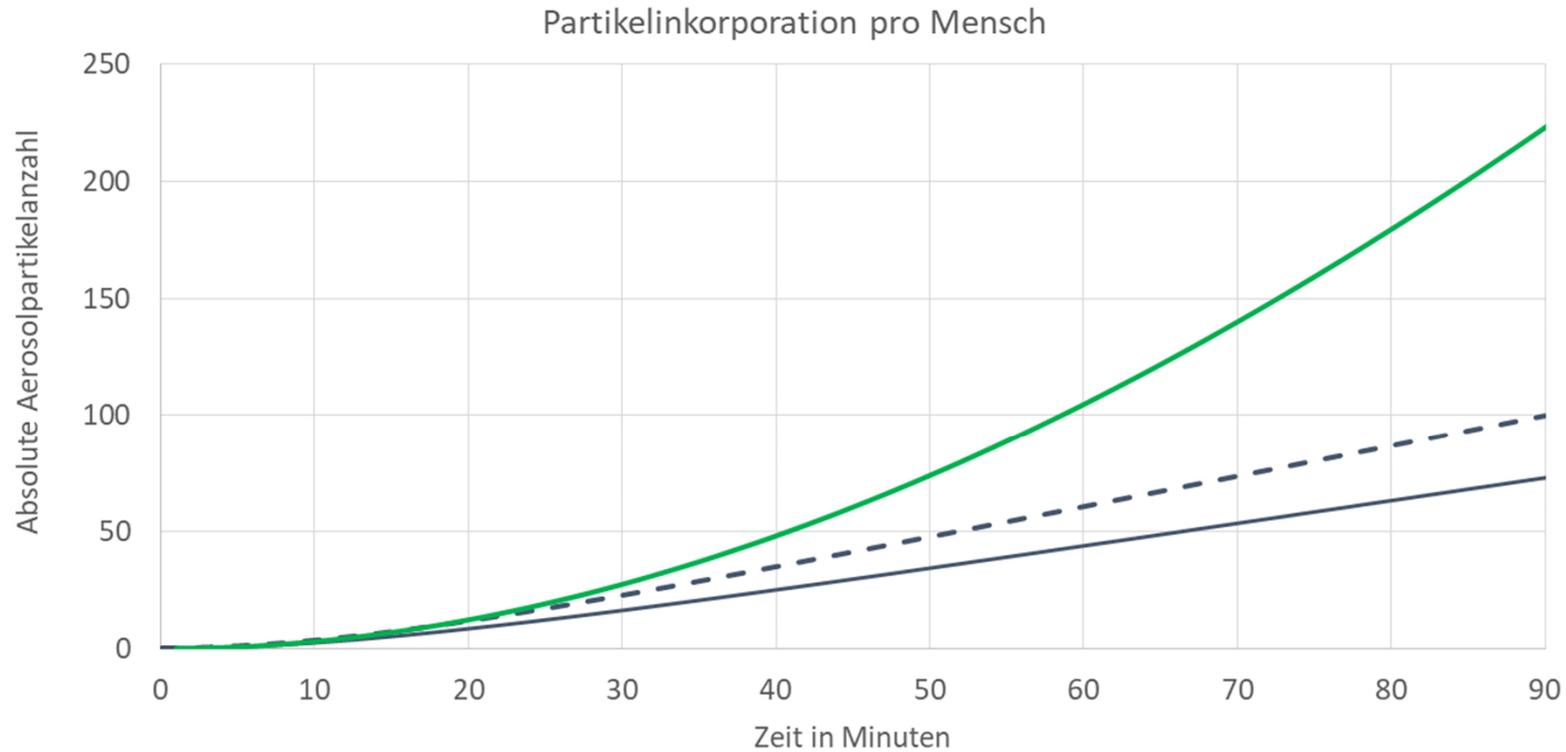
Partikelentwicklung (halbe Belegung)



Partikelanzahl an Aerosolen **RLT-Anlage mit $LW = 4 \text{ h}^{-1}$**

Rahmenbedingungen wie zuvor

Partikelinkorporation (halbe Belegung)



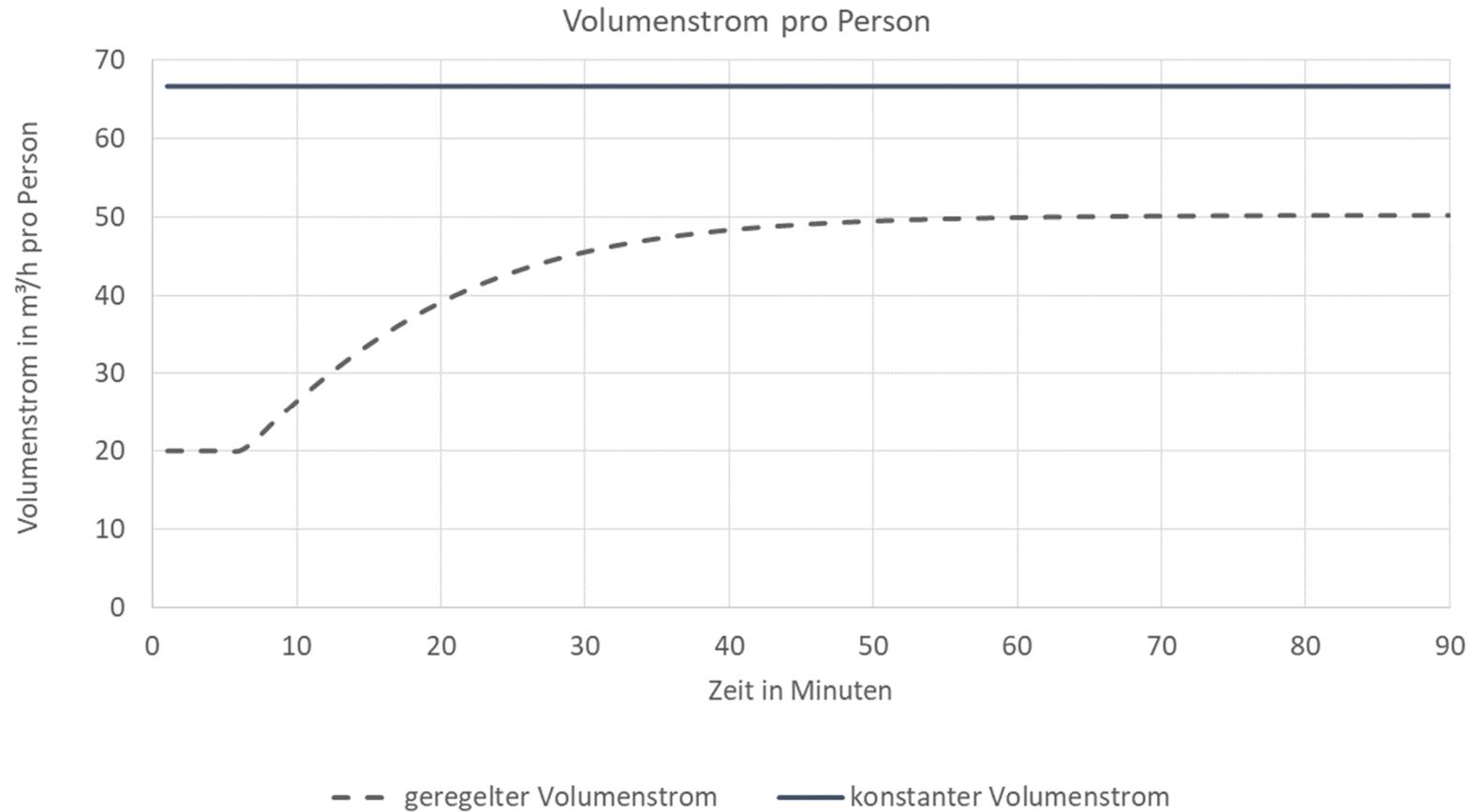
--- Partikelinkorporation pro Mensch LW geregelt — Partikelinkorporation pro Mensch LW konstant

— Partikelinkorporation pro Mensch netto ohne LW

Partikelanzahl an Aerosolen **RLT-Anlage mit $LW = 4 \text{ h}^{-1}$**

Rahmenbedingungen wie zuvor

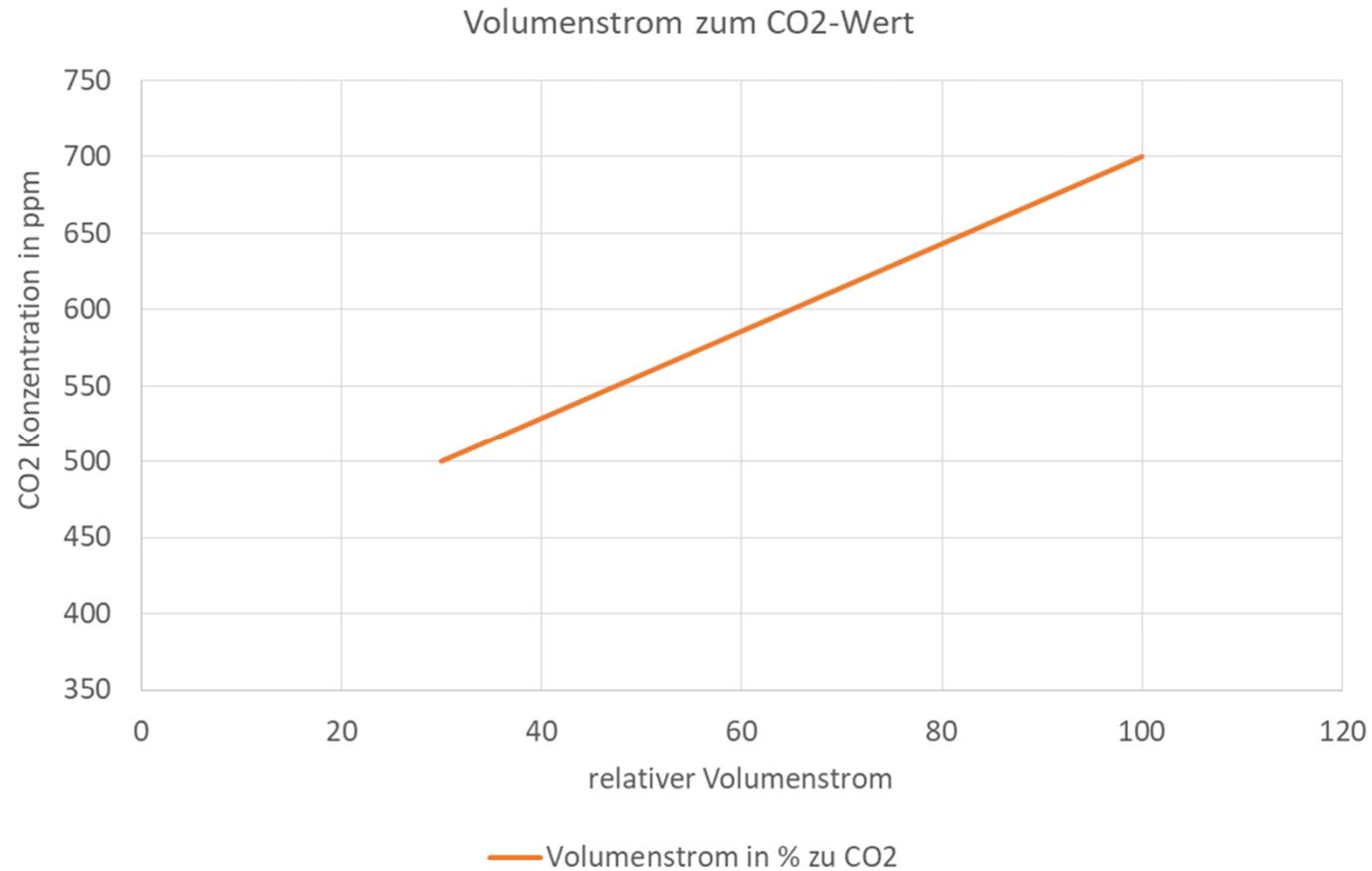
Virenfreie Luftmenge pro Person (halbe Belegung)



Frischluft rate pro Person **RLT-Anlage mit $\text{LW} = 4 \text{ h}^{-1}$**

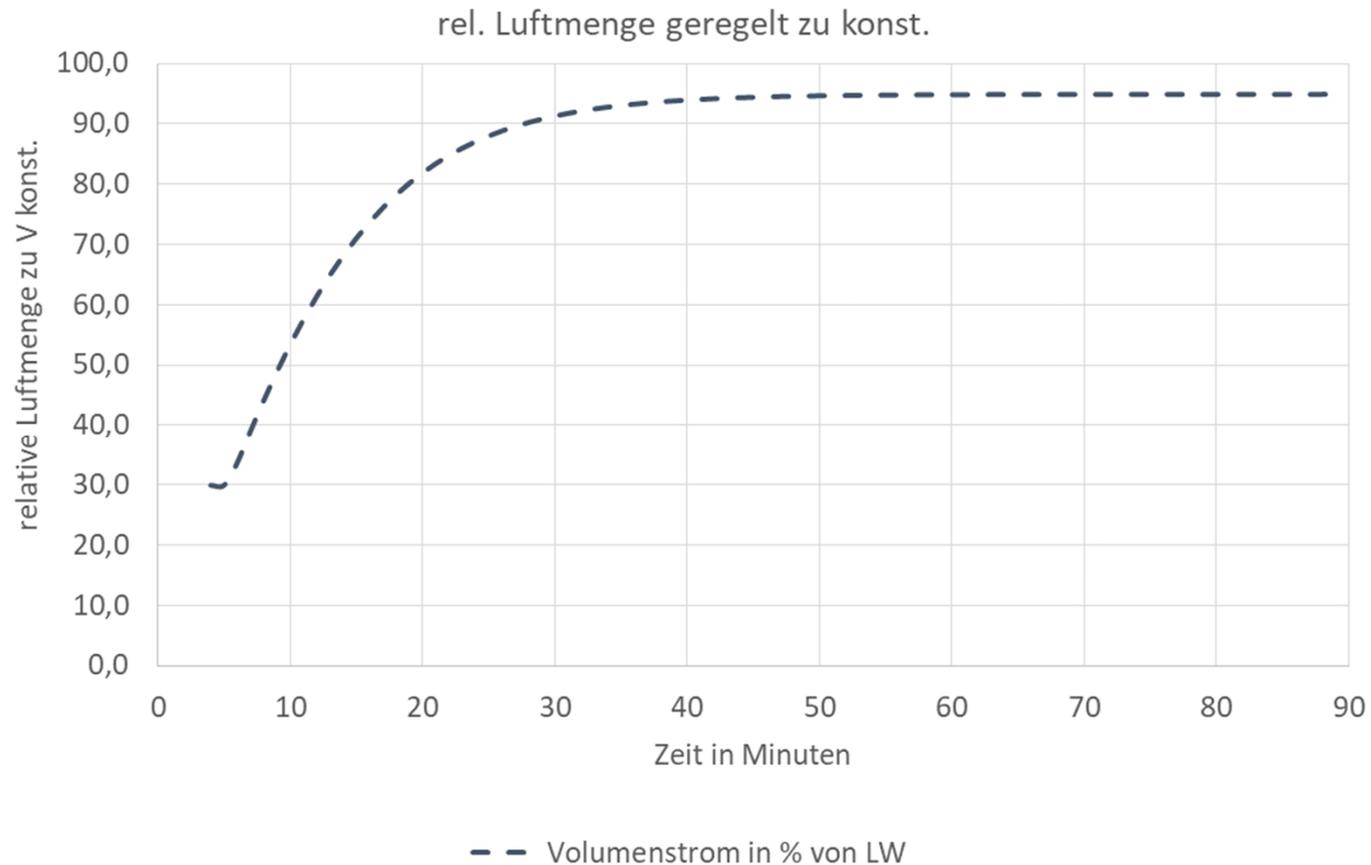
Rahmenbedingungen wie zuvor - Kennlinie max. 900 ppm CO_2

CO₂-Regelung der Anlage (Anpassung halbe Belegung)



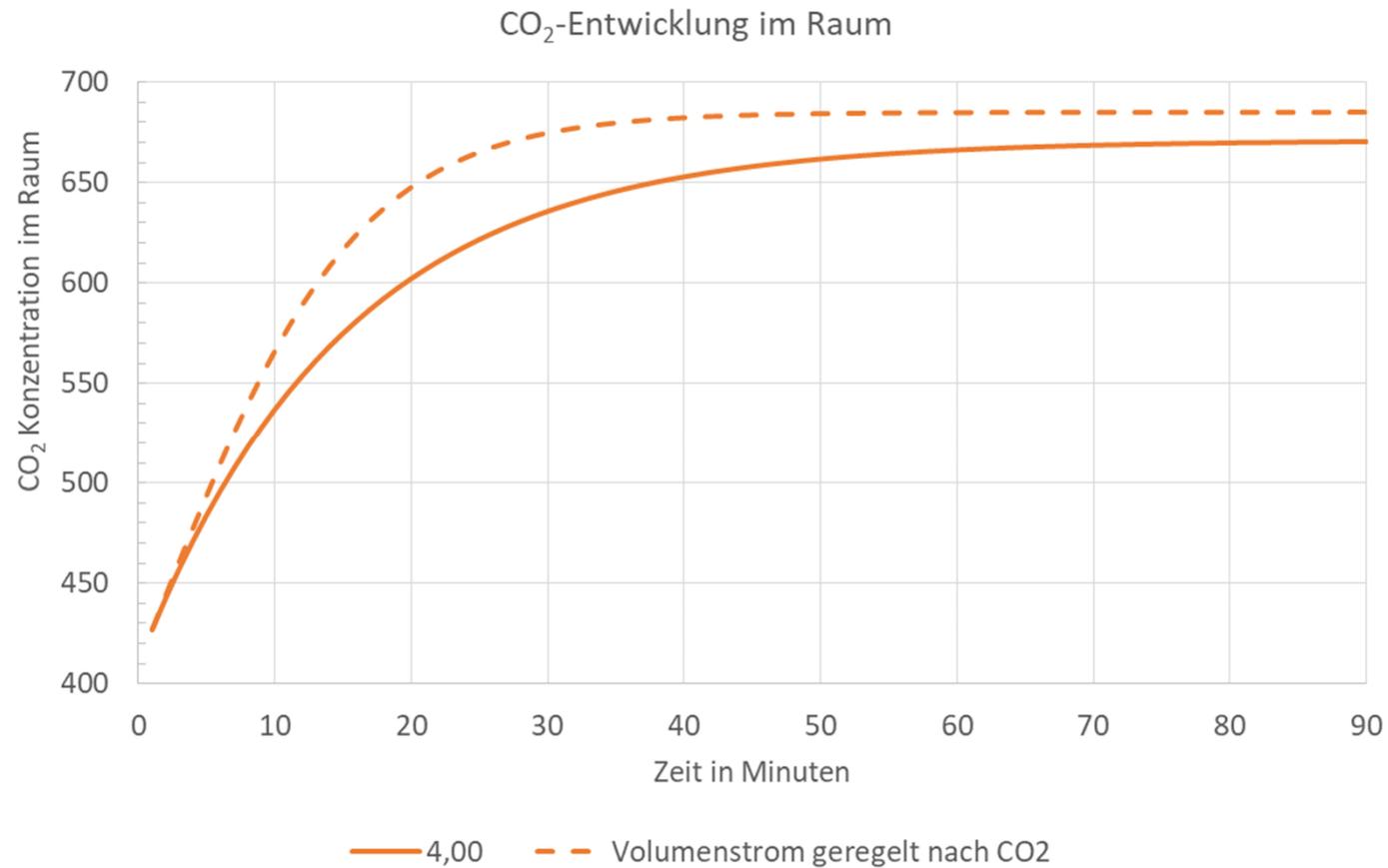
Regler Kennlinie CO₂ zum Volumenstrom

CO₂-Regelung der Anlage (halbe Belegung)



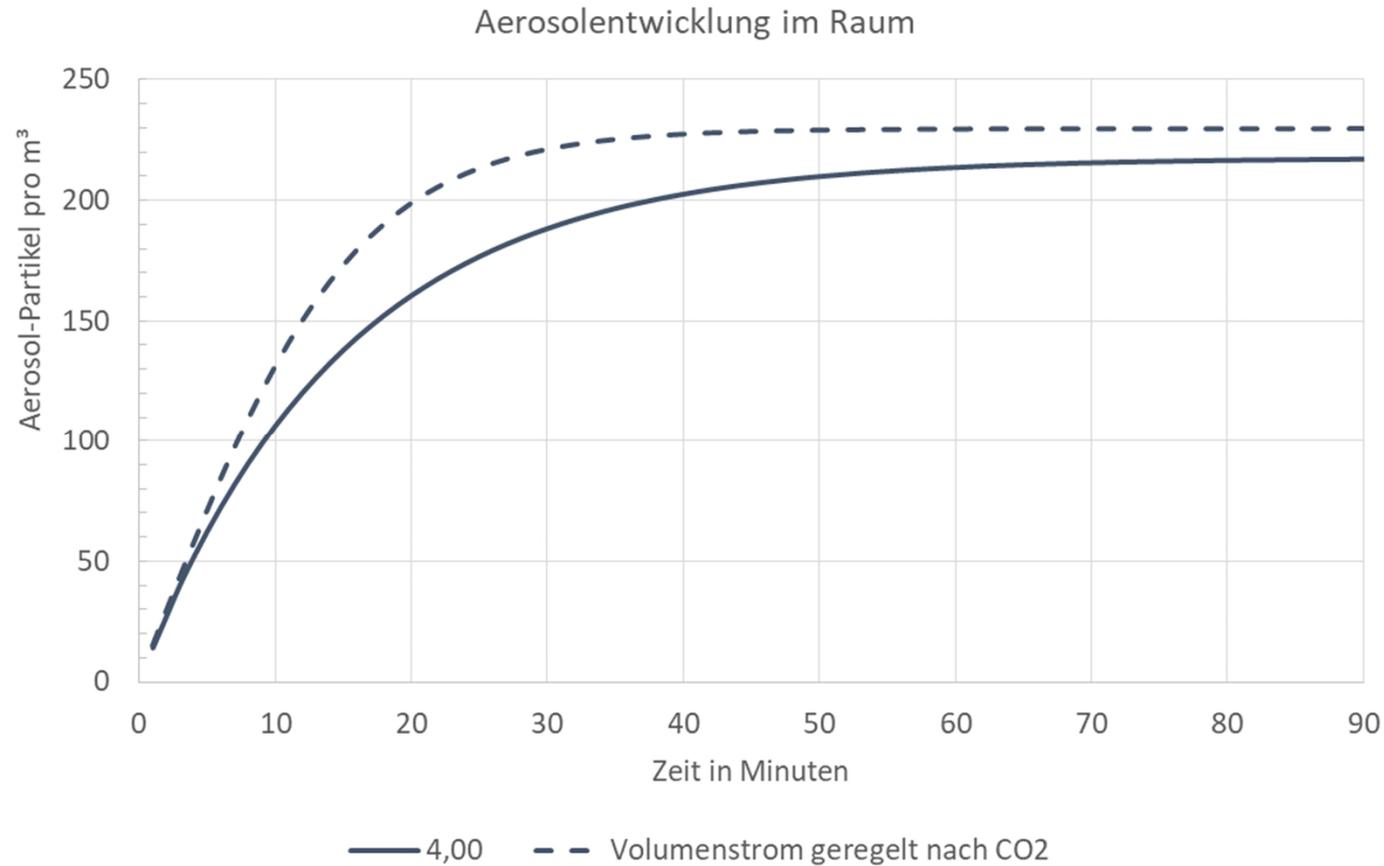
Volumenstrom Kennlinie

CO₂-Entwicklung im Raum (halbe Belegung)



12 Personen mit 18 l/h CO₂-Produktion (Raumvolumen 200 m³) mit RLT-Anlage mit LW = 4 h⁻¹

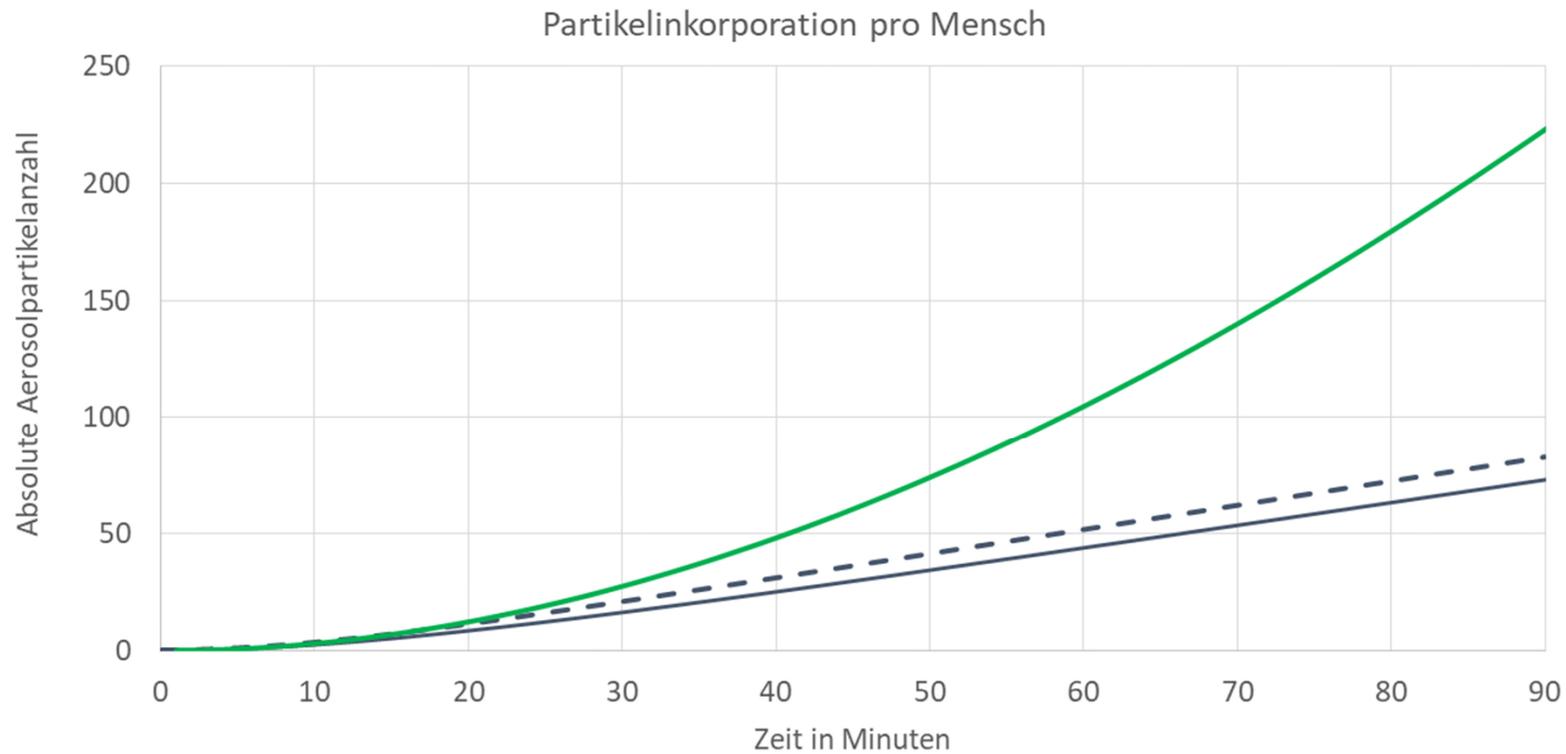
Partikelentwicklung (halbe Belegung)



Partikelanzahl an Aerosolen **RLT-Anlage mit $LW = 4 \text{ h}^{-1}$**

Rahmenbedingungen wie zuvor

Partikelinkorporation (halbe Belegung)



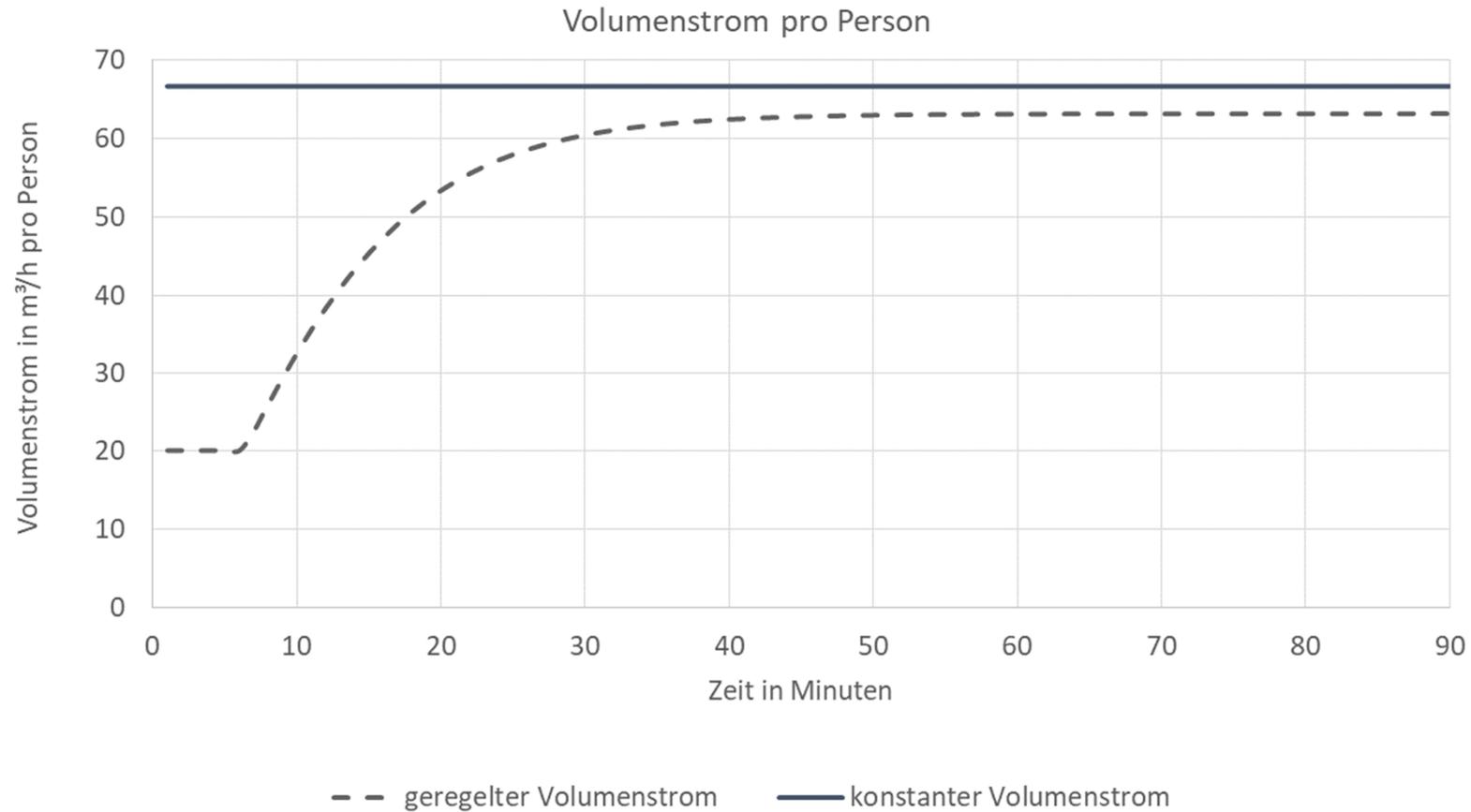
--- Partikelinkorporation pro Mensch LW geregelt — Partikelinkorporation pro Mensch LW konstant

— Partikelinkorporation pro Mensch netto ohne LW

Partikelanzahl an Aerosolen **RLT-Anlage mit $LW = 4 \text{ h}^{-1}$**

Rahmenbedingungen wie zuvor

Frischluft pro Person (halbe Belegung)



Frischluft rate pro Person **RLT-Anlage mit $LW = 4 \text{ h}^{-1}$**

Rahmenbedingungen wie zuvor - geänderte Kennlinie max. 700 ppm CO_2

CO₂-Regelung vs. Aerosolpartikelbelastung

Die CO₂-Konzentration korreliert nicht zwangsläufig mit der Aerosolbelastung, da die **Anzahl der CO₂-produzierenden Personen nicht proportional zur Anzahl der Infizierten** ist.

Vorteil der Regelung

Energieeffizienz

Nachteil

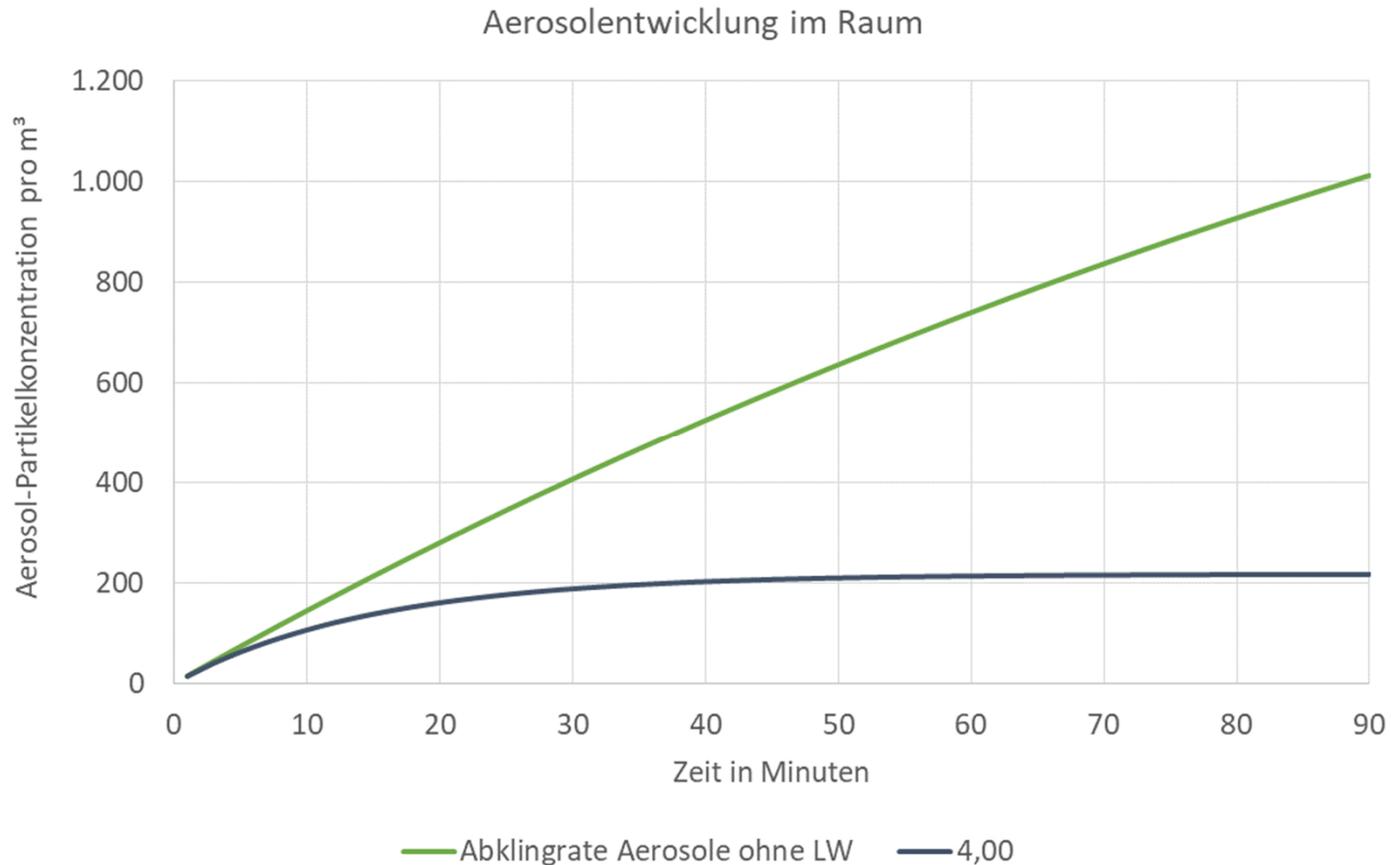
Die CO₂-Regelung kann das Infektionsrisiko prinzipiell erhöhen.

Vorschlag

Bei bekannten Belegungsänderungen (z. B. Wechselunterricht) **adaptive Sollwertverschiebung der CO₂-Kennlinie** (mit deutlich geringerer Risikoerhöhung) bzw. **Senkung der CO₂-Kennlinie** in Abhängigkeit der **niedrigsten zu erwartenden Belegung**.

Alternativ: CO₂-Regelung AUS

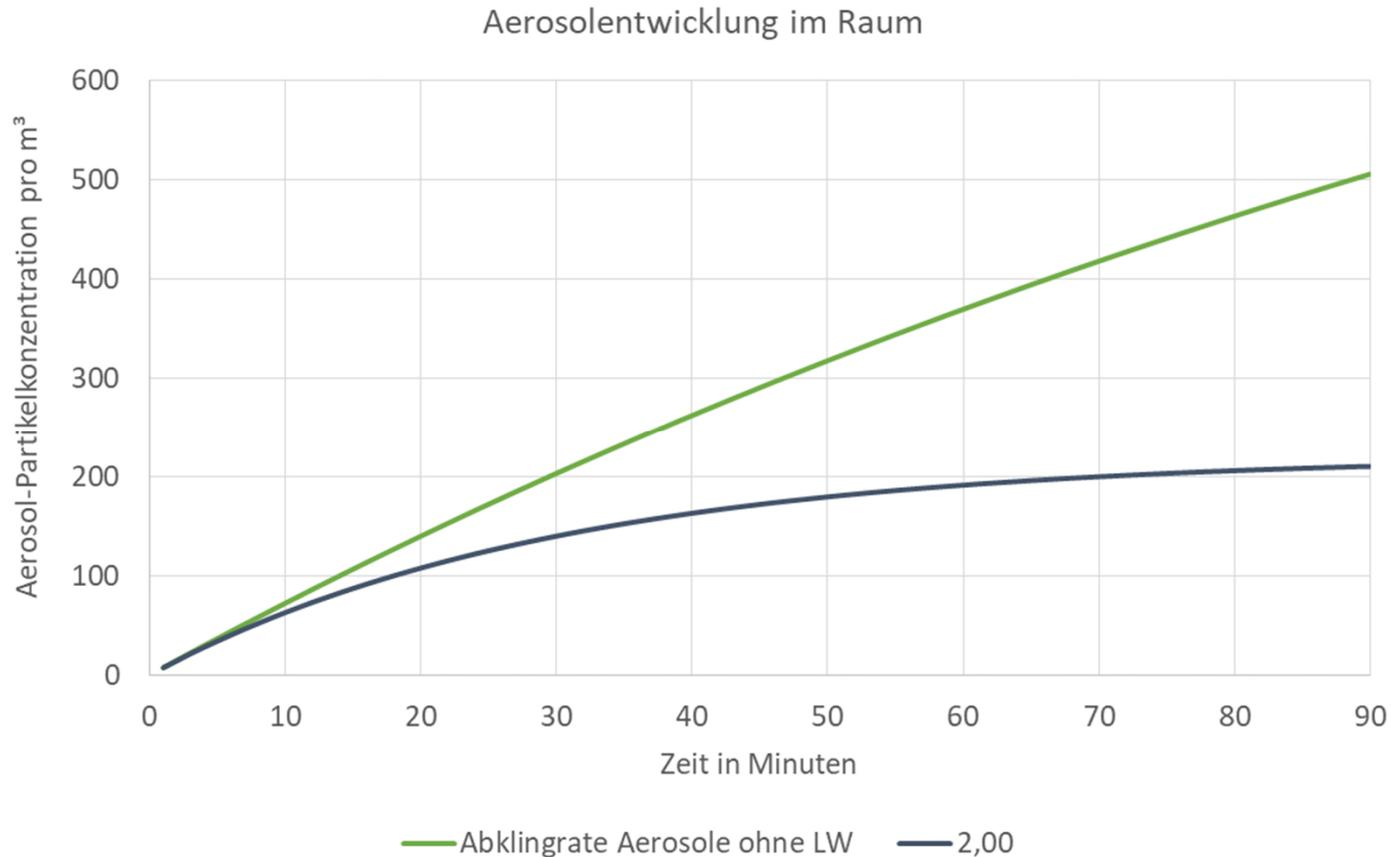
Partikelentwicklung im Raum mit 200 m³ mit LW = 4 h⁻¹



Partikelanzahl an Aerosolen **RLT-Anlage** mit **LW = 4 h⁻¹** / **Maskenreduktion 0,5 Infizierter**

1 Person spricht mit 100 Aerosolpartikeln pro Sekunde (Emission bei einem Raumvolumen von 200 m³)

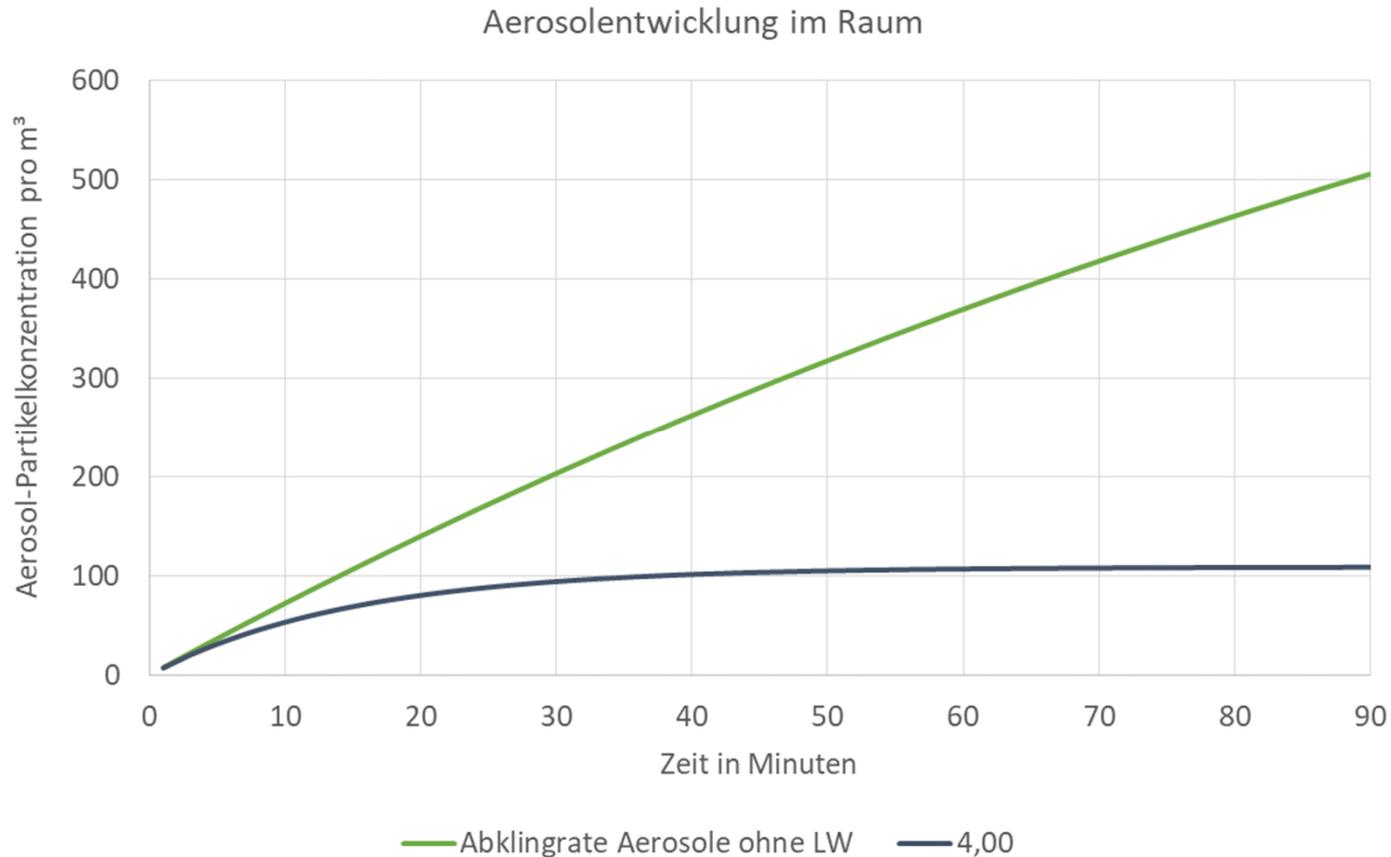
Partikelentwicklung im Raum mit 400 m³ mit LW = 2 h⁻¹



Partikelanzahl an Aerosolen **RLT-Anlage** mit **LW = 2 h⁻¹** / **Maskenreduktion 0,5 Infizierter**

1 Person spricht mit 100 Aerosolpartikeln pro Sekunde (Emission bei einem Raumvolumen von 400 m³)

Partikelentwicklung im Raum mit 400 m^3 mit $LW = 4 \text{ h}^{-1}$



Partikelanzahl an Aerosolen **RLT-Anlage** mit $LW = 4 \text{ h}^{-1}$ / **Maskenreduktion 0,5 Infizierter**

1 Person spricht mit 100 Aerosolpartikeln pro Sekunde (Emission bei einem Raumvolumen von 400 m^3)

Luftmenge pro Personenanzahl?

Die Luftmenge pro Personenanzahl ist nicht repräsentativ, da meist nur **eine Person infiziert** ist (Ausnahme sehr große Räume mit sehr vielen Personen).

Ziel

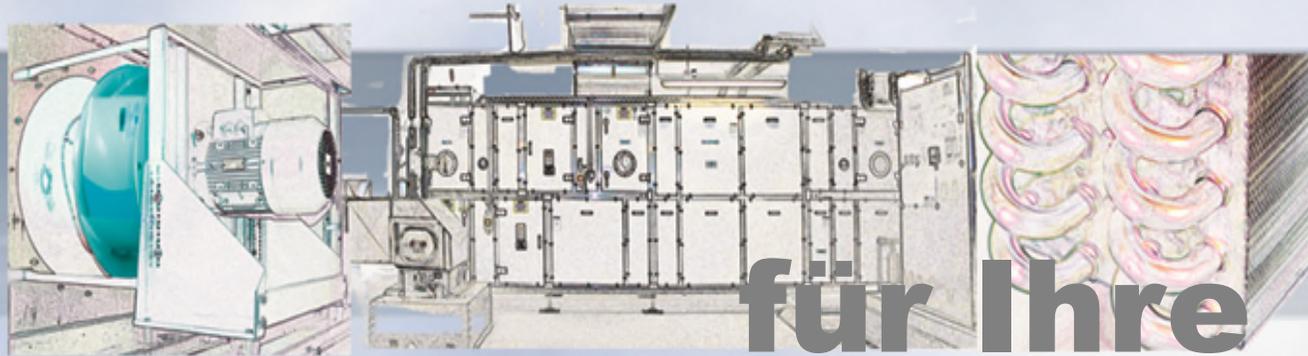
Luftmenge pro erwartete **Anzahl von Infizierten** (meist $k = 1$).

Raumbezug

Luftwechselzahl an virenfreier Luftmenge ist sinnvoll mit **Bezug zur Raumgröße**.

Beispielsweise $n = 4 \text{ h}^{-1}$ bei $R = 200 \text{ m}^3$ (Beispiel VDI EE 4300 Blatt 14)

Herzlichen Dank



Aufmerksamkeit

Bessere Raumluftqualität durch Raumluftechnik?

Wie im Vergleich Raumluftechnische Anlagen die
Aerosole und sonstige Schadstoffe in Räumen
verringern.

Prof. Dr.-Ing. Dr. Christoph Kaup
c.kaup@umwelt-campus.de



Umwelt-Campus
Birkenfeld

H O C H
S C H U L E
T R I E R