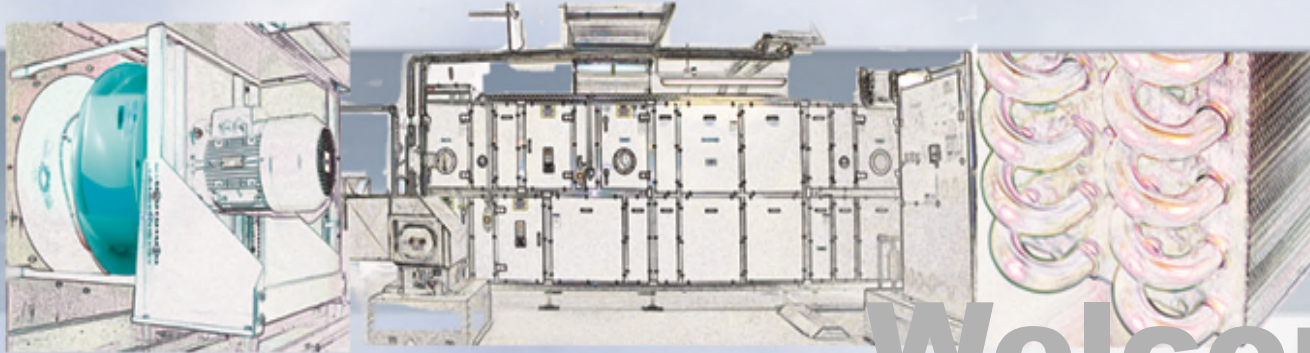


# Willkommen



# 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 **CO<sub>2</sub>-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**.

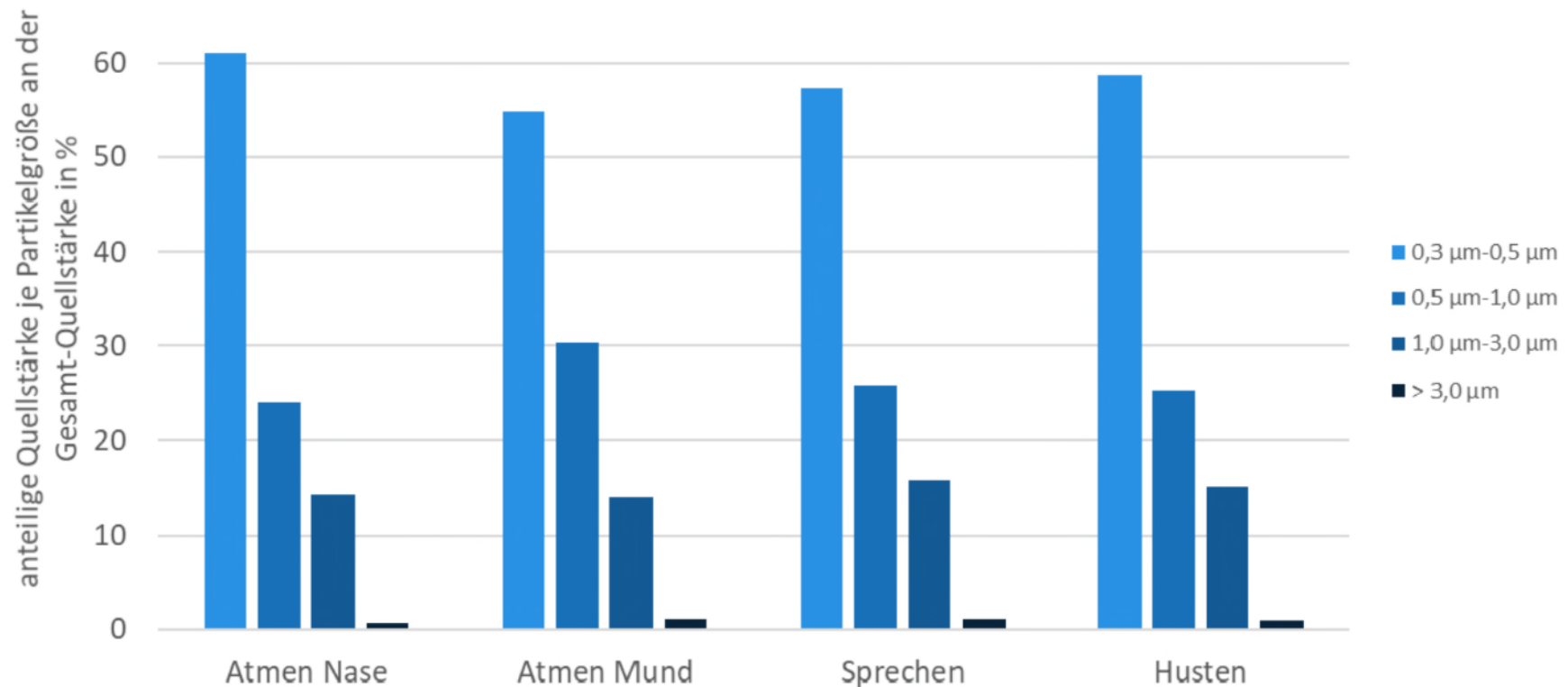
### Nachteil

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

Der **CO<sub>2</sub>-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** [m<sup>3</sup>/s]

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

$C_{h,i}$  **der Richtwert für eine Verunreinigung** [mg/m<sup>3</sup>]

$C_{h,o}$  Konzentration in der Zuluft [mg/m<sup>3</sup>]

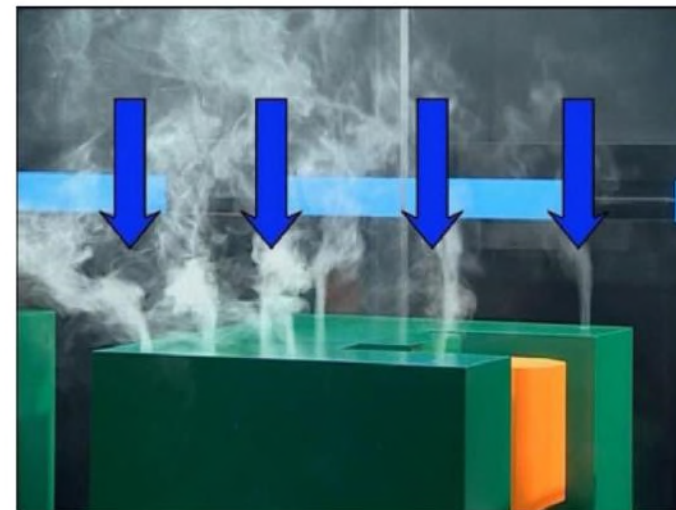
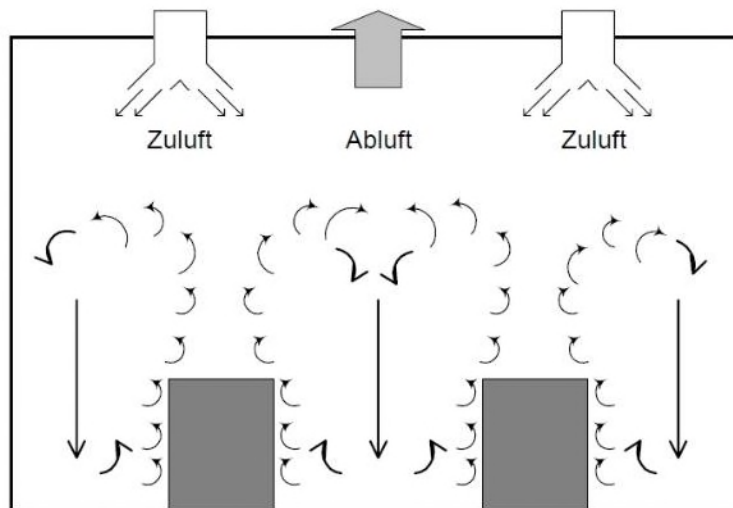
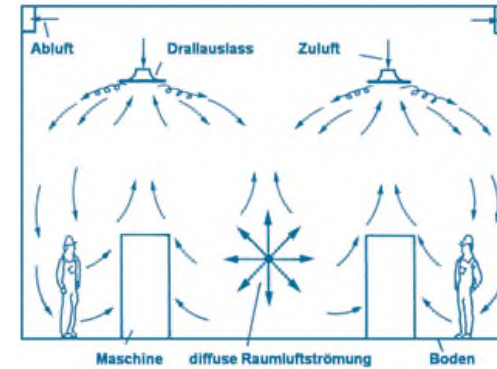
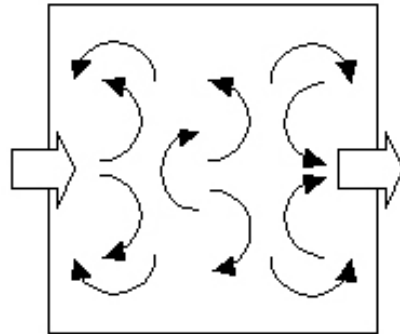
$\varepsilon_V$  **Lüftungseffektivität**

## Lüftungseffektivität

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

- $\varepsilon_V$  Lüftungseffektivität (1 = ideale **Mischlüftung**  
> 1 **Quelllüftung** und < 1 Kurzschlusslüftung)
- $c_E$  Verunreinigungskonzentration Abluft [mg/m<sup>3</sup>]
- $c_S$  Verunreinigungskonzentration Zuluft [mg/m<sup>3</sup>]
- $c_I$  Verunreinigungskonzentration Atemluft [mg/m<sup>3</sup>]

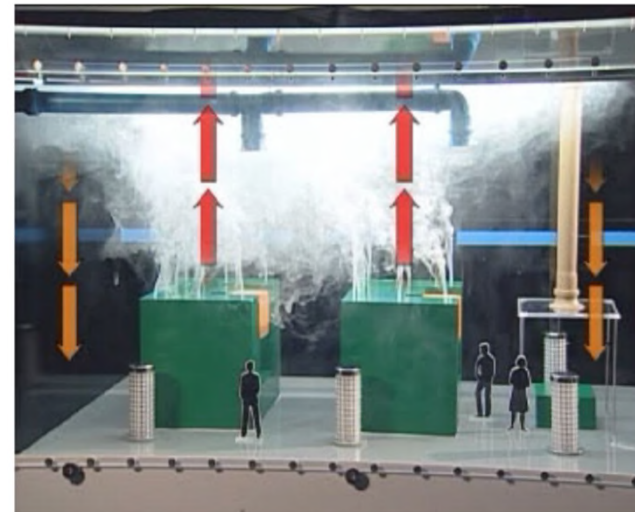
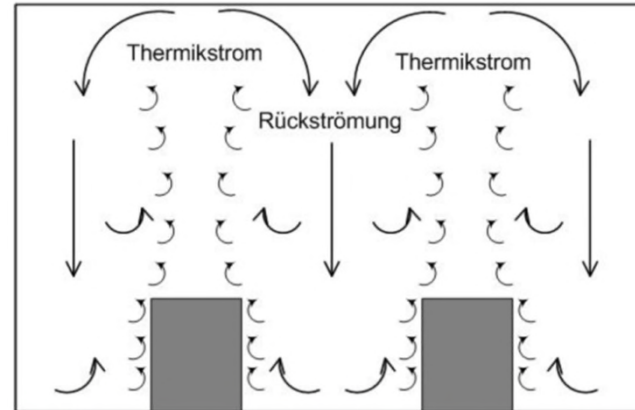
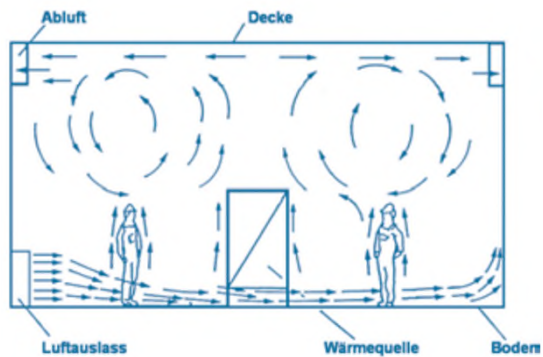
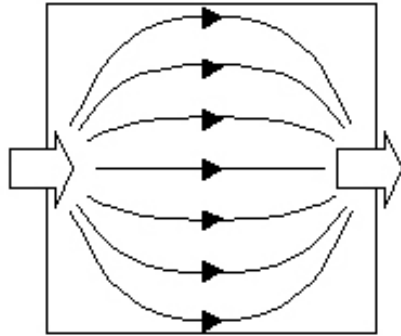
# Verdünnungslüftung



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

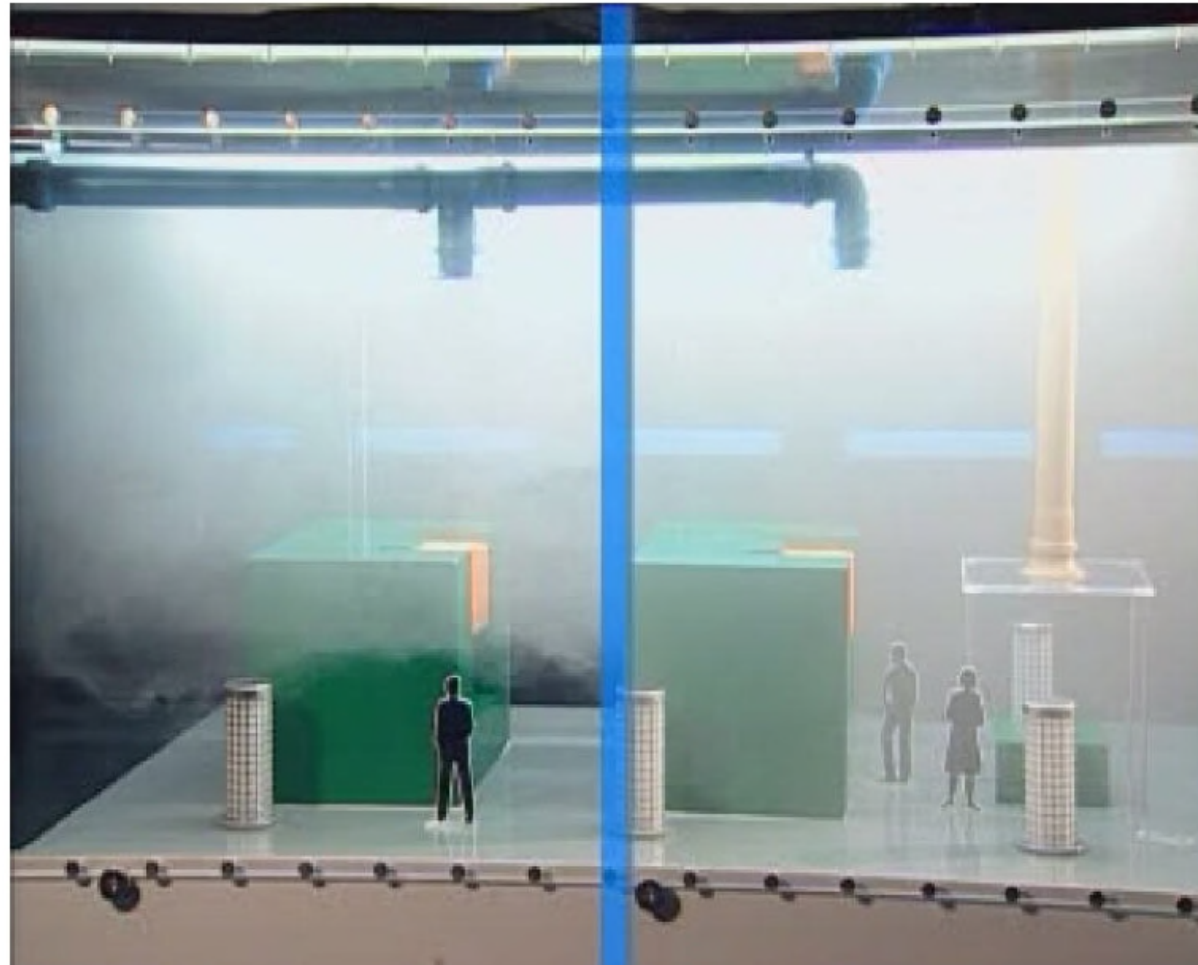


# Verdrängungslüftung



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

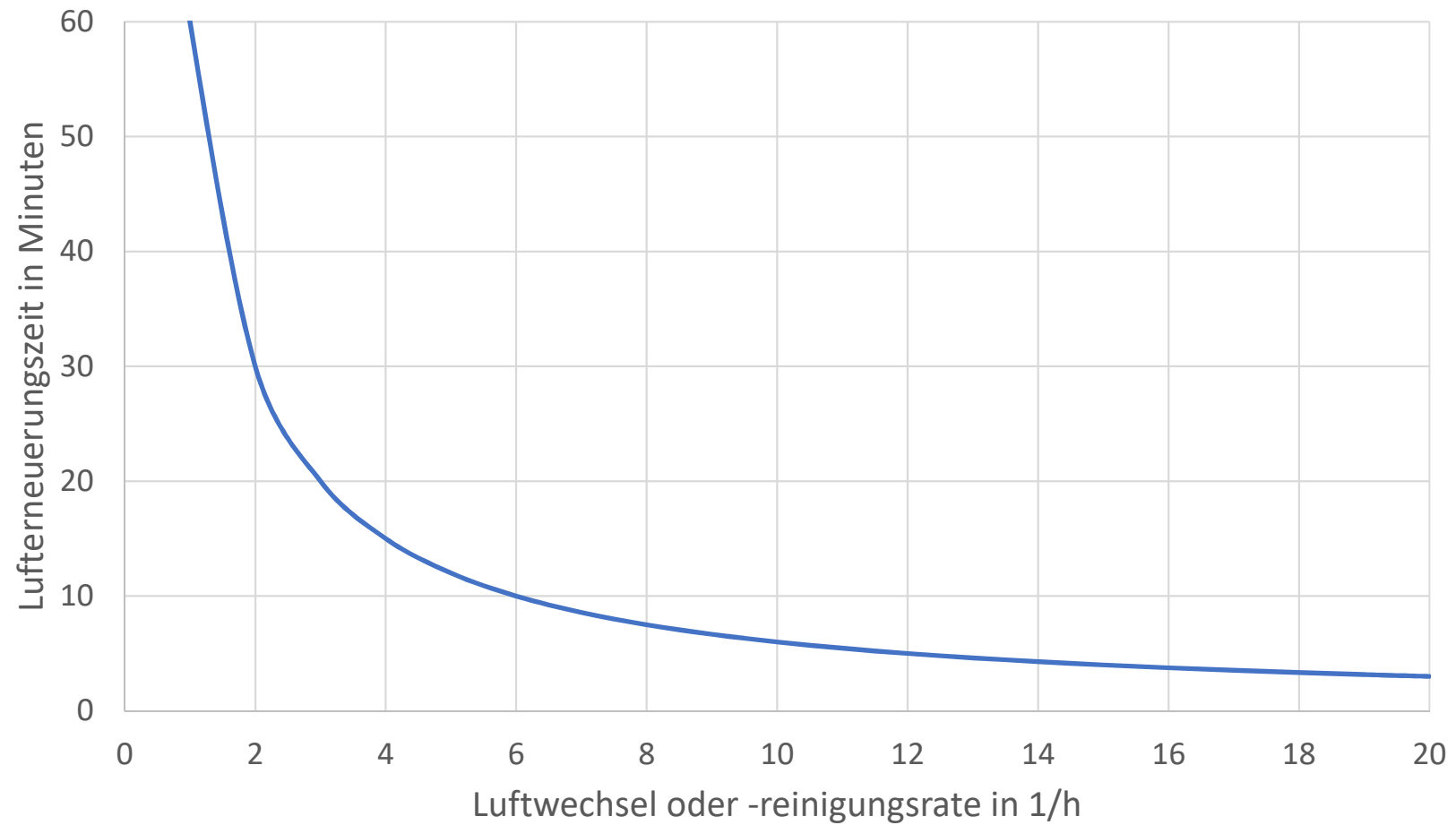
Soll alle **20 Minuten** die Raumluft erneuert werden ist eine **Luftwechselrate von 3** notwendig. Mindestens ist eine  $LW = 3$  notwendig um eine stabile Raumströmung zu erreichen.

### Empfehlung

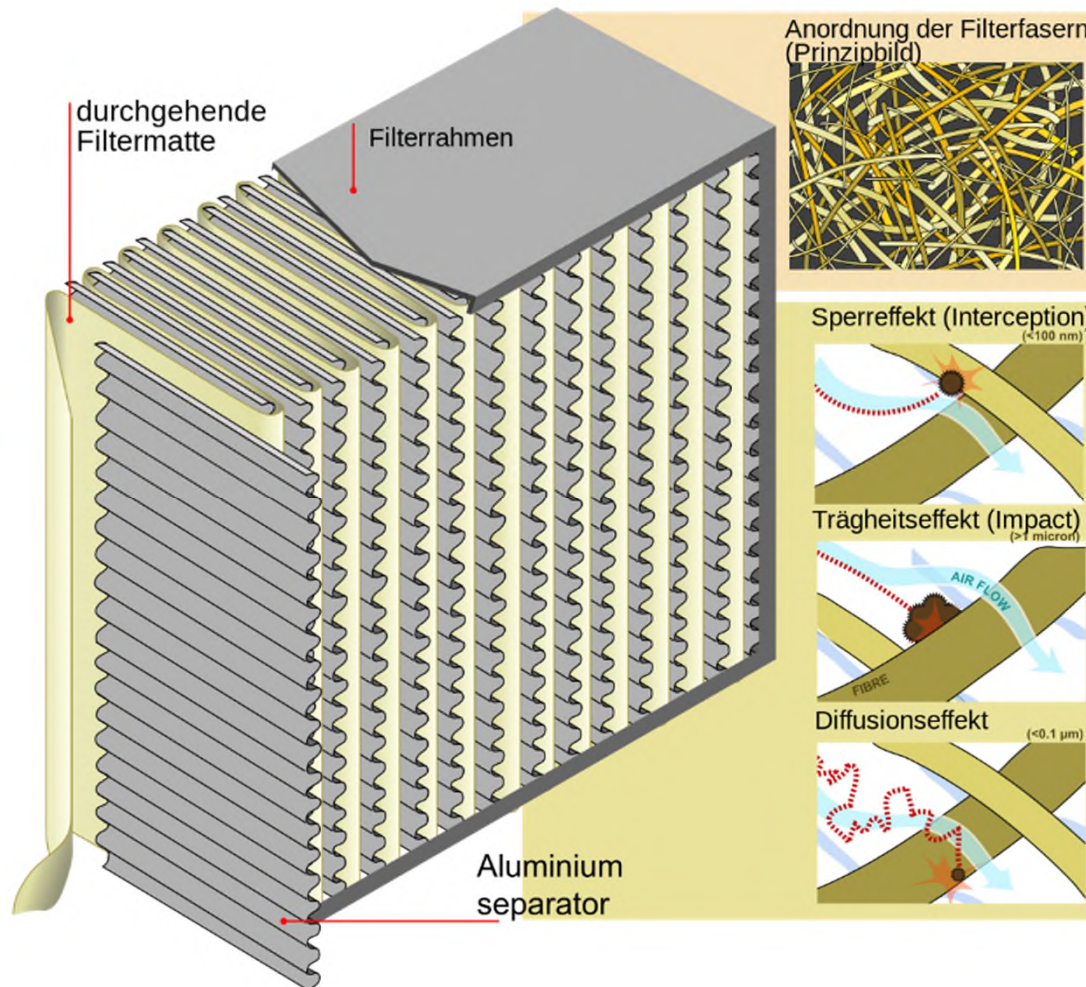
**Bis 6-fachem** Luftaustausch bestehen meist **keine Bedenken** in Bezug auf Zegerscheinungen.

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 %

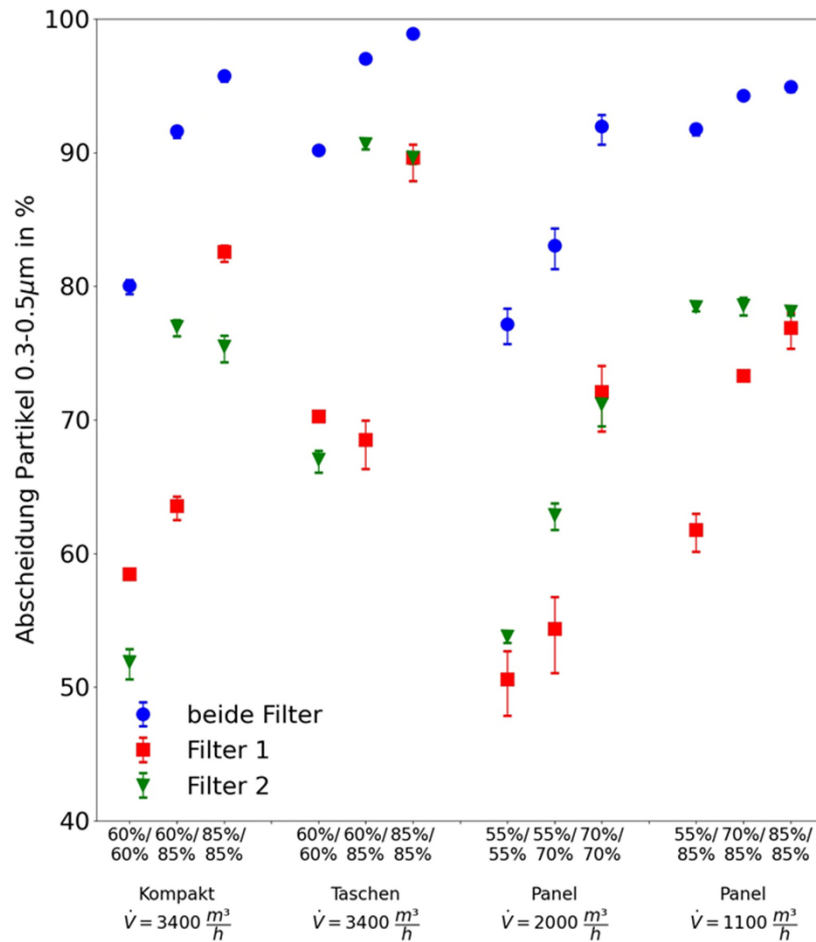
H14 99,995 %

0,1 bis 0,3  $\mu\text{m}$

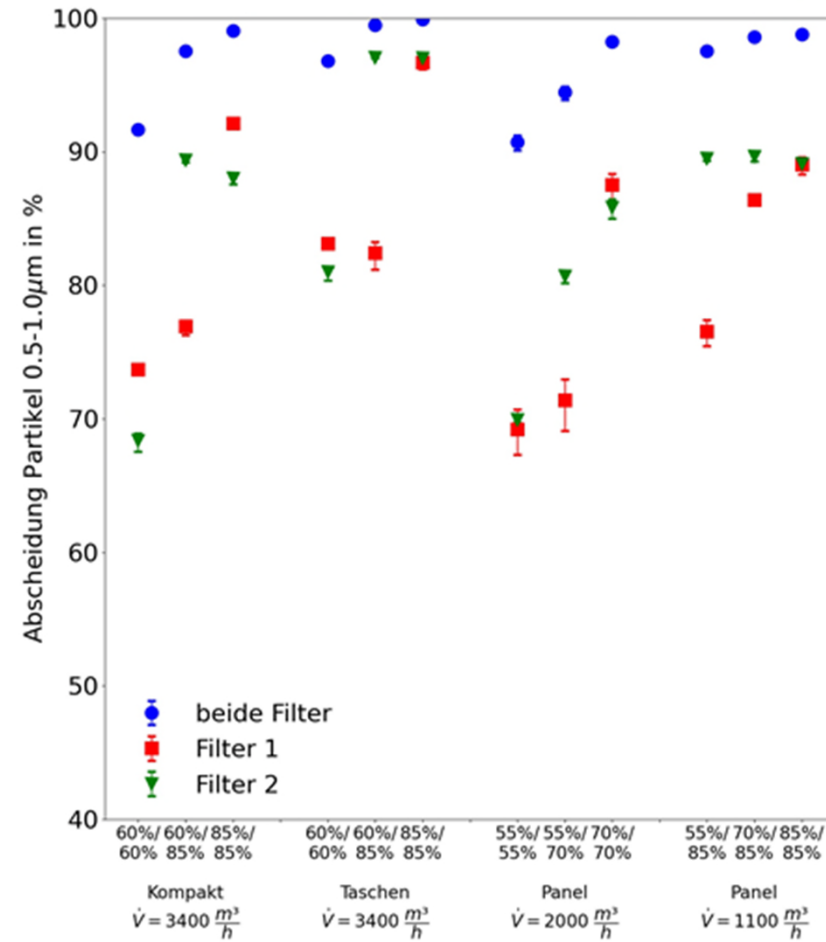
nach EN 1822

**MPPS = most penetrating particle size**

## Feinfilter-Abscheidegrade (Messungen HRI 2020)

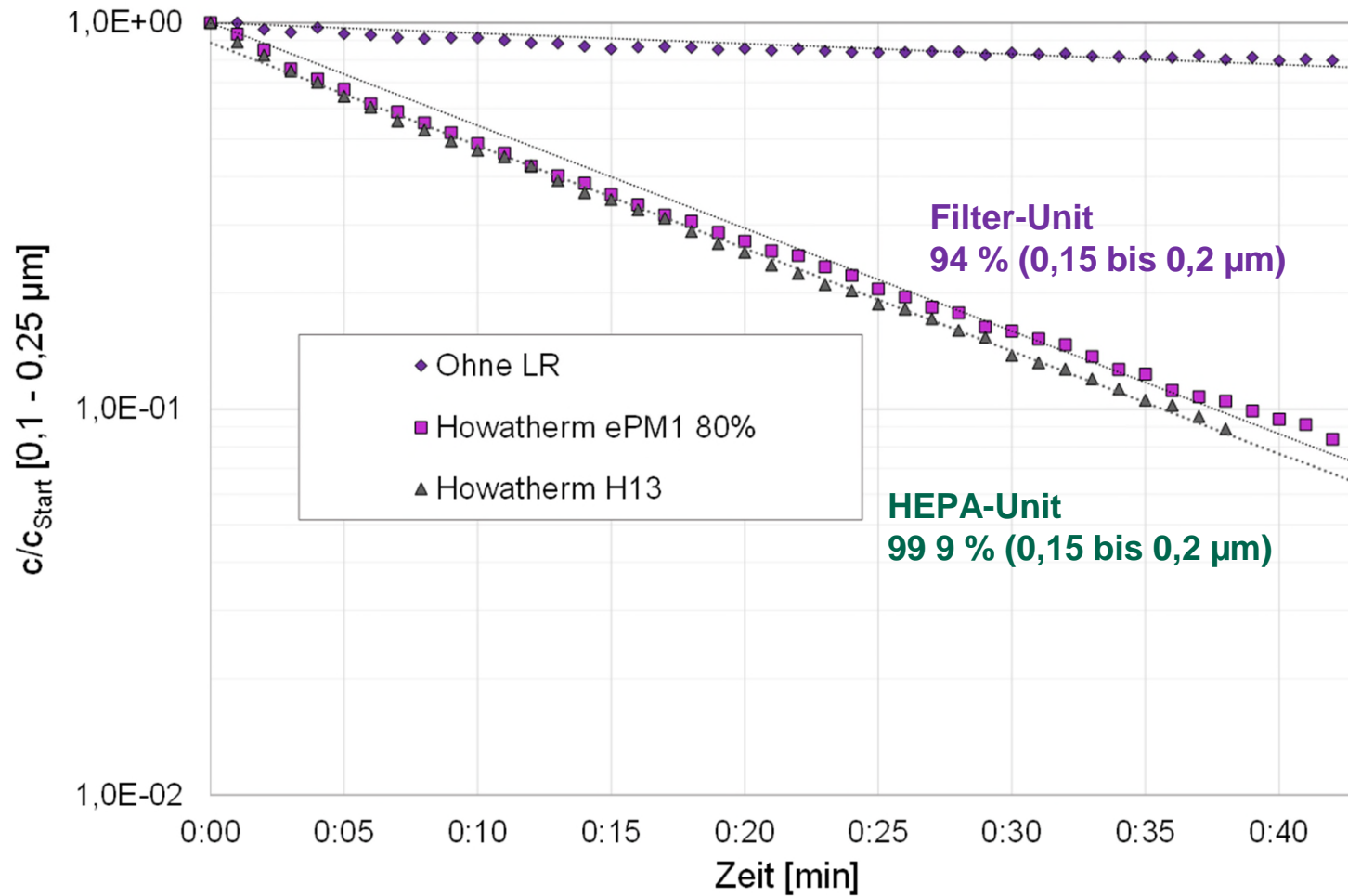


Aerosolpartikel 0,3 bis 0,5 μm

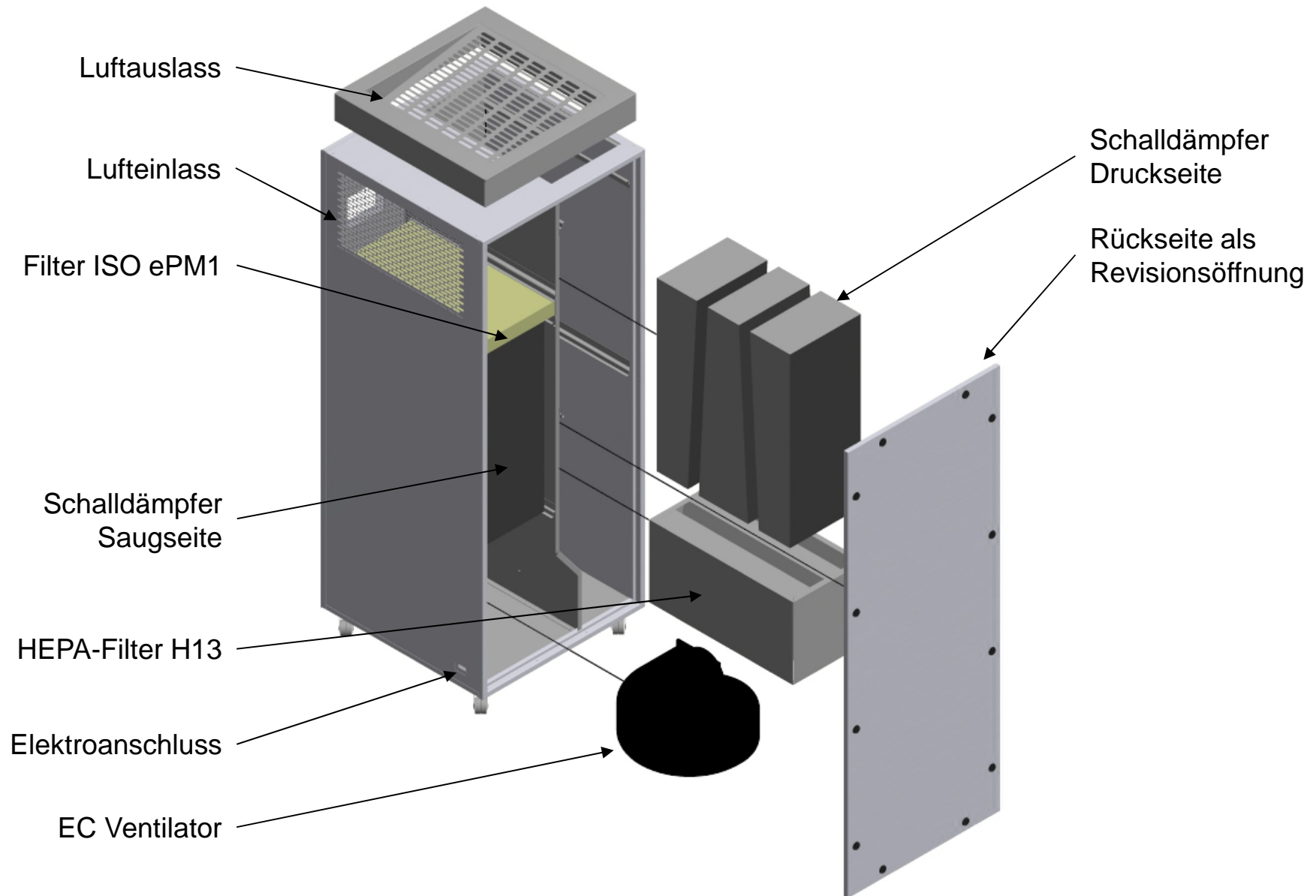


Aerosolpartikel 0,5 bis 1,0 μm

## Messung des ILK Dresden 2020

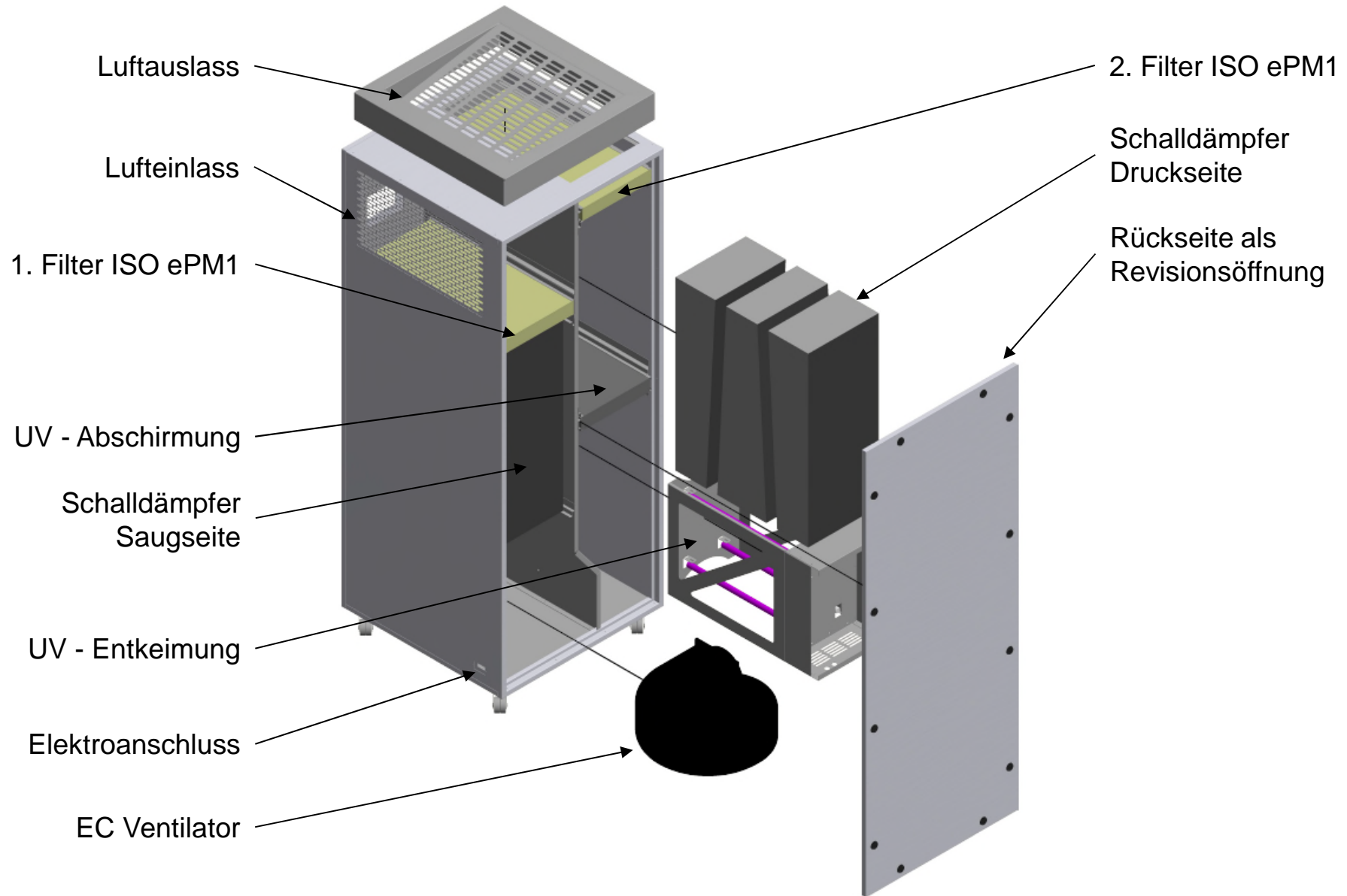


# Filter-Unit+ compact





# UV-Unit compact



# Unit compact



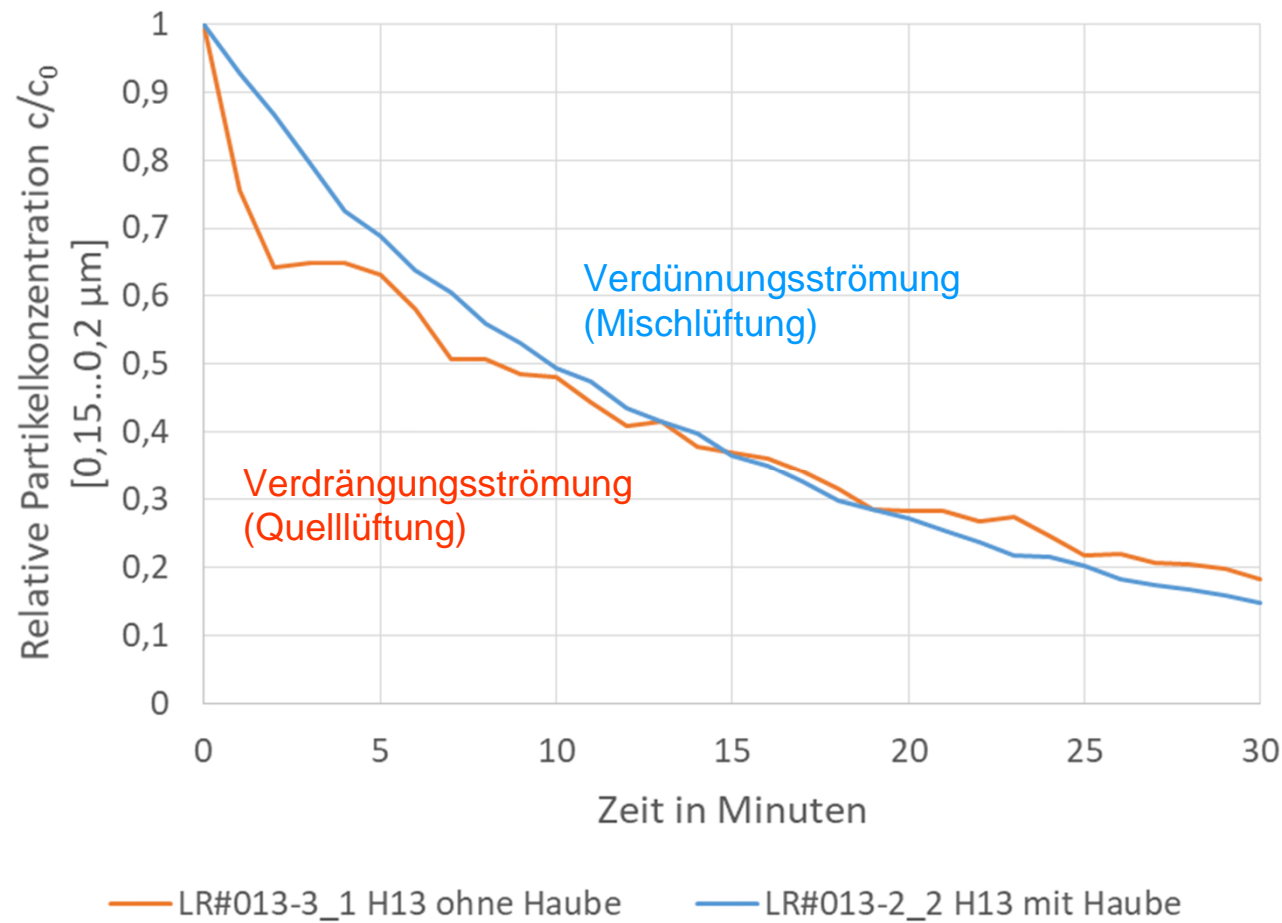
## Messung des ILK Dresden 2020 (Mischluftaufsatz) LW = 3



## Messung des ILK Dresden 2020 (Quellluftaufsatz) LW = 3



## Messung des ILK Dresden 2020

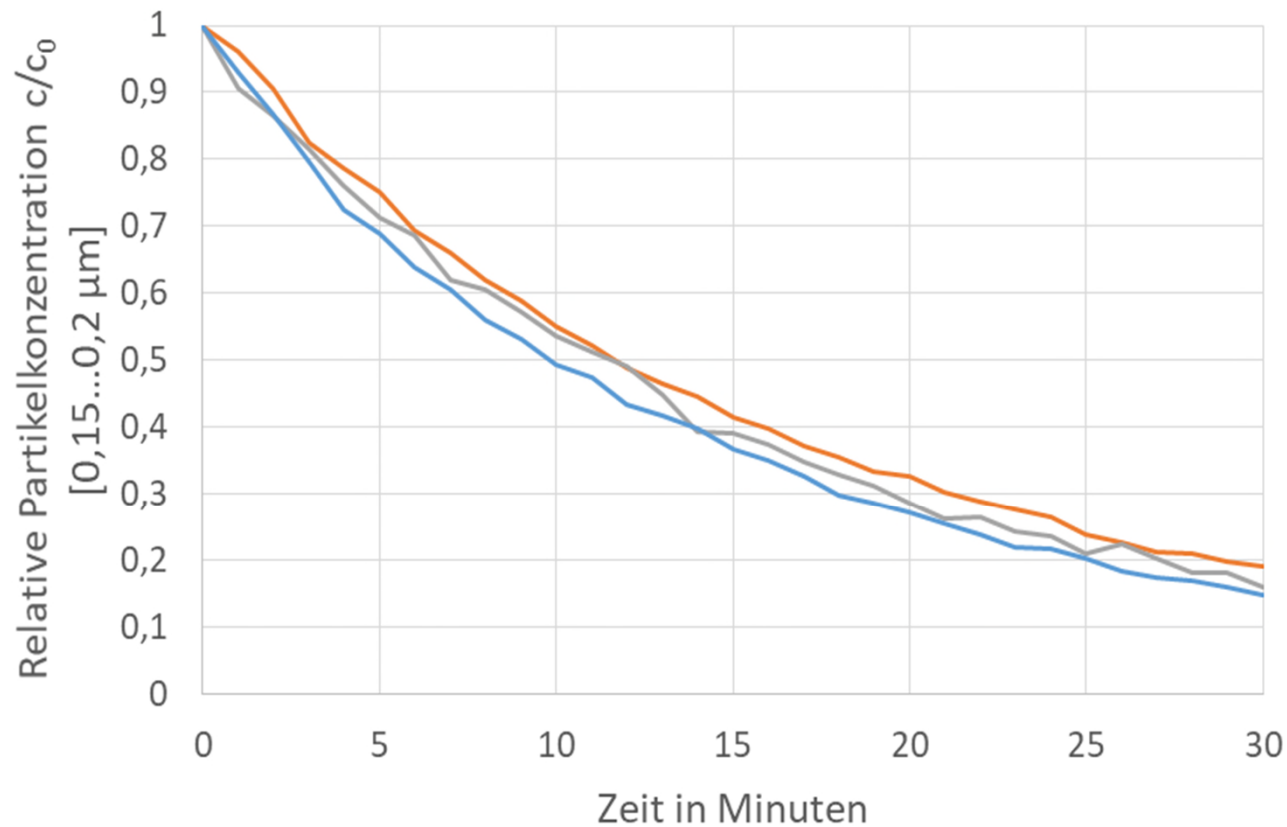


LR = 3,7 h<sup>-1</sup>

RL = 3,6 h<sup>-1</sup> mit ML

RL = 3,0 h<sup>-1</sup> mit QL

## Messung des ILK Dresden 2020



LR = 3,7 h<sup>-1</sup>

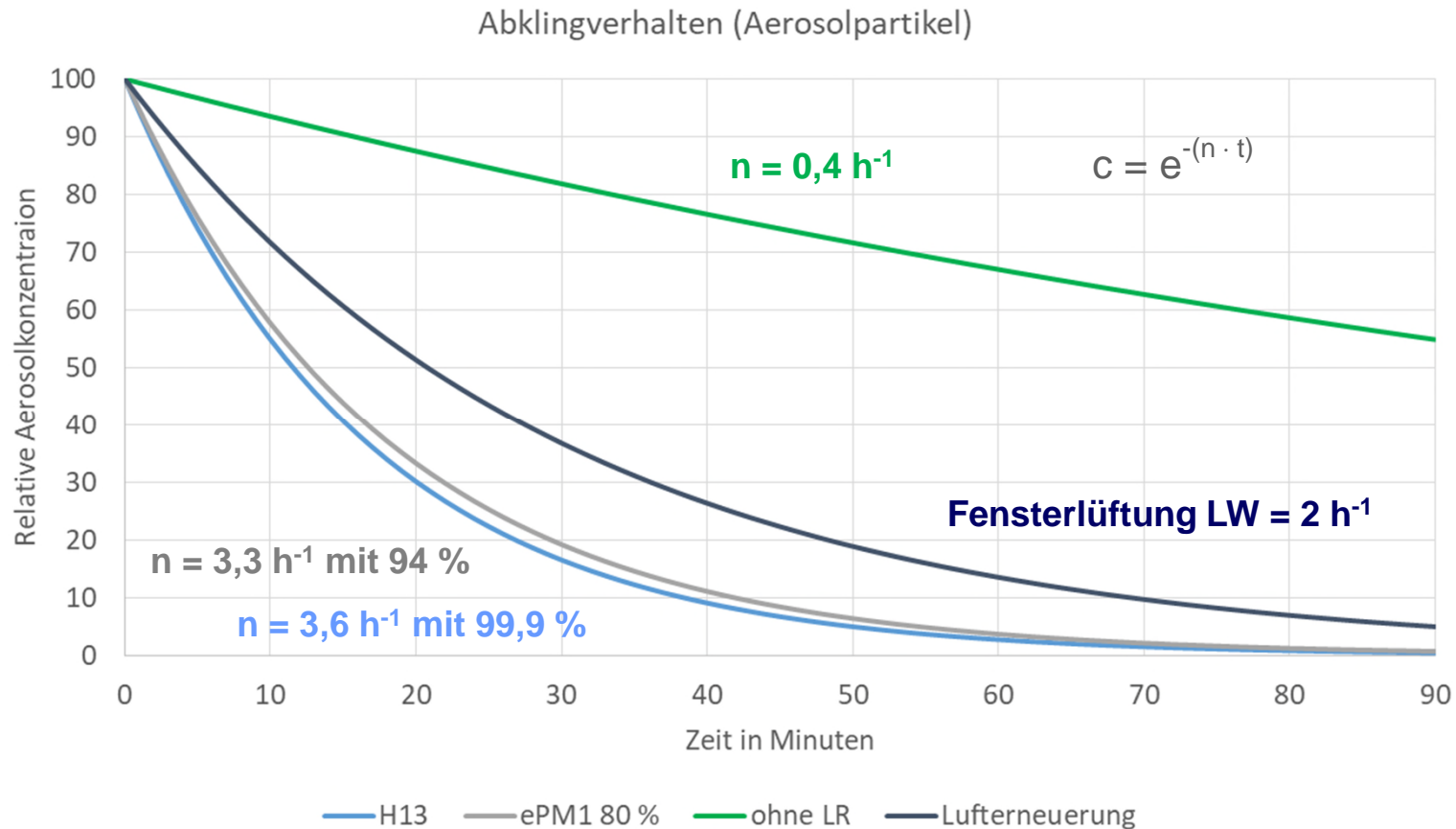
RL = 3,6 h<sup>-1</sup> mit HEPA

RL = 3,3 h<sup>-1</sup> mit ePM1

— LR#013-1 ePM1\_80 mit Haube — LR#013-2 H13 mit Haube

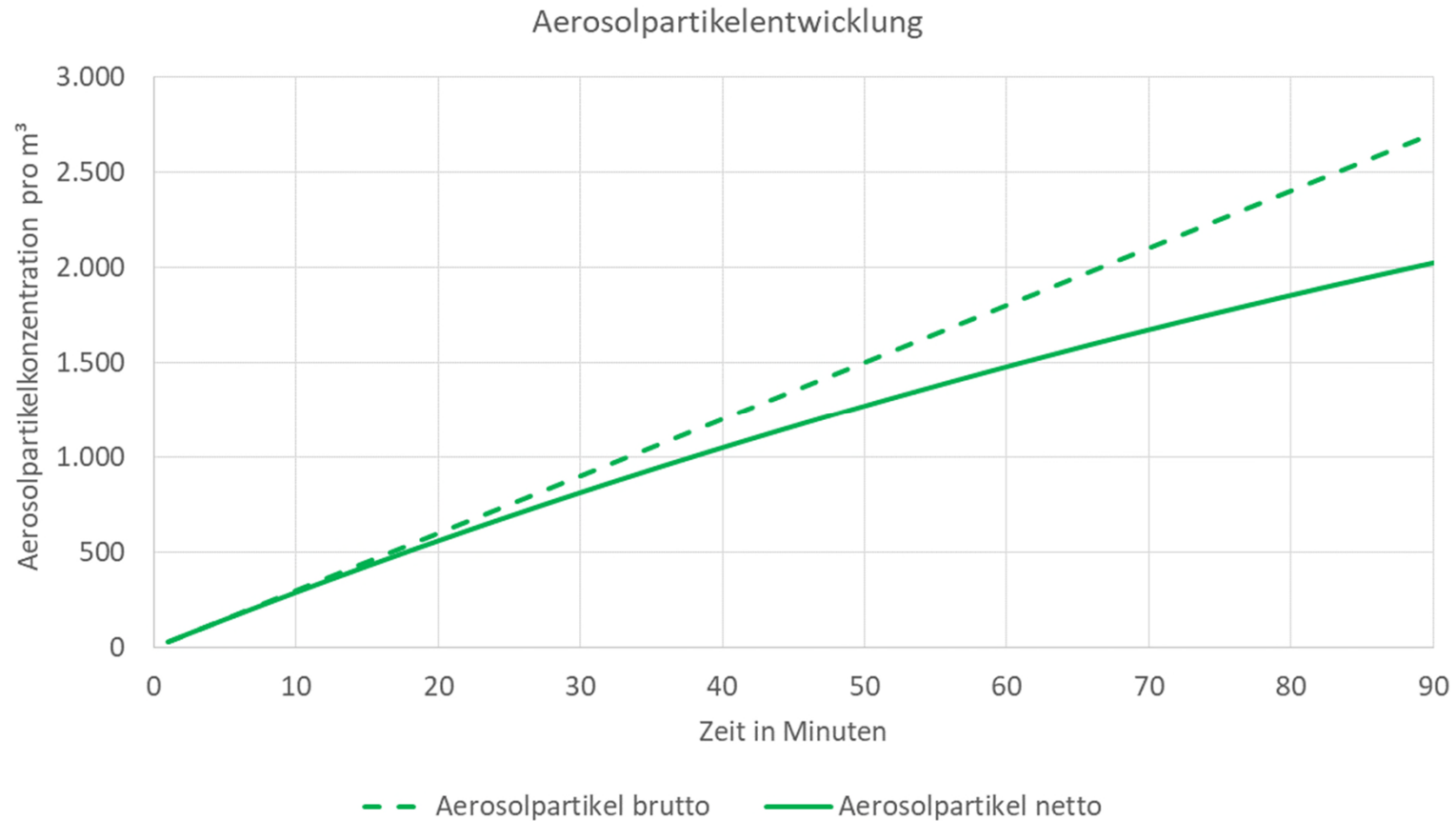
— LR#013-2\_2 H13 mit Haube

## Reduktion nach „Anfangsbelastung“



Reduktion einer Anfangskonzentration mit  $LR = 3,6 \text{ h}^{-1}$  (Messung HEPA H13) im Vergleich zur Lüftung ( $LW = 2 \text{ h}^{-1}$ )

## „Reale“ Partikelentwicklung mit infektiöser Person



Person spricht mit  $\varnothing$  100 Aerosolpartikeln pro Sekunde (Emission bei einem Raumvolumen von 200 m<sup>3</sup>) (**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]

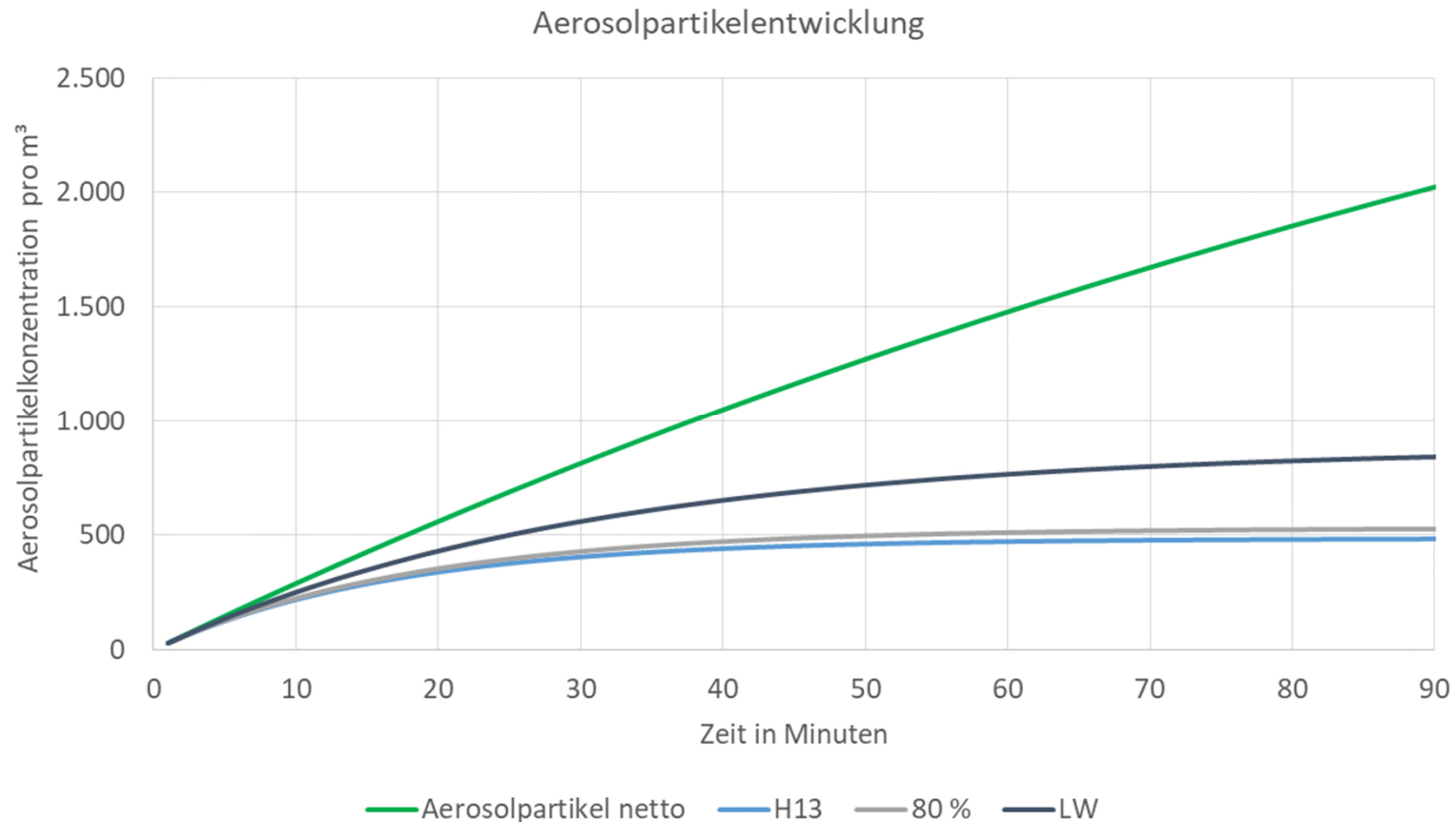
**c<sub>a</sub>** Anfangskonzentration [z. B. ppm]

**n** **Luftwechsel je h** [h<sup>-1</sup>]

**q** **Abgabe der Personen** z. B. CO<sub>2</sub> [z. B. l/h]

**V** **Raumvolumen** [m<sup>3</sup>]

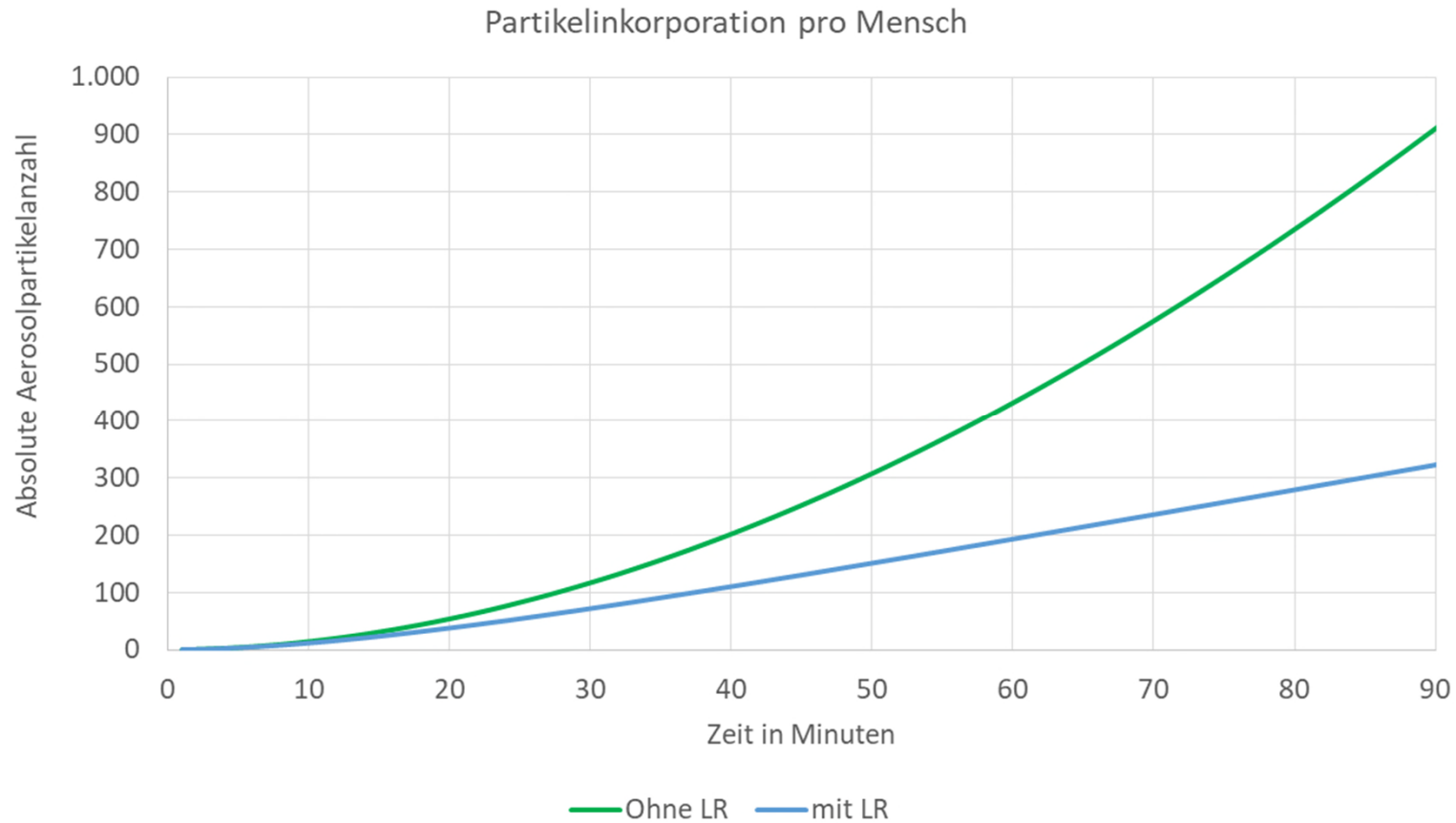
## Partikelentwicklung mit einer infizierten Person



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  $200 \text{ m}^3$ ) (**keine Maske**)

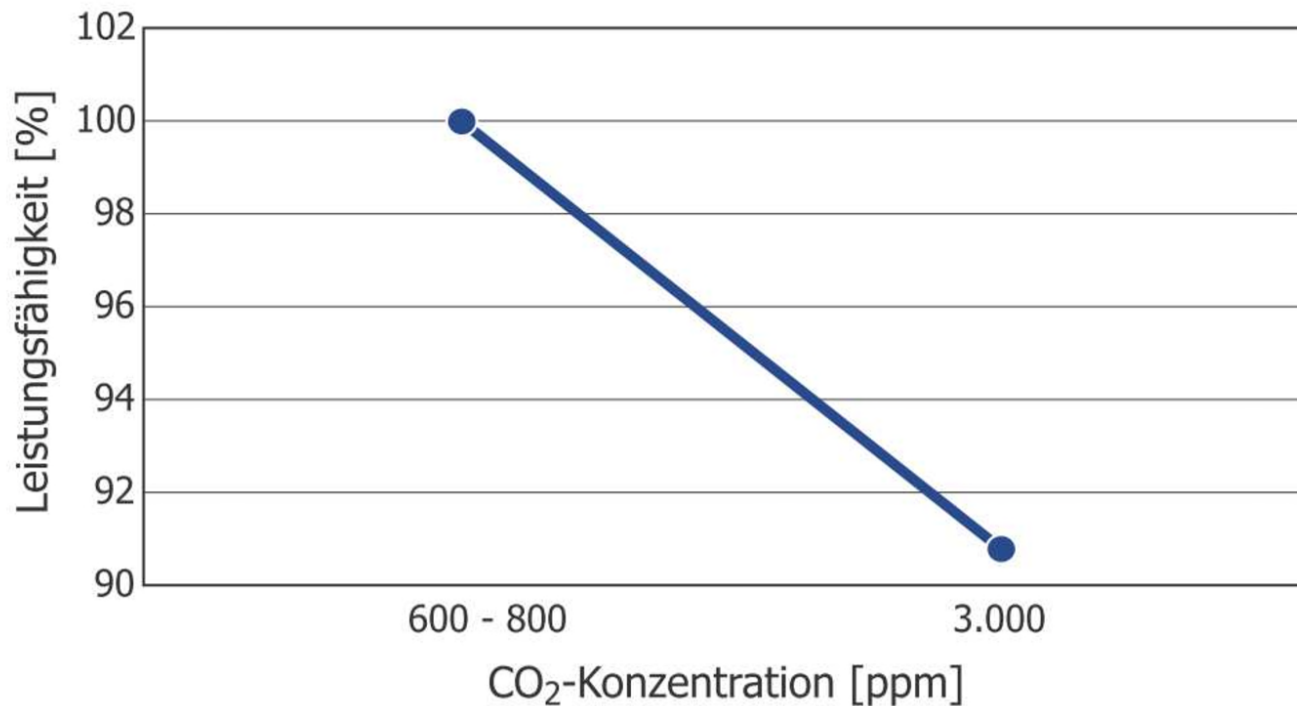
## Partikelinkorporation



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

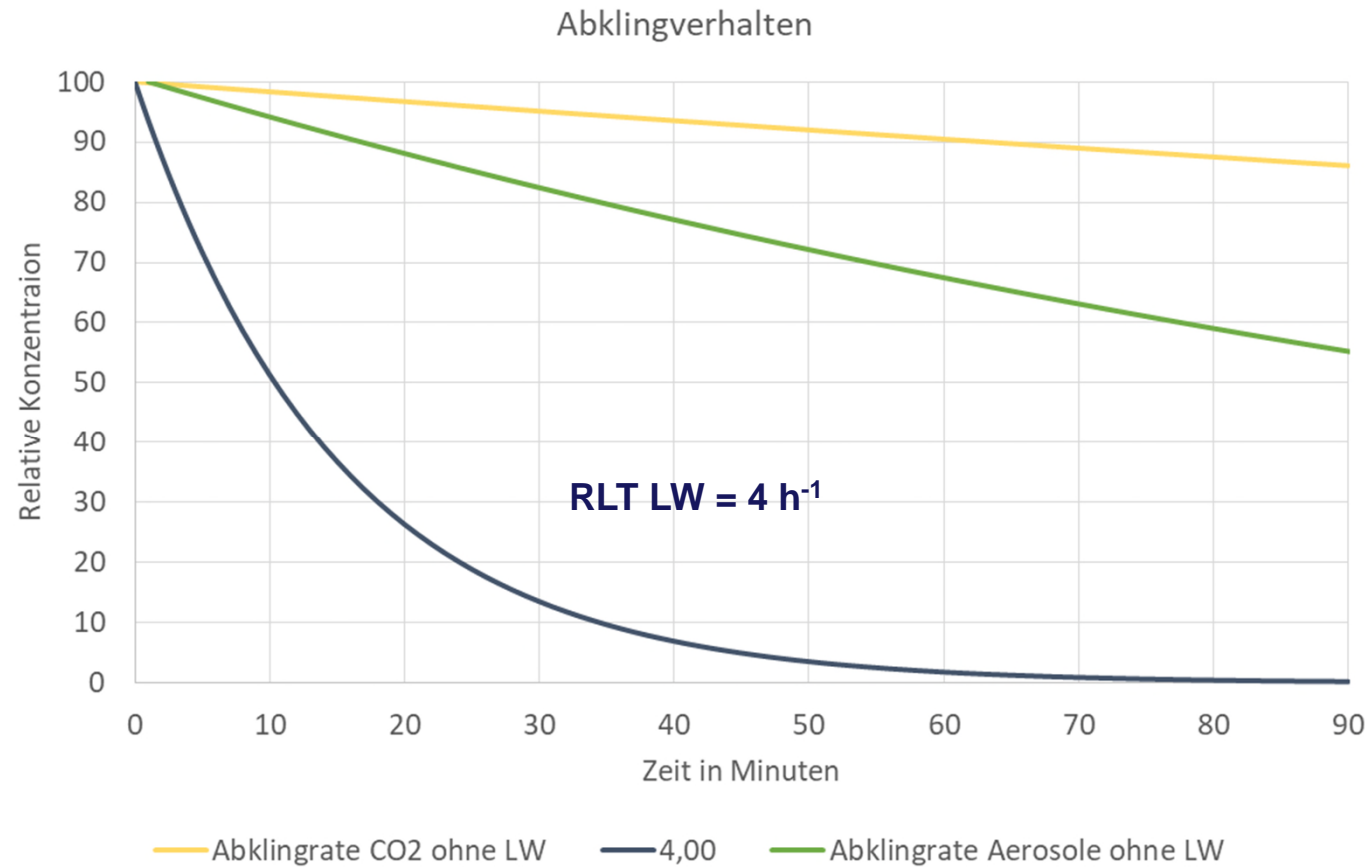
Person atmet  $0,5 \text{ l/Atemzug}$  mit 18 Zügen pro Minute (**keine Masken**)

## CO<sub>2</sub>-Einfluss auf die kognitive Leistungsfähigkeit



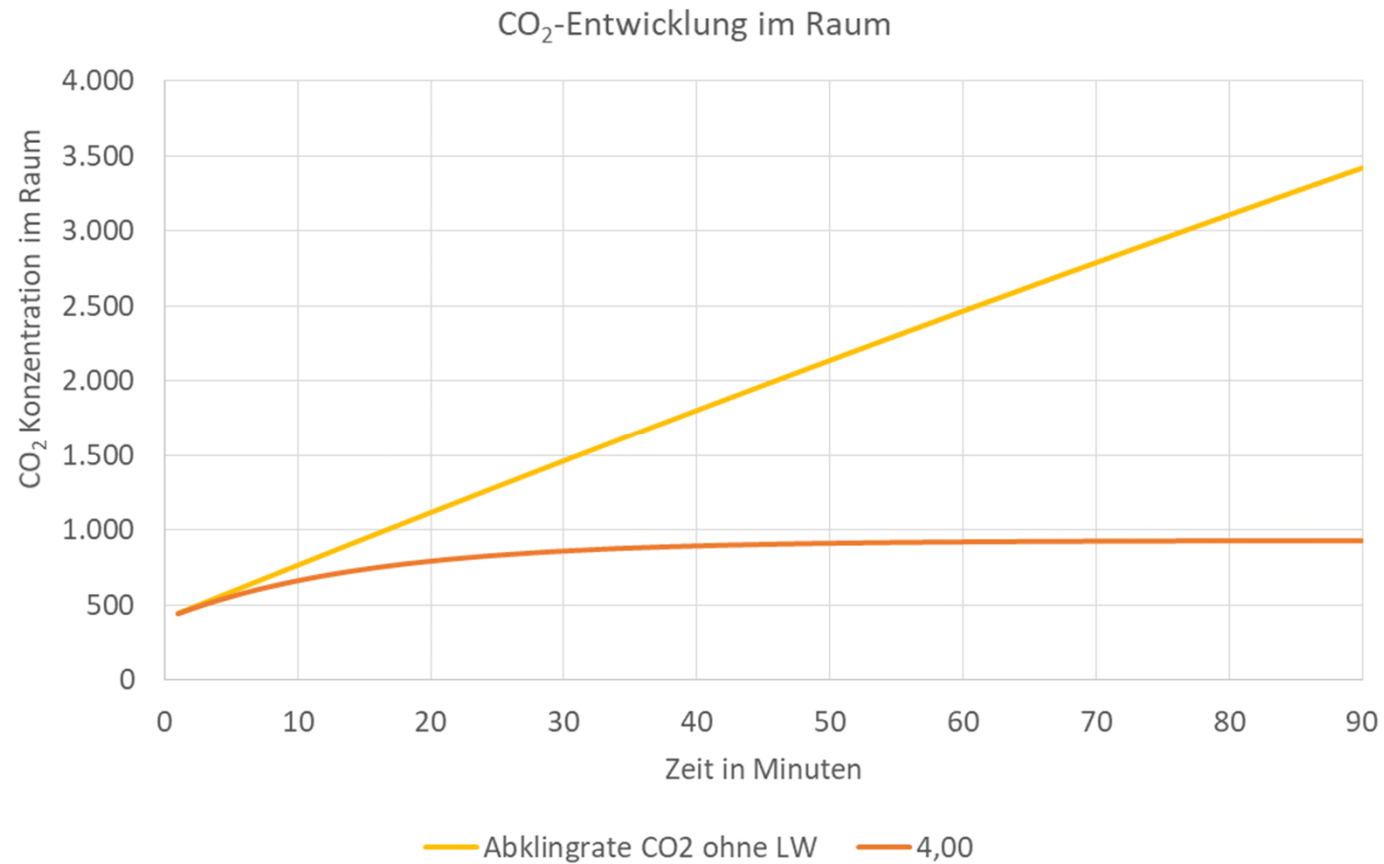
Ergebnis eines in österreichischen Schulen durchgeführten Aufmerksamkeits- und Konzentrationstests in Abhängigkeit unterschiedlicher CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, Quelle: Ribic, Unser Weg, Heft 5, 2007

## Reduktion nach „Anfangsbelastung“



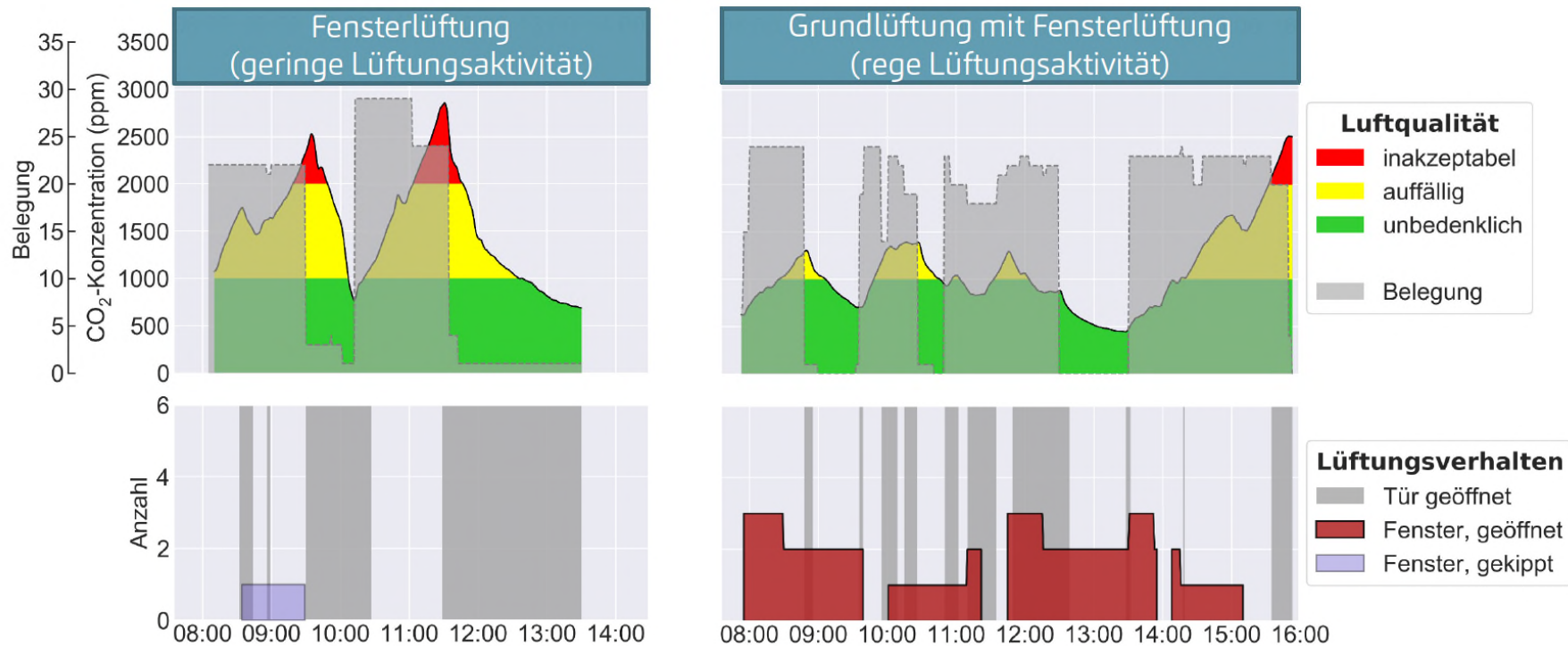
Reduktion einer Anfangskonzentration mit RLT-Anlage mit LW = 4 h<sup>-1</sup> / Abklingrate CO<sub>2</sub> 0,1 h<sup>-1</sup> / Abklingrate Partikel 0,4 h<sup>-1</sup>

## CO<sub>2</sub>-Entwicklung im Raum

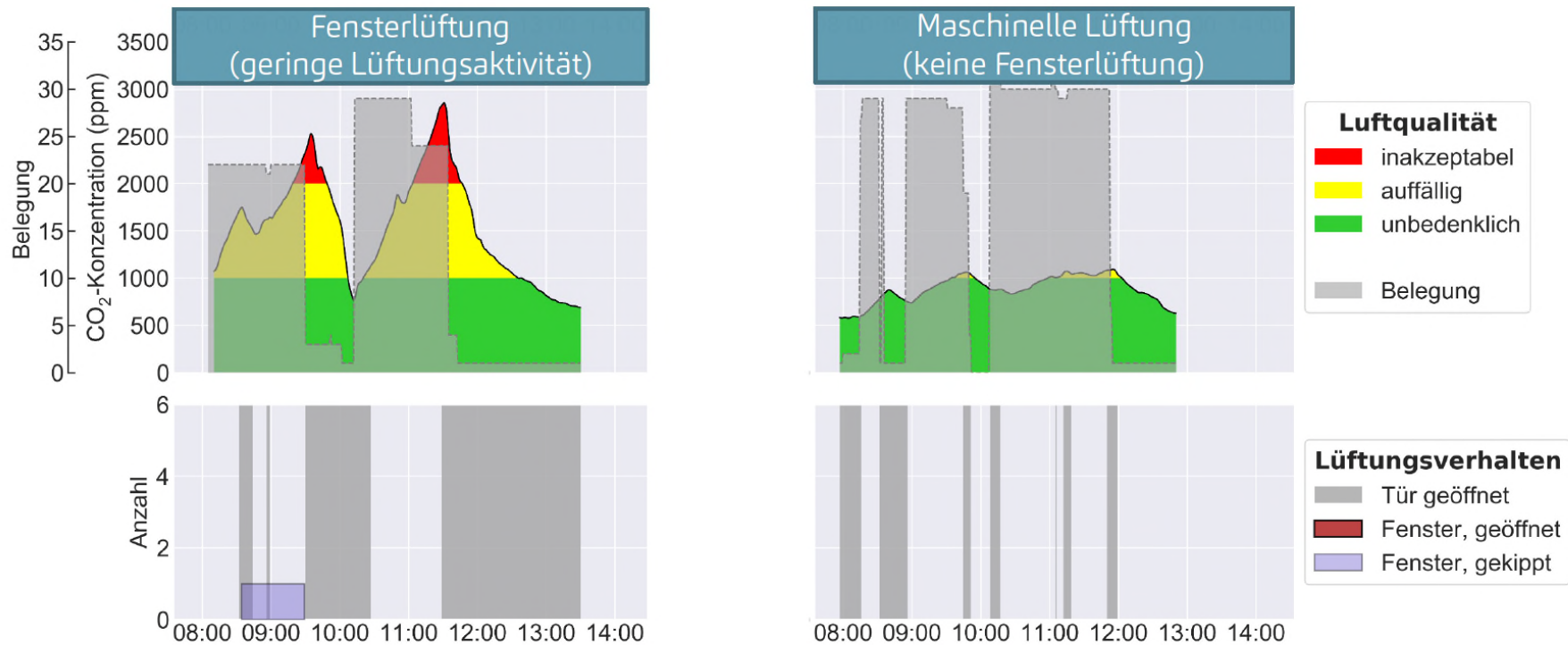


**24 Personen** mit 18 l/h CO<sub>2</sub>-Produktion (Raumvolumen 200 m<sup>3</sup>) mit **RLT-Anlage** mit **LW = 4 h<sup>-1</sup>**

## Fensterlüftung gekipptes vs. Offenes Fenster

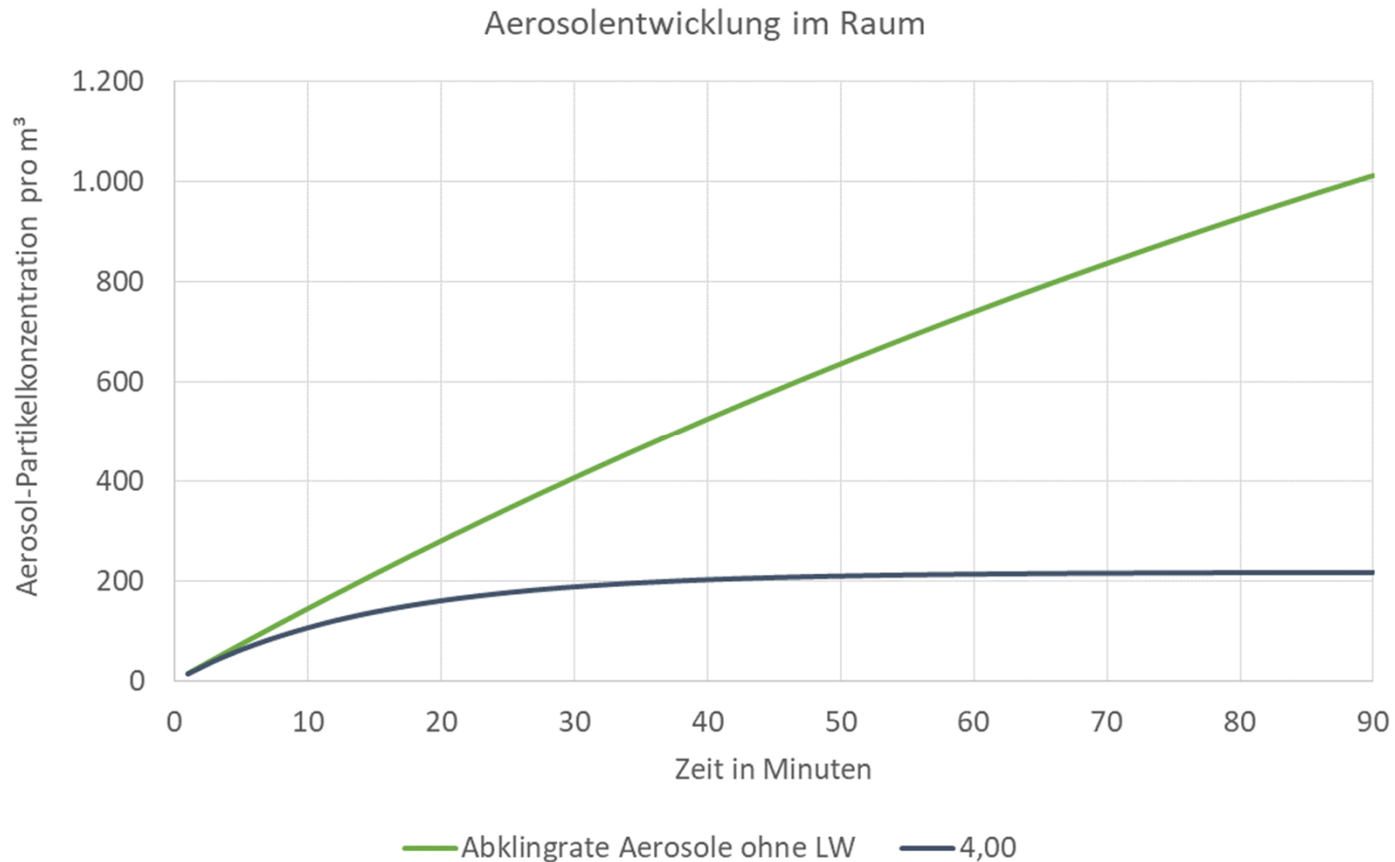


## Fensterlüftung vs. Mechanische Lüftung





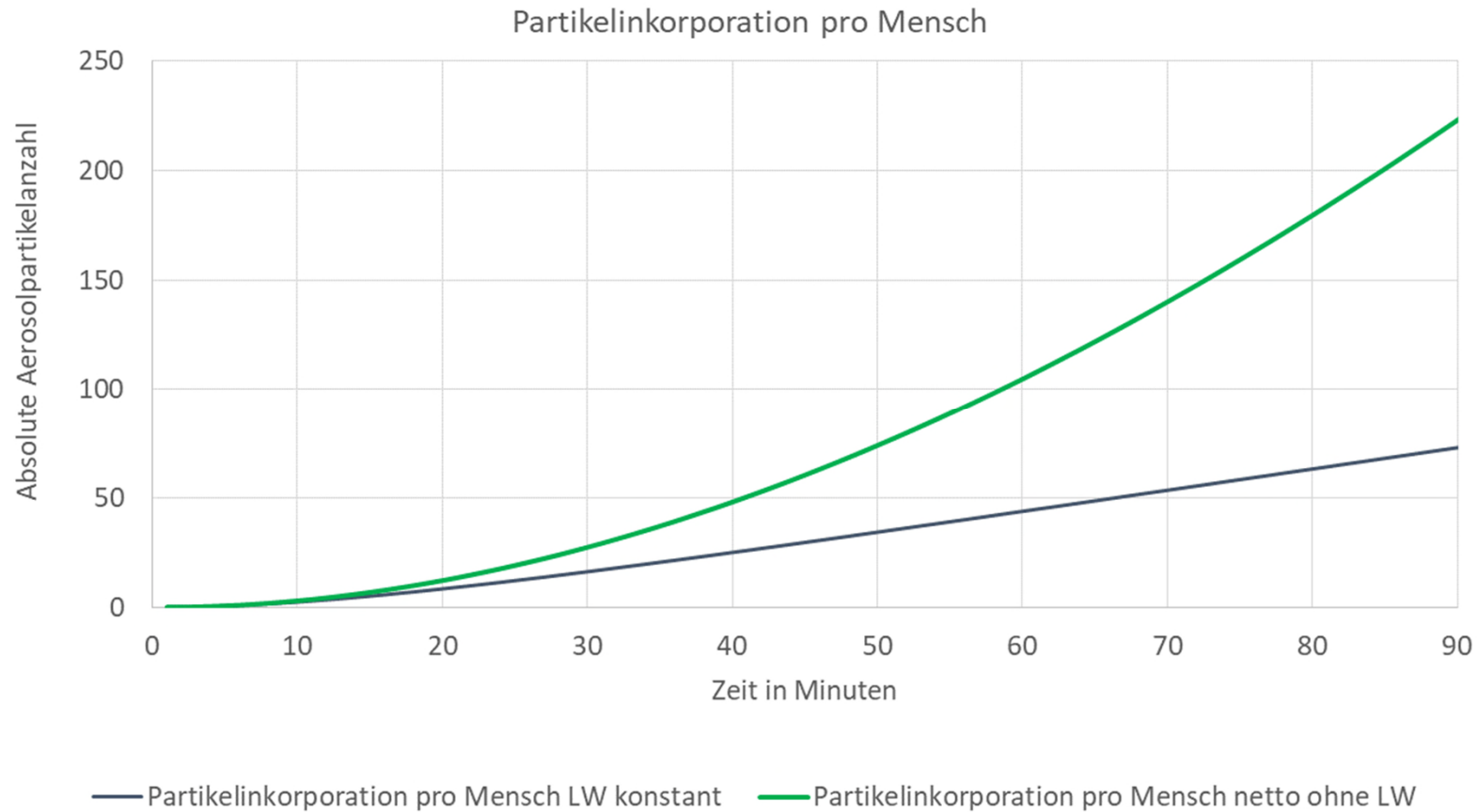
## Partikelentwicklung mit einer infizierten Person



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

1 Person spricht mit 100 Aerosolpartikeln pro Sekunde (Emission bei einem Raumvolumen von 200 m<sup>3</sup>)

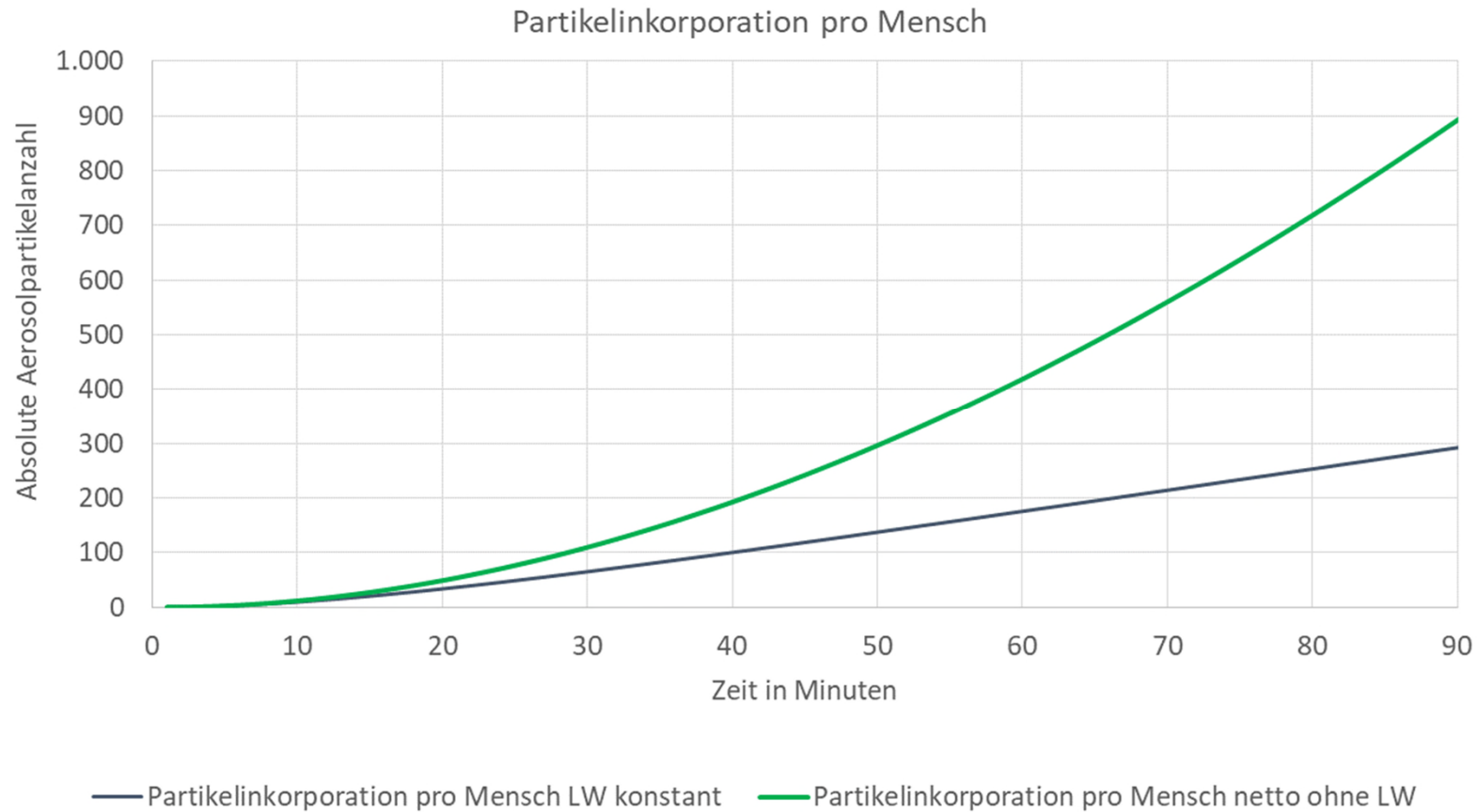
## Partikelinkorporation mit Masken



Partikelanzahl an Aerosolen **RLT-Anlage** mit **LW = 4 h<sup>-1</sup>** (Raumvolumen von 200 m<sup>3</sup>) 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

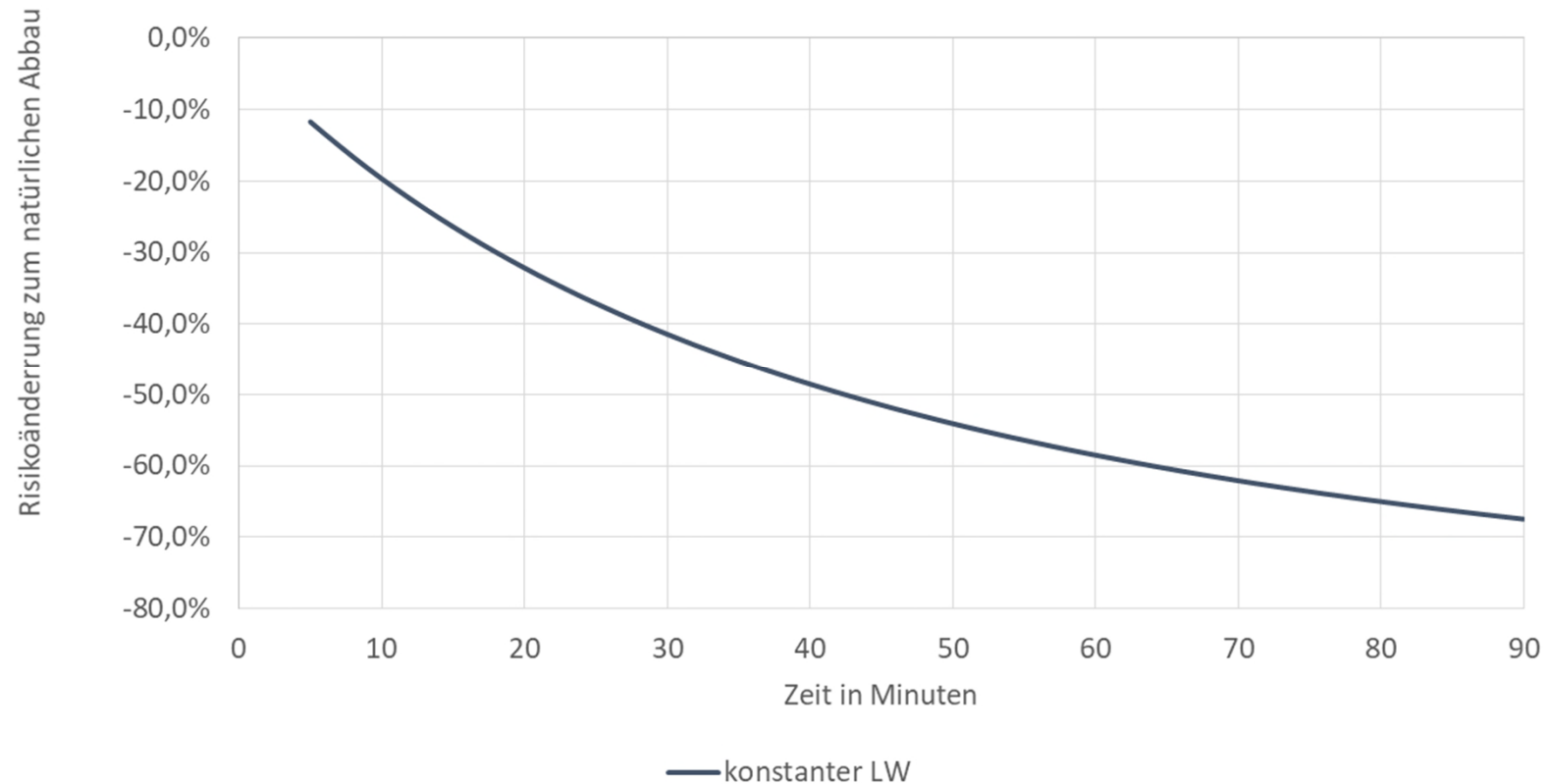


Partikelanzahl an Aerosolen **RLT-Anlage** mit **LW = 4 h<sup>-1</sup>**

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

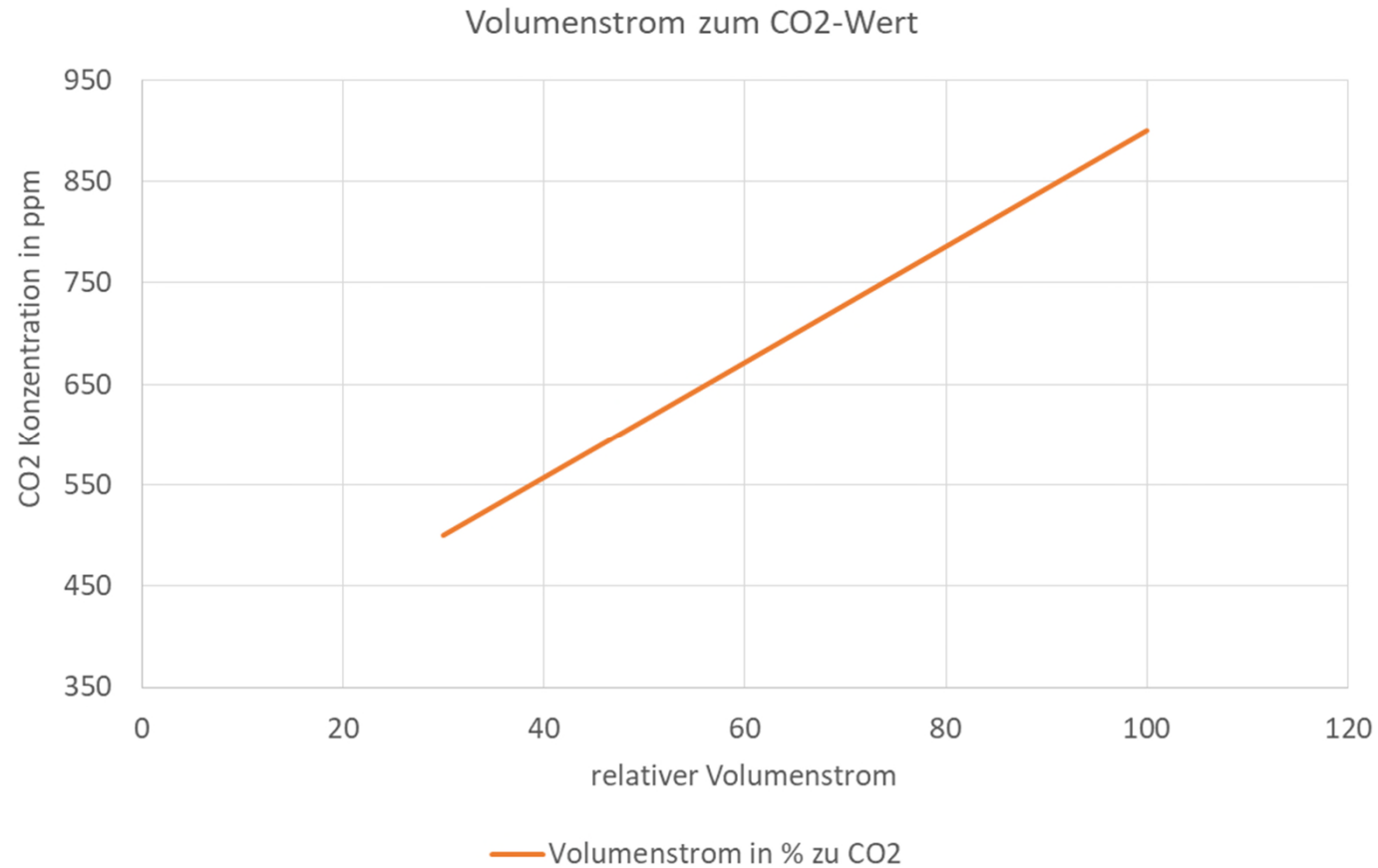
$n_R$       **Anzahl der Personen im Raum**

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 $k \geq 1$

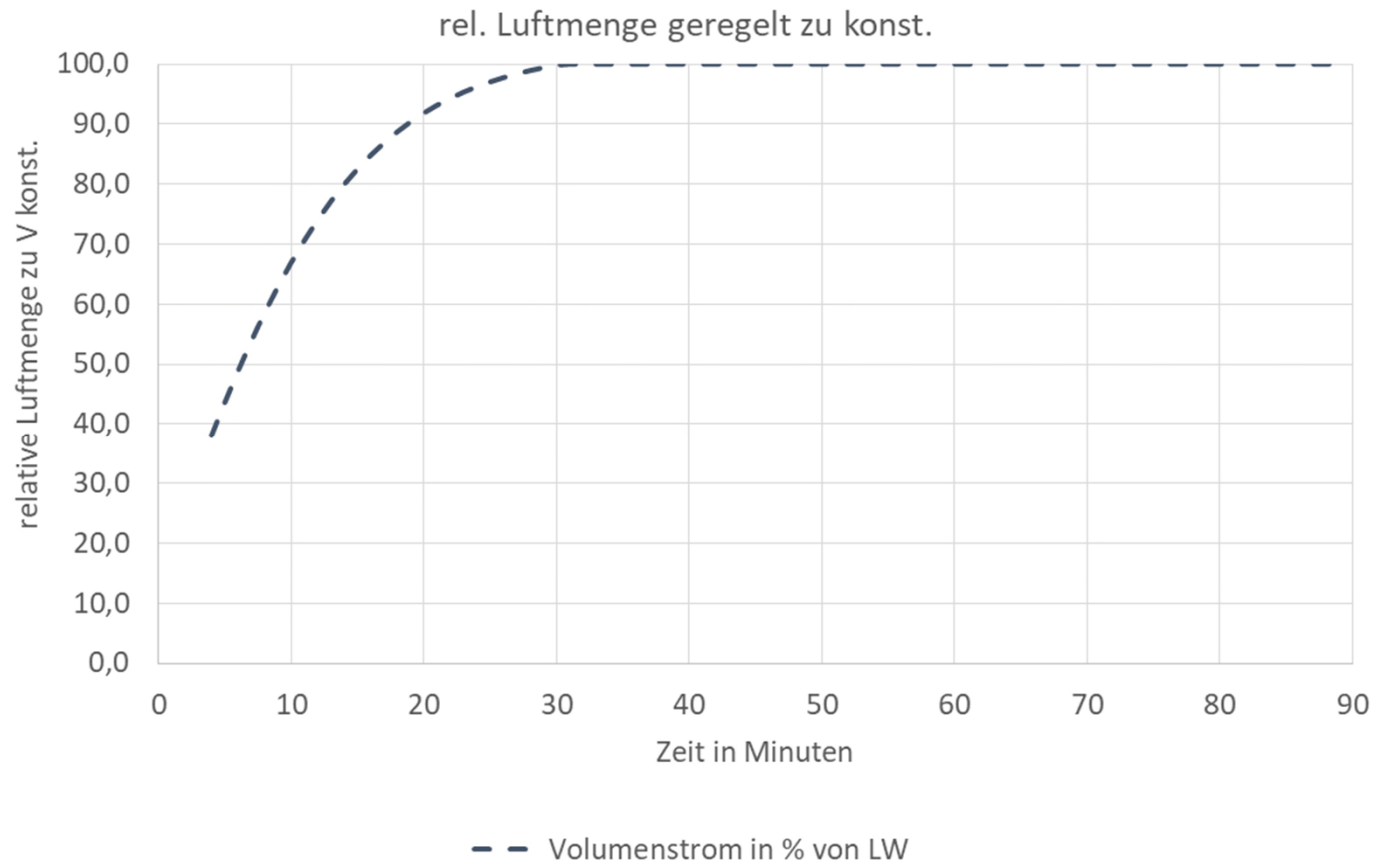
Anzahl Personen im Raum	Inzidenz				
	50	100	150	200	250
5	0,2%	0,5%	0,7%	1,0%	1,2%
10	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%	2,5%
15	0,7%	1,5%	2,2%	3,0%	3,7%
20	1,0%	2,0%	3,0%	3,9%	4,9%
25	1,2%	2,5%	3,7%	4,9%	6,1%
50	2,5%	4,9%	7,2%	9,5%	11,8%
100	4,9%	9,5%	13,9%	18,1%	22,1%
150	7,2%	13,9%	20,2%	25,9%	31,3%
250	11,8%	22,1%	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%

## CO<sub>2</sub>-Regelung der RLT-Anlage



Regler Kennlinie CO<sub>2</sub> zum Volumenstrom

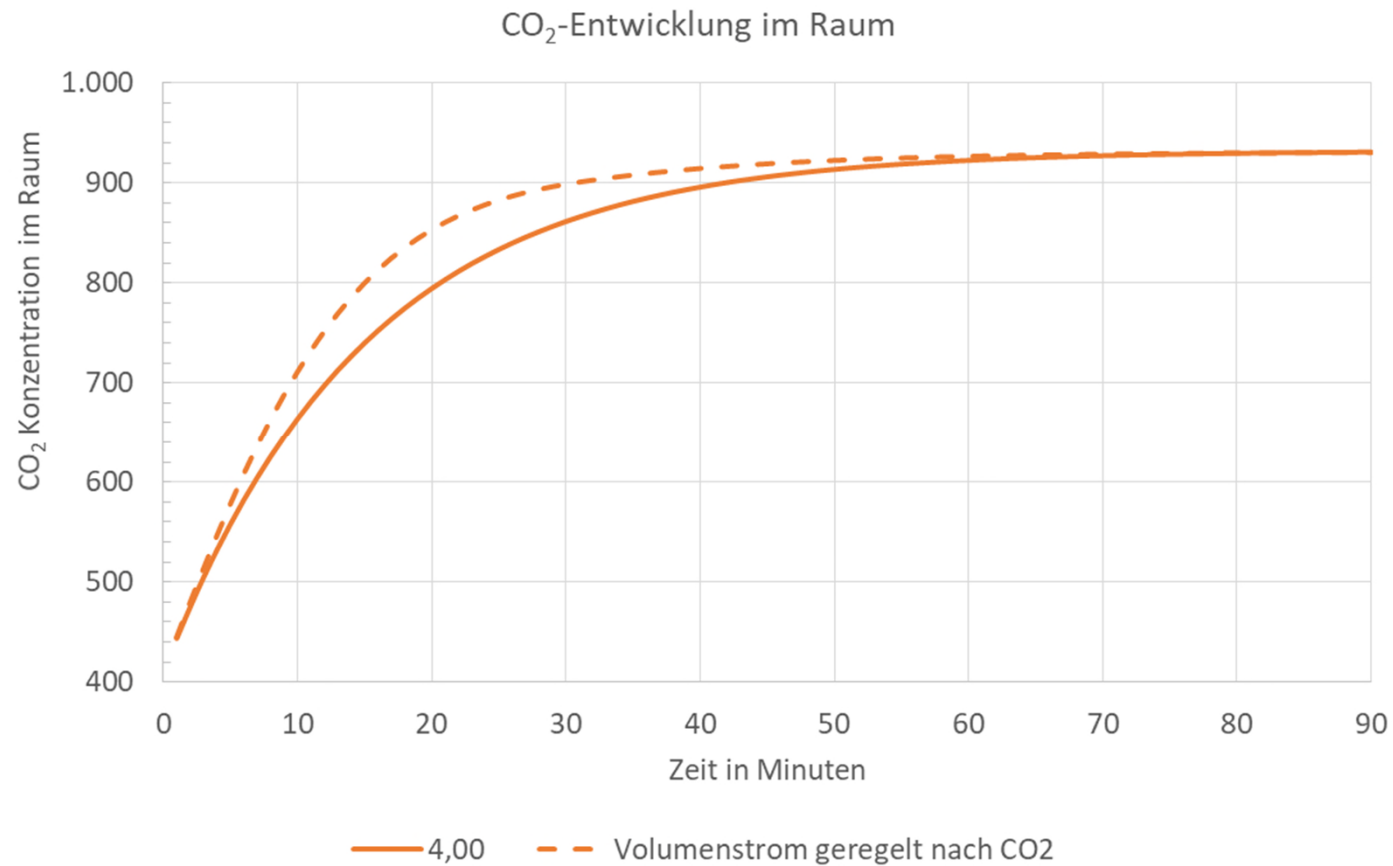
## CO<sub>2</sub>-Regelung der Anlage



Volumenstrom Kennlinie bei **24 Personen** im Raum (18 l/h CO<sub>2</sub>-Produktion pro Person)

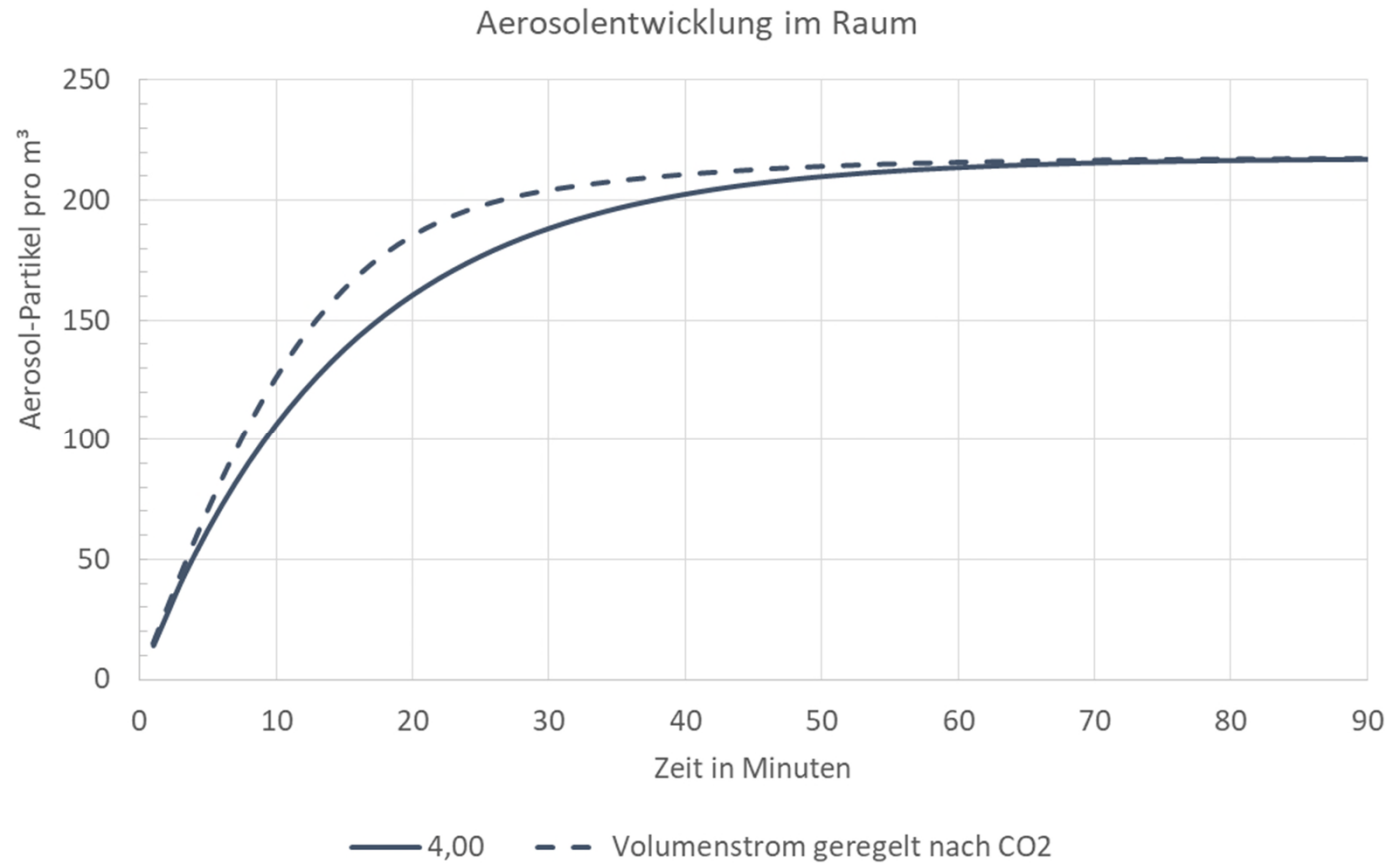


## CO<sub>2</sub>-Entwicklung im Raum



**24 Personen** mit 18 l/h CO<sub>2</sub>-Produktion (Raumvolumen 200 m<sup>3</sup>) mit RLT-Anlage mit LW = 4 h<sup>-1</sup>

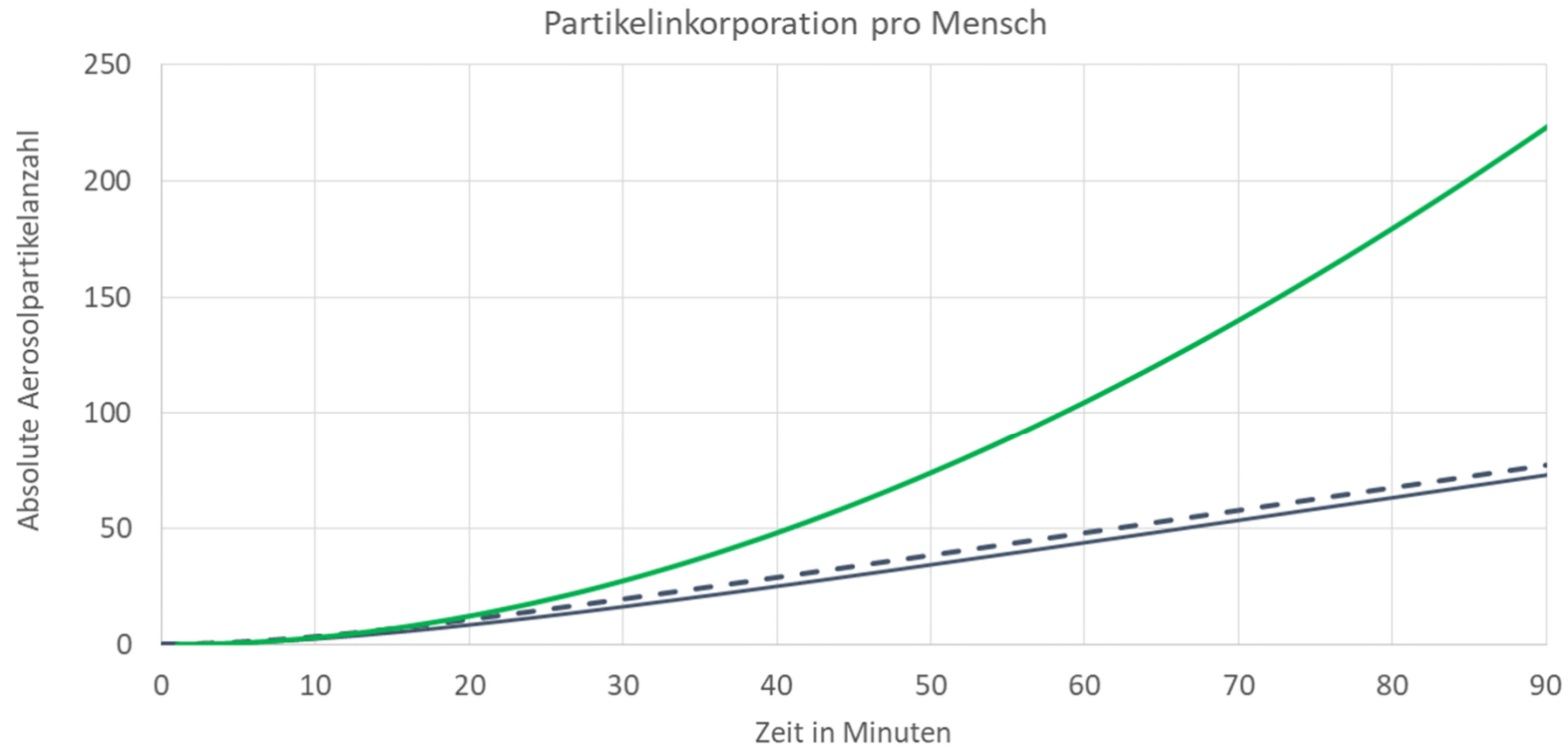
## Partikelentwicklung mit einer infizierten Person



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



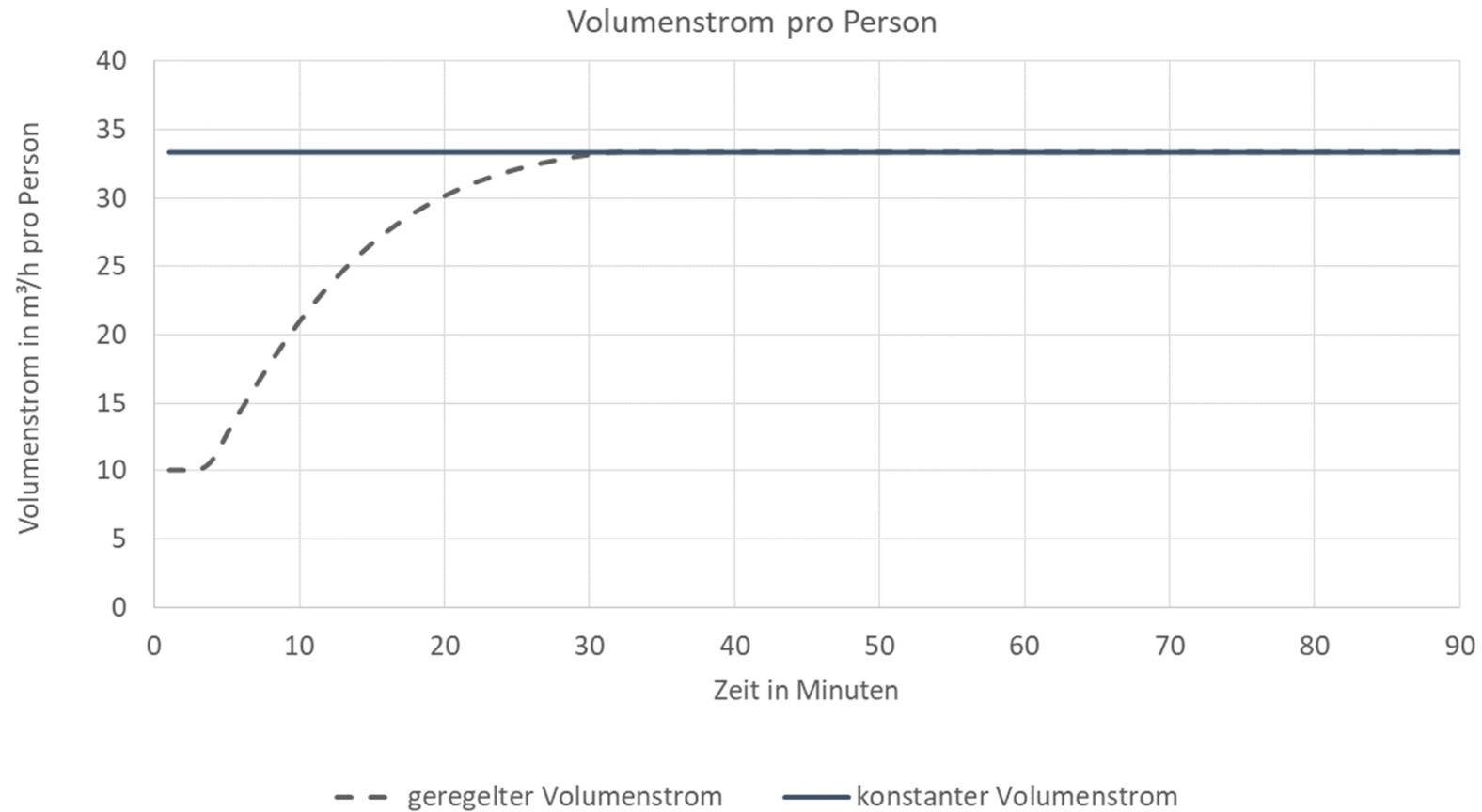
--- Partikelinkorporation pro Mensch LW geregelt    — Partikelinkorporation pro Mensch LW konstant

— Partikelinkorporation pro Mensch netto ohne LW

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

Rahmenbedingungen wie zuvor

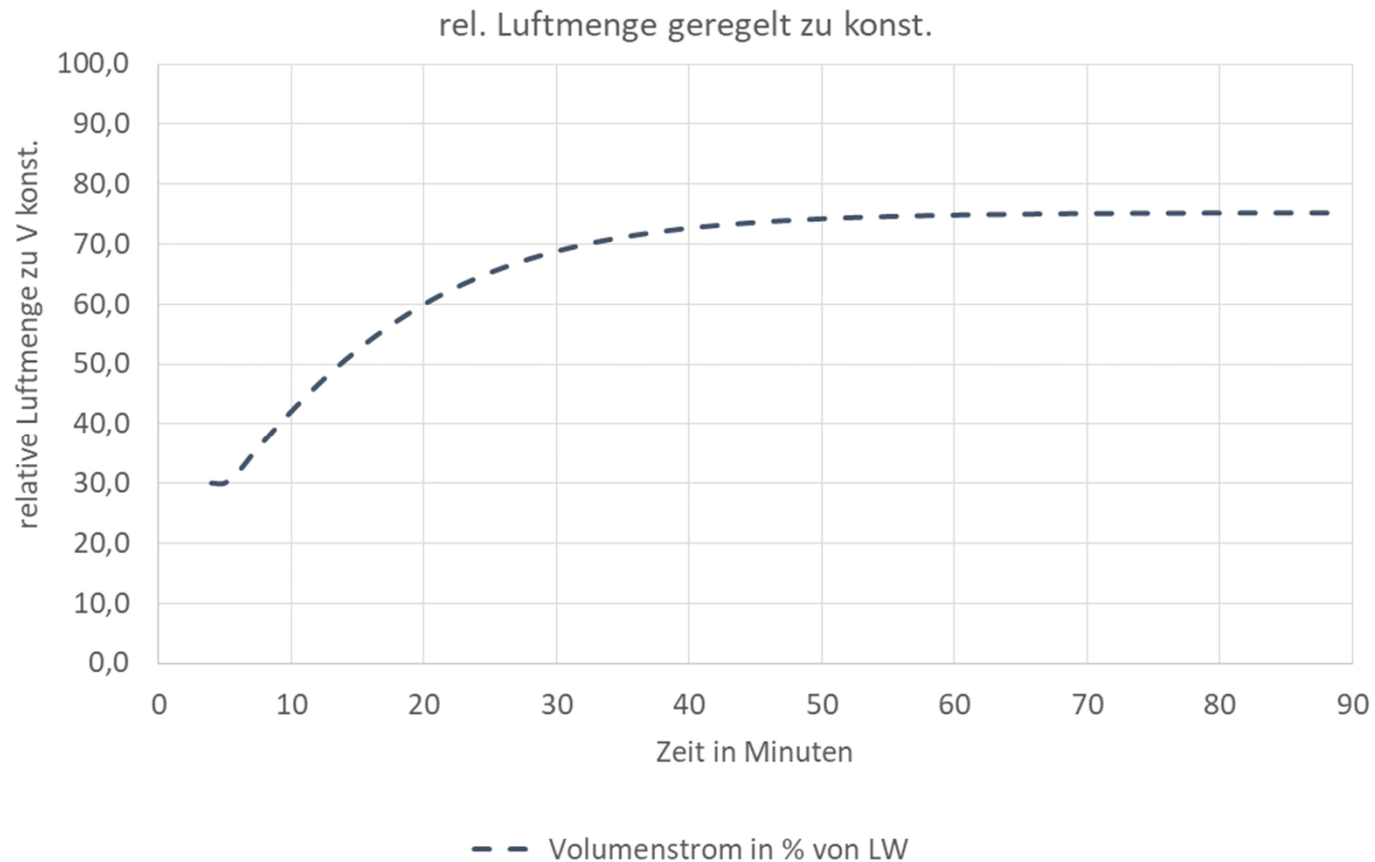
## Virenfreie Luftmenge pro Person



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

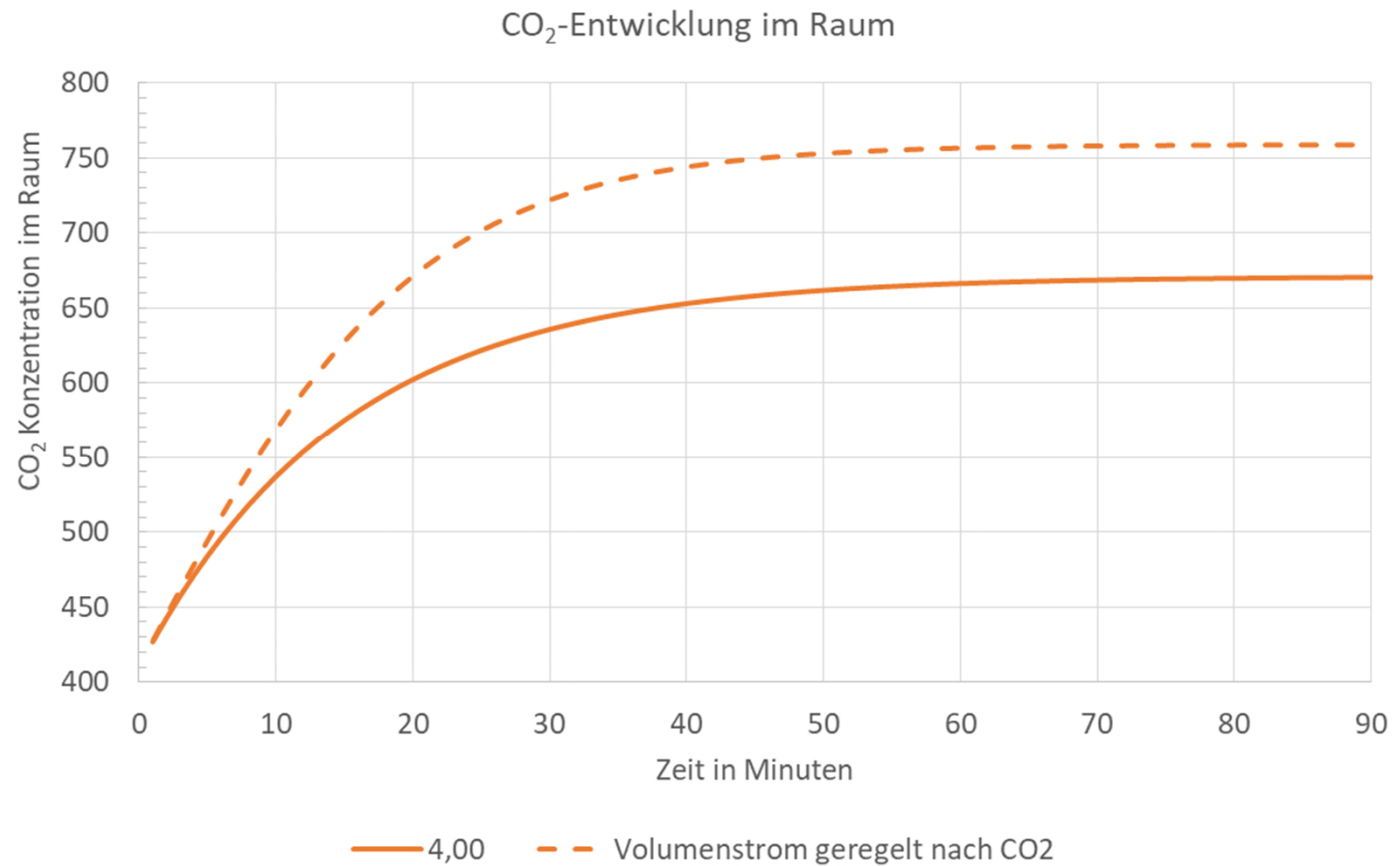
Rahmenbedingungen wie zuvor

## CO<sub>2</sub>-Regelung der Anlage (halbe Belegung)



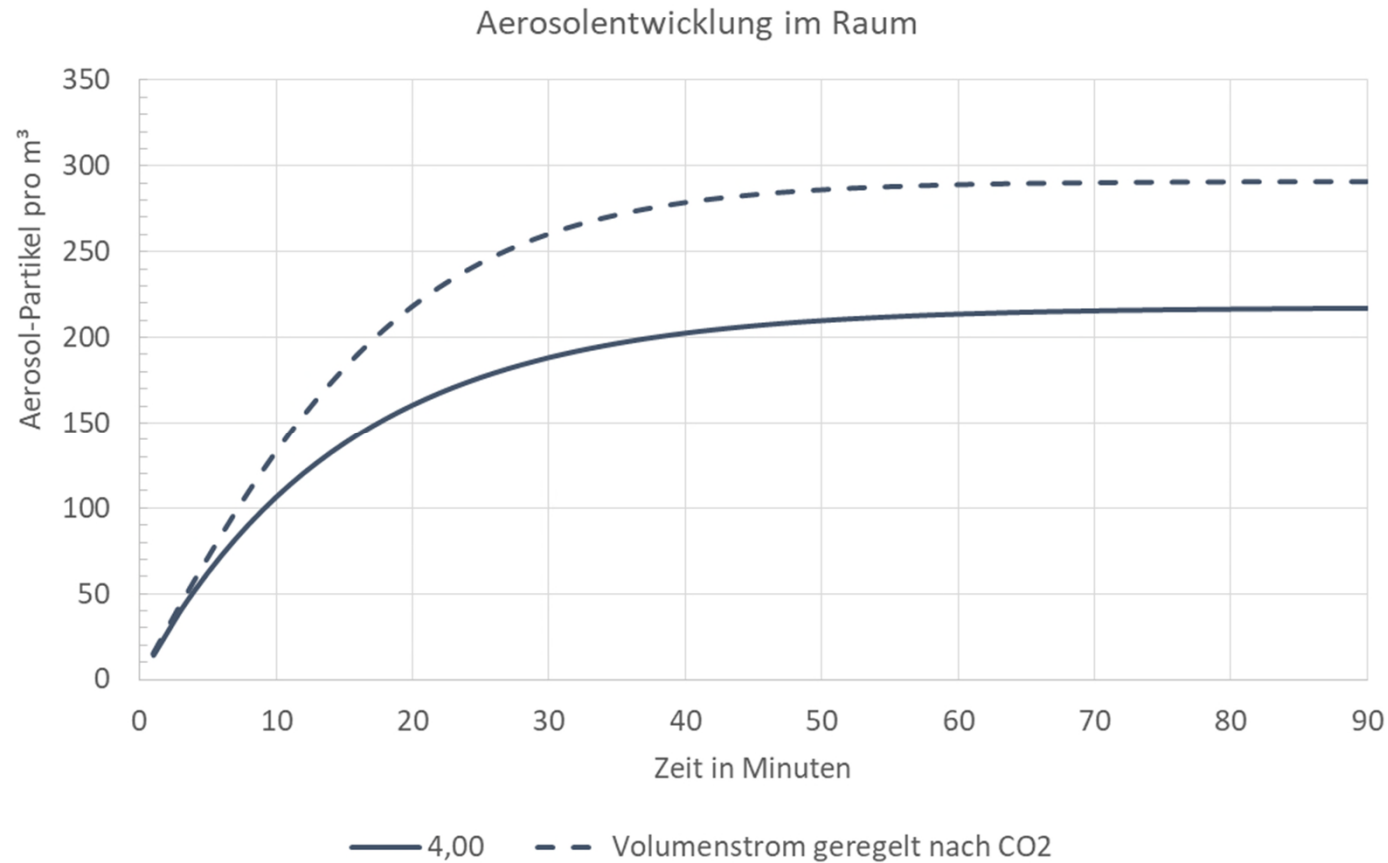
Volumenstrom Kennlinie bei **12 Personen** im Raum (18 l/h CO<sub>2</sub>-Produktion pro Person)

## CO<sub>2</sub>-Entwicklung im Raum (halbe Belegung)



**12 Personen** mit 18 l/h CO<sub>2</sub>-Produktion (Raumvolumen 200 m<sup>3</sup>) mit RLT-Anlage mit LW = 4 h<sup>-1</sup>

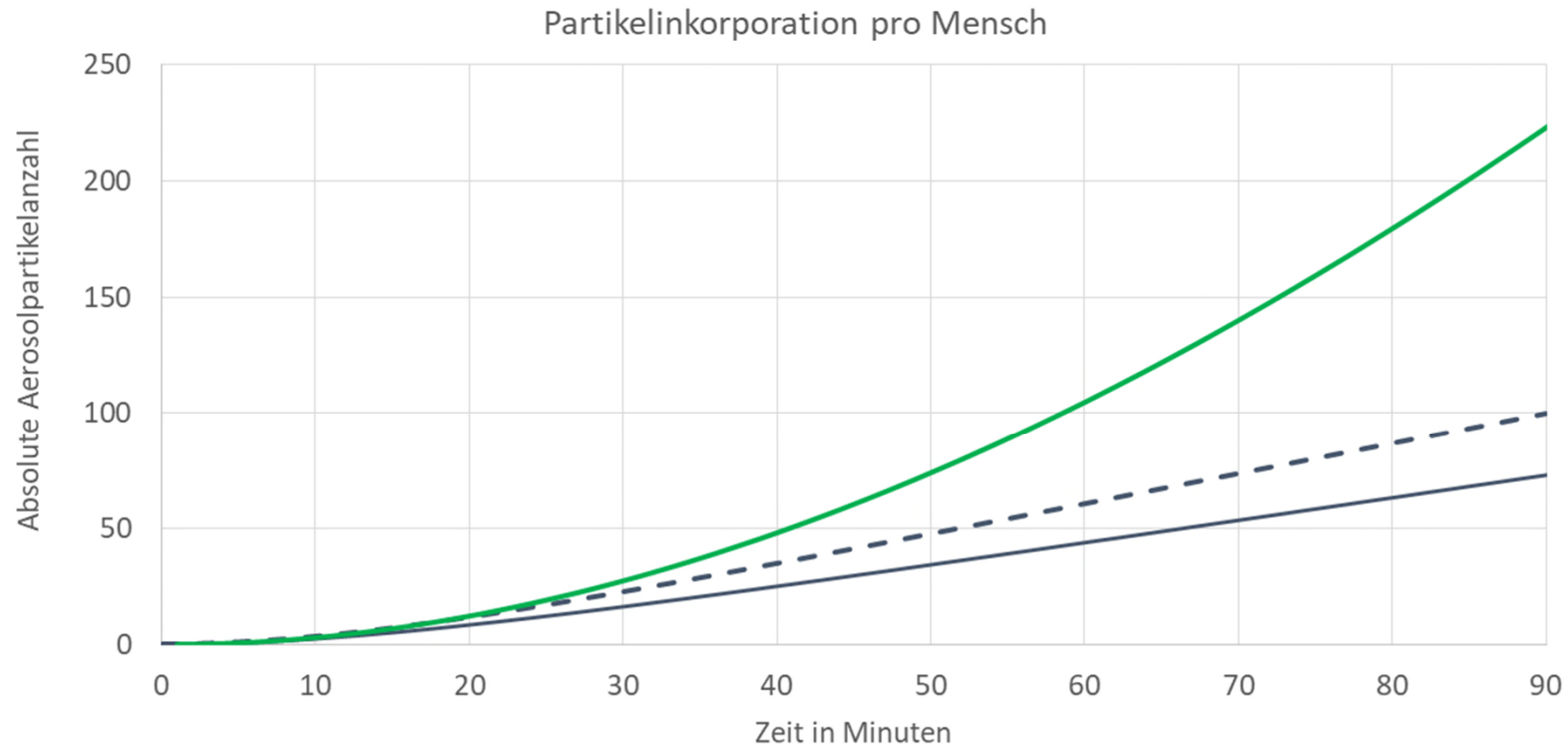
## Partikelentwicklung (halbe Belegung)



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

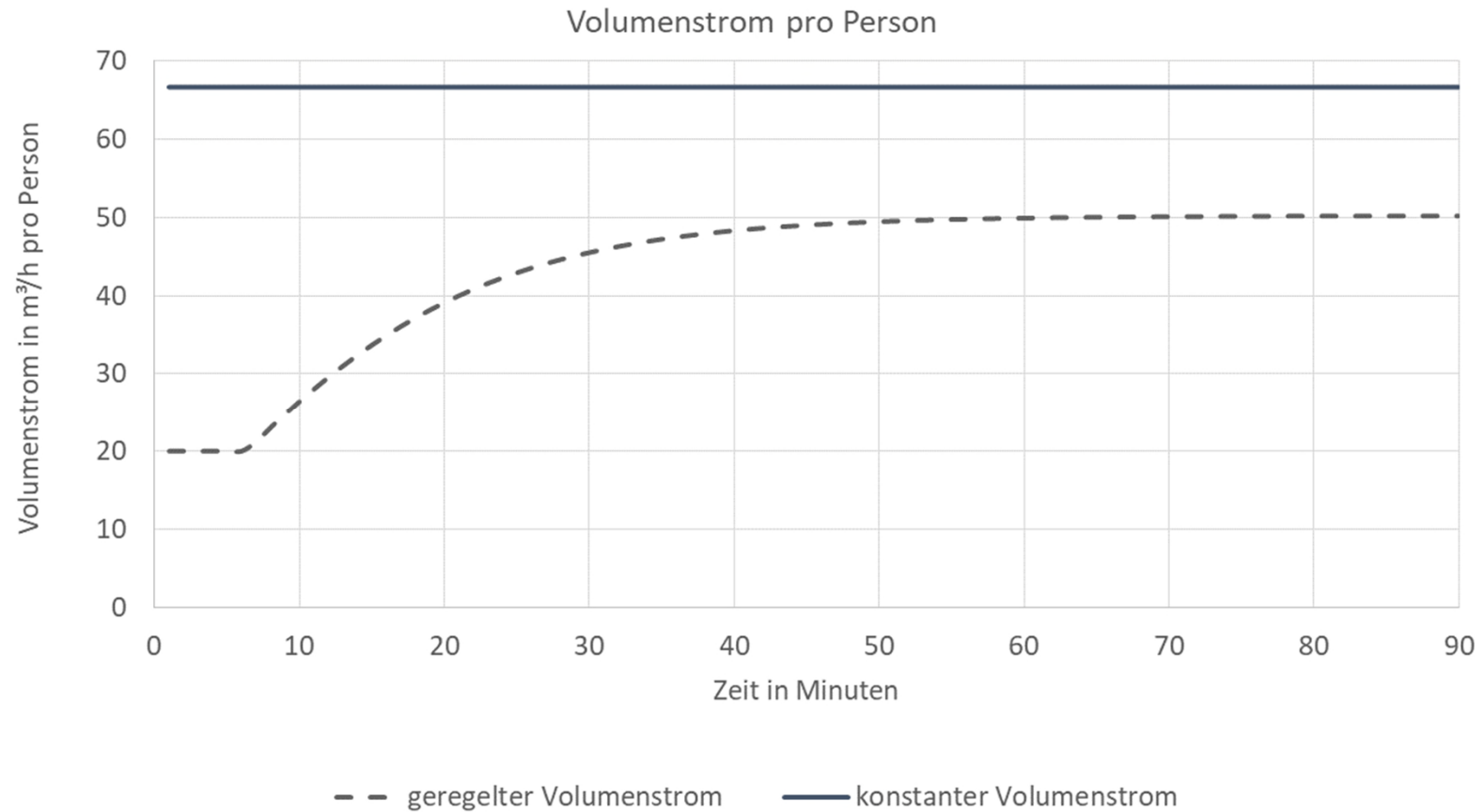
— Partikelinkorporation pro Mensch netto ohne LW

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

Rahmenbedingungen wie zuvor



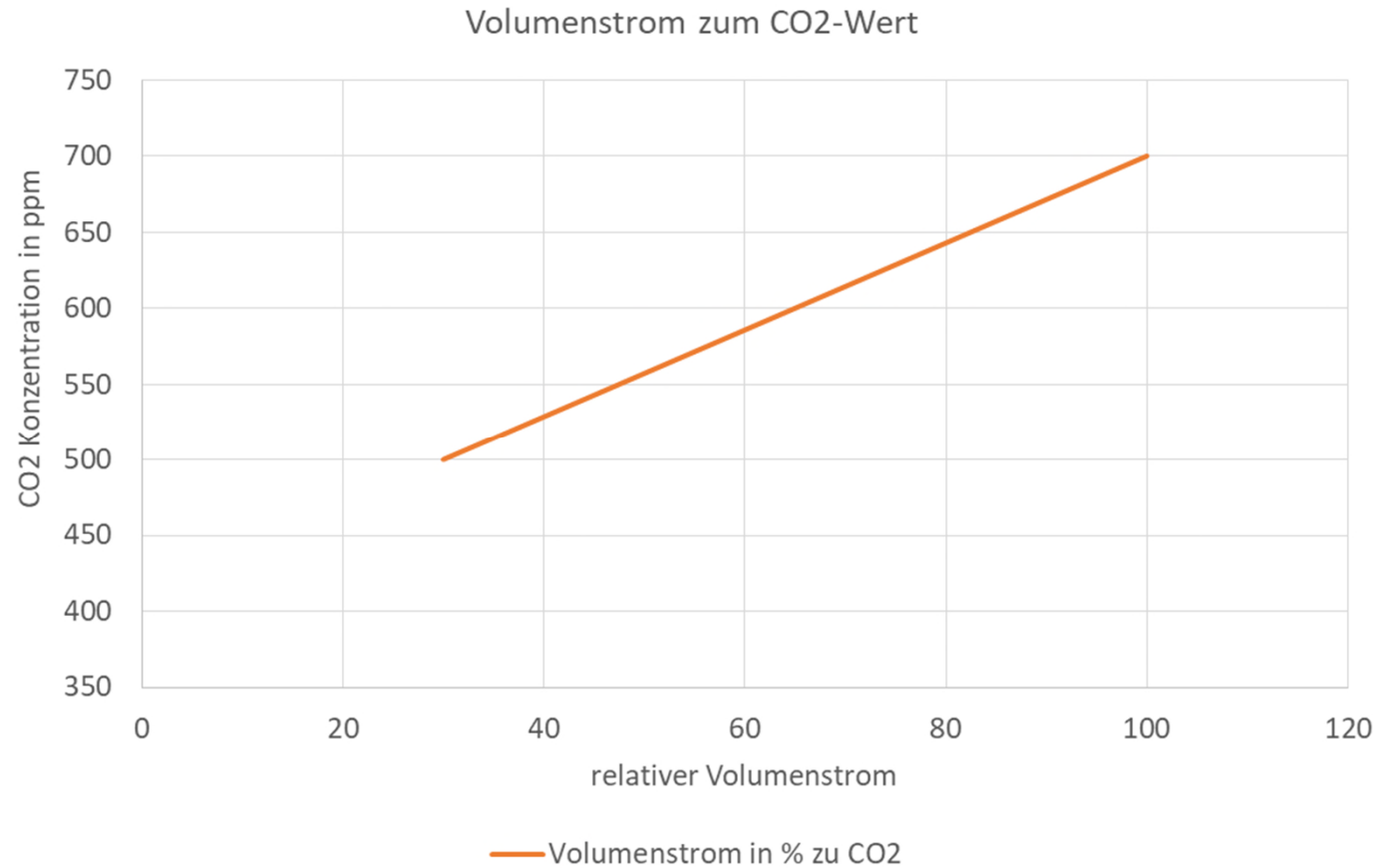
## Virenfreie Luftmenge pro Person (halbe Belegung)



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

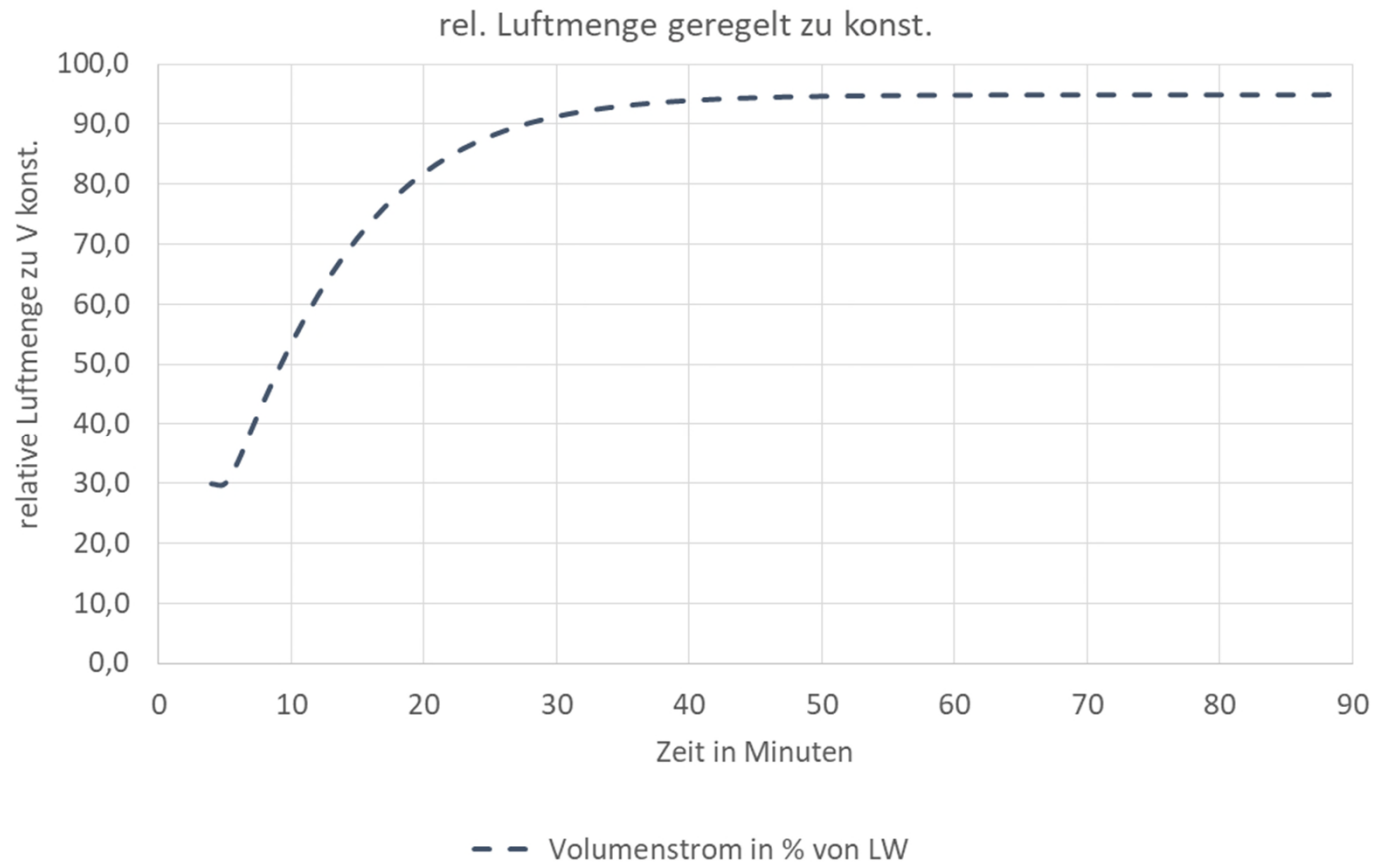
Rahmenbedingungen wie zuvor - Kennlinie max. 900 ppm  $\text{CO}_2$

## CO<sub>2</sub>-Regelung der Anlage (Anpassung halbe Belegung)



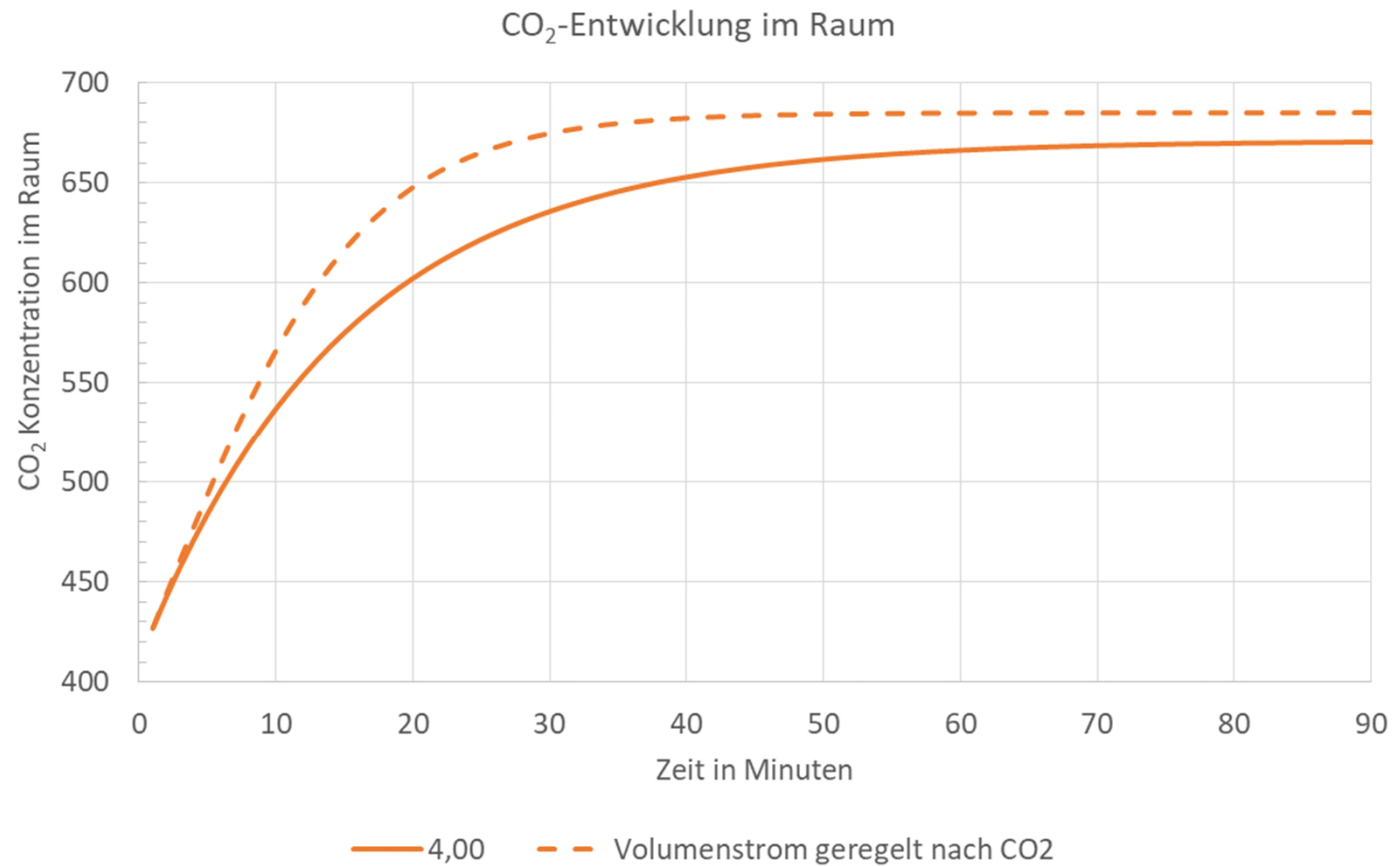
Regler Kennlinie CO<sub>2</sub> zum Volumenstrom

## CO<sub>2</sub>-Regelung der Anlage (halbe Belegung)



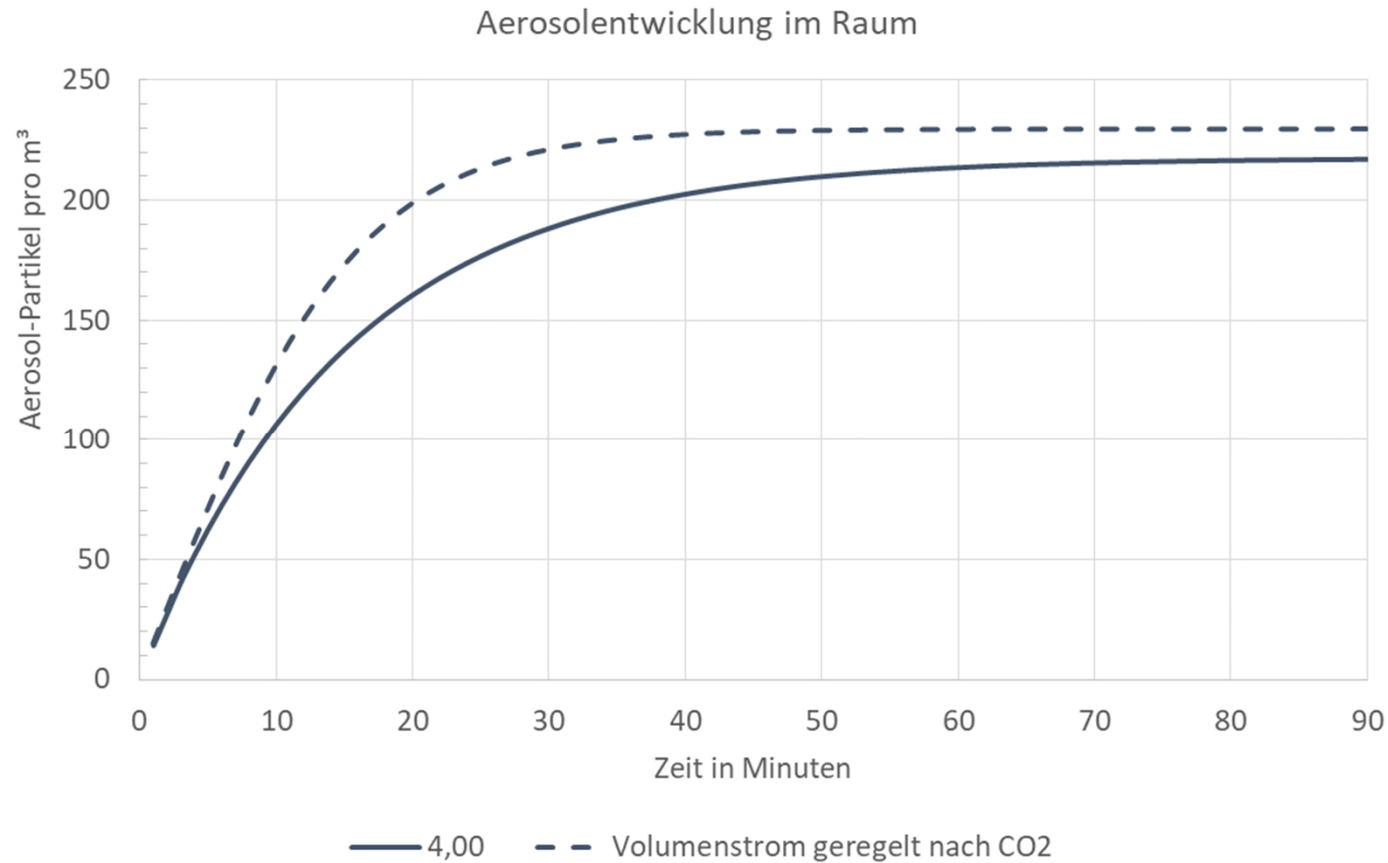
Volumenstrom Kennlinie

## CO<sub>2</sub>-Entwicklung im Raum (halbe Belegung)



**12 Personen** mit 18 l/h CO<sub>2</sub>-Produktion (Raumvolumen 200 m<sup>3</sup>) mit RLT-Anlage mit LW = 4 h<sup>-1</sup>

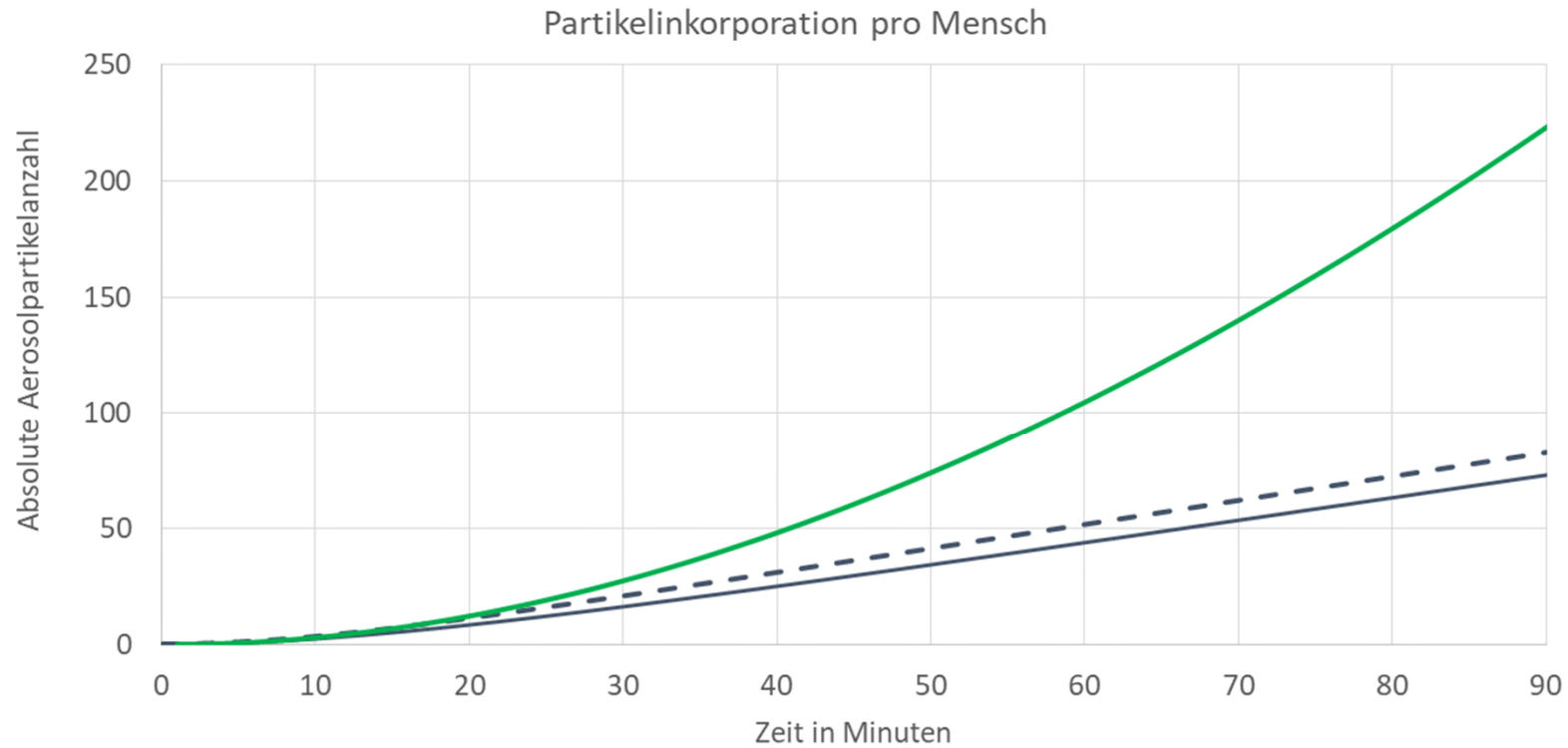
## Partikelentwicklung (halbe Belegung)



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

Rahmenbedingungen wie zuvor

## Partikelinkorporation (halbe Belegung)



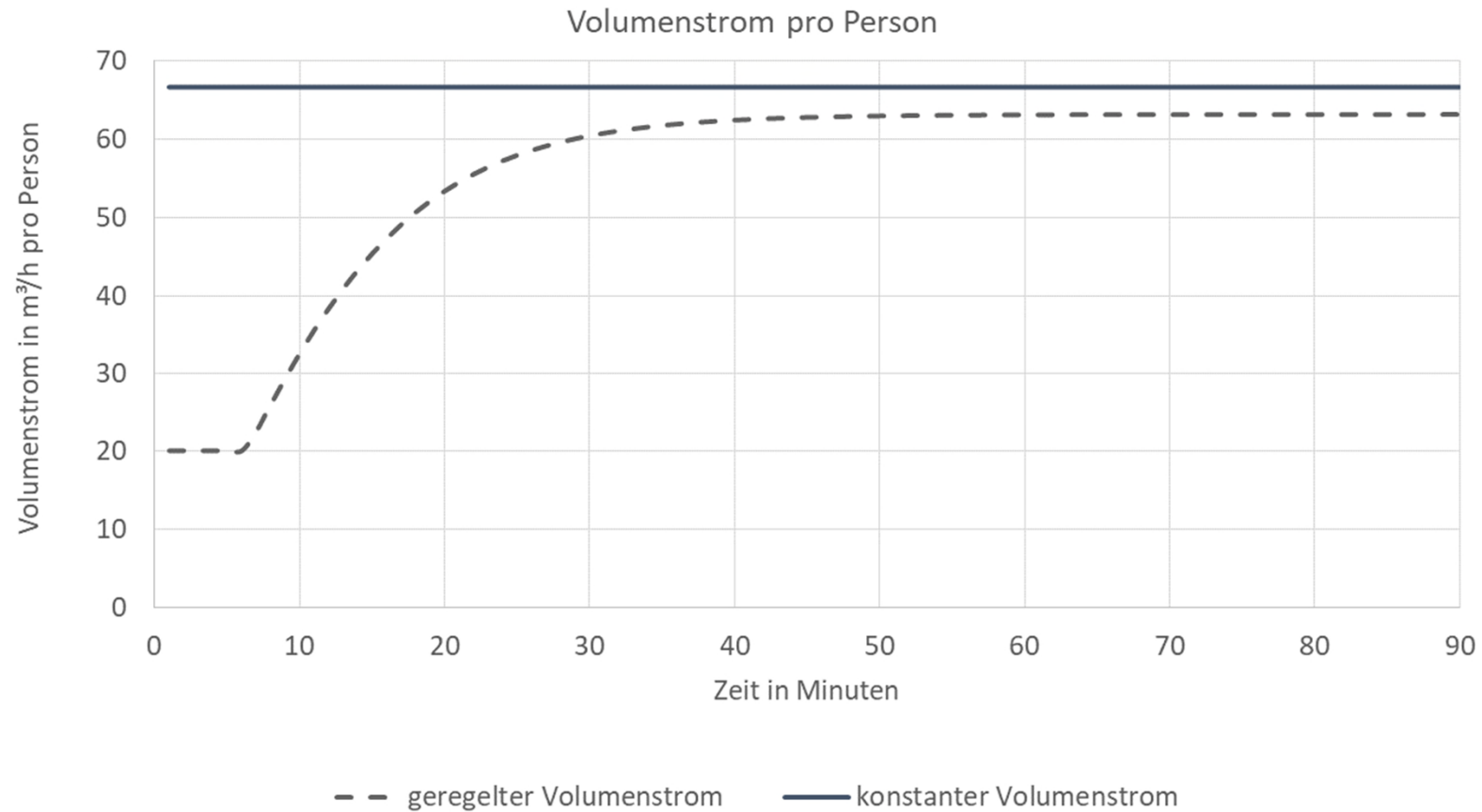
--- Partikelinkorporation pro Mensch LW geregelt    — Partikelinkorporation pro Mensch LW konstant

— 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  $\text{CO}_2$

## CO<sub>2</sub>-Regelung vs. Aerosolpartikelbelastung

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration korreliert nicht zwangsläufig mit der Aerosolbelastung, da die **Anzahl der CO<sub>2</sub>-produzierenden Personen nicht proportional zur Anzahl der Infizierten** ist.

### Vorteil der Regelung

Energieeffizienz

### Nachteil

Die CO<sub>2</sub>-Regelung kann das Infektionsrisiko prinzipiell erhöhen.

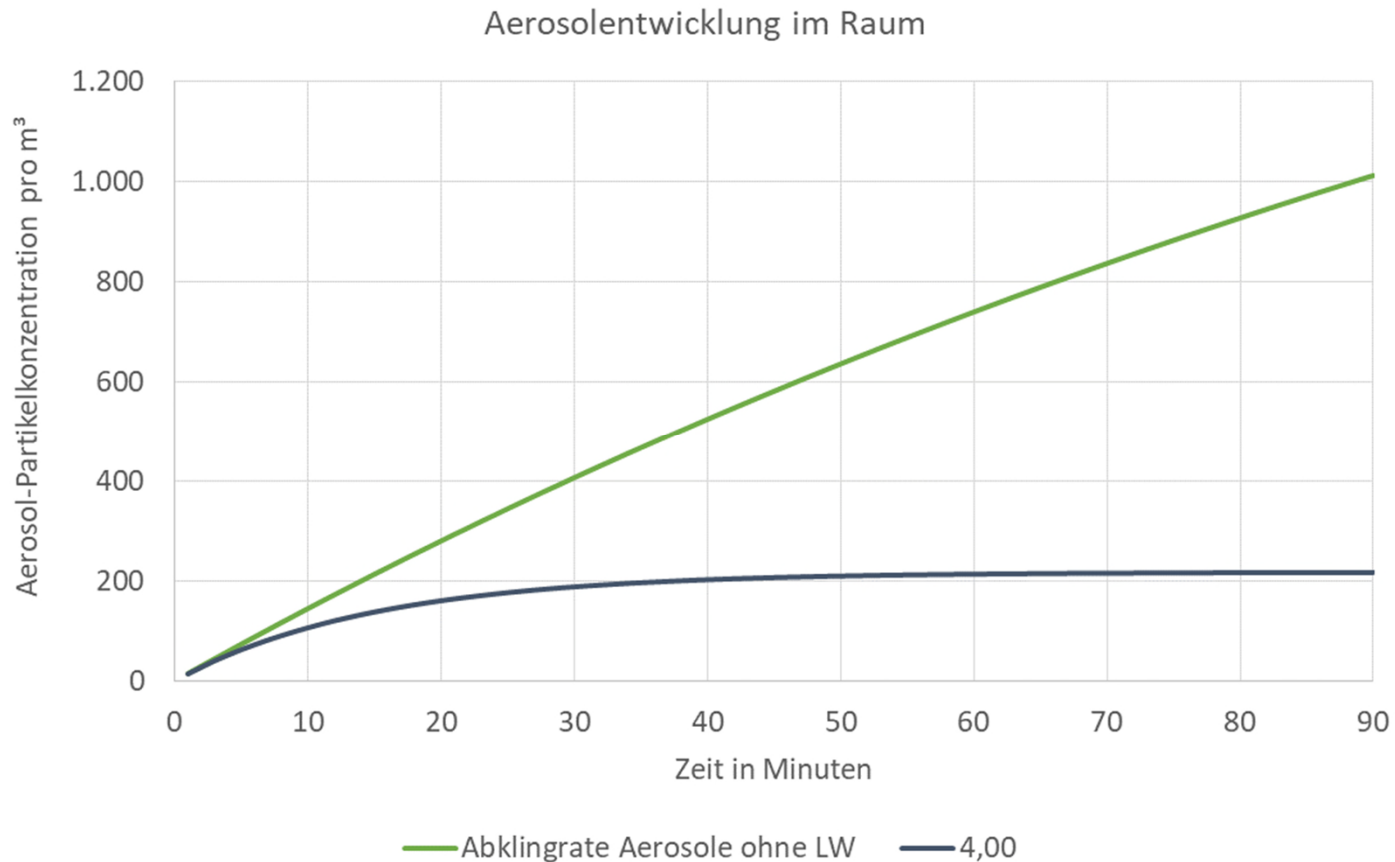
### Vorschlag

Bei bekannten Belegungsänderungen (z. B. Wechselunterricht) **adaptive Sollwertverschiebung der CO<sub>2</sub>-Kennlinie** (mit deutlich geringerer Risikoerhöhung) bzw. **Senkung der CO<sub>2</sub>-Kennlinie** in Abhängigkeit der **niedrigsten zu erwartenden Belegung**.

**Alternativ: CO<sub>2</sub>-Regelung AUS**



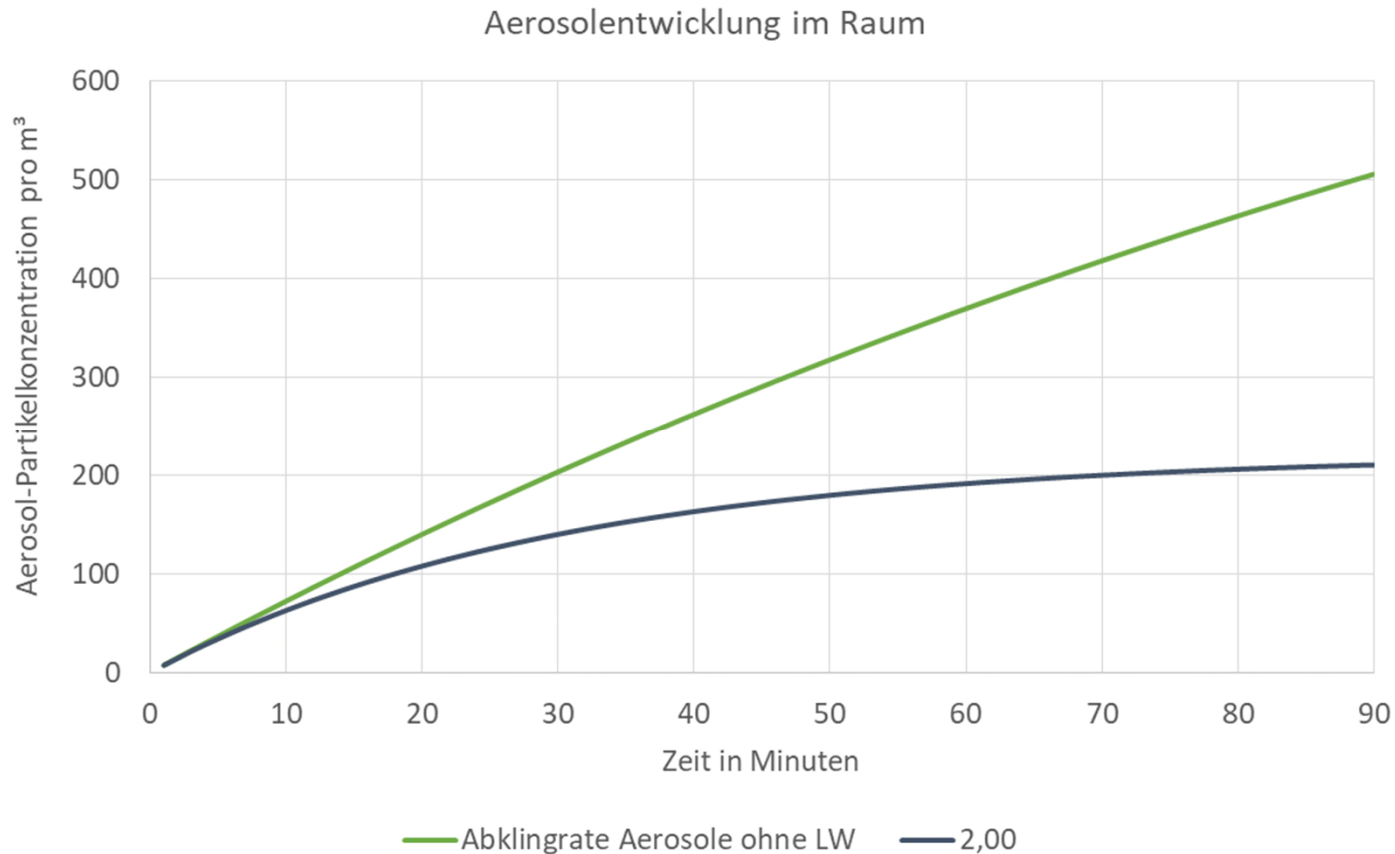
## Partikelentwicklung im Raum mit 200 m<sup>3</sup> mit LW = 4 h<sup>-1</sup>



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

1 Person spricht mit 100 Aerosolpartikeln pro Sekunde (Emission bei einem Raumvolumen von 200 m<sup>3</sup>)

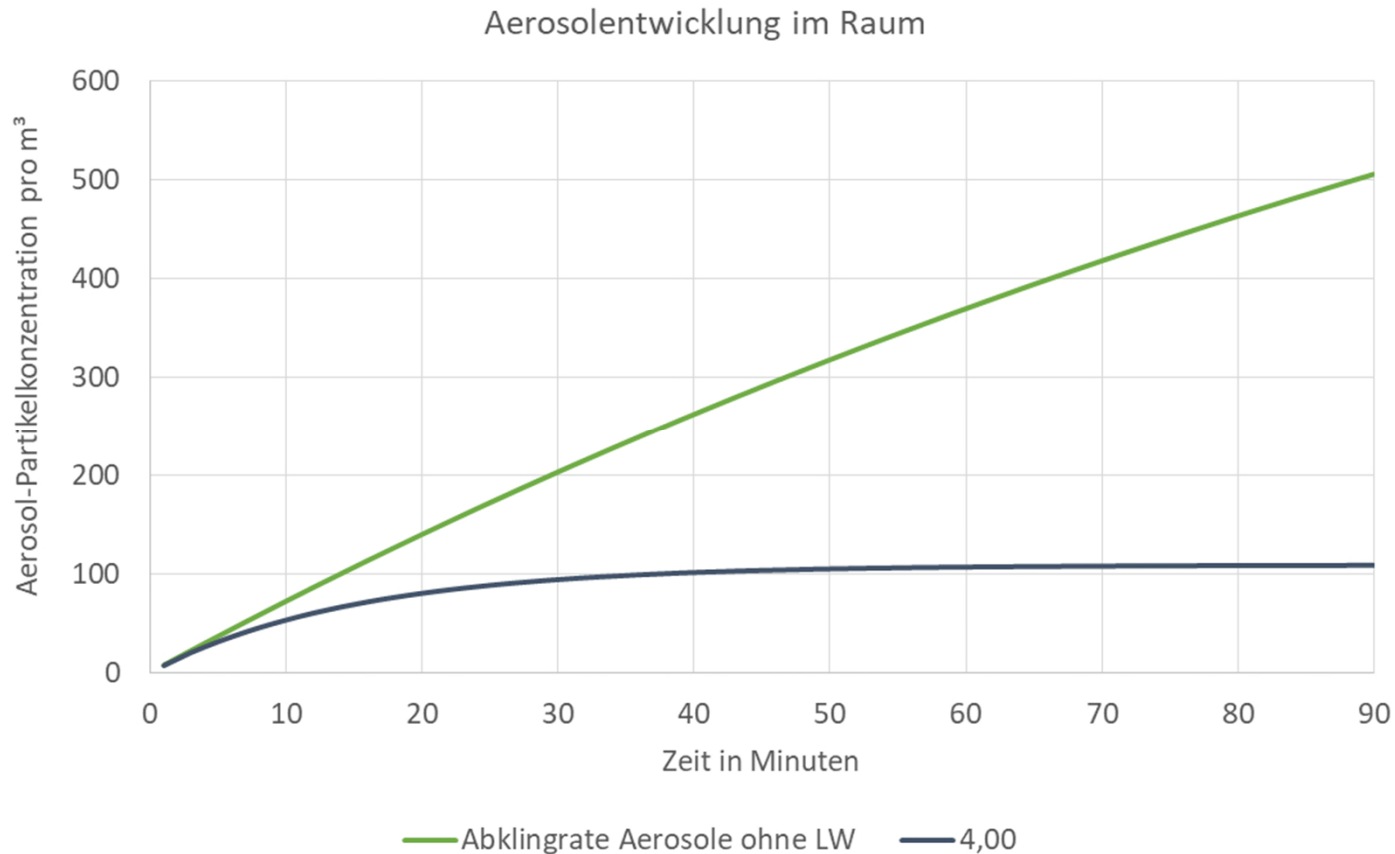
## Partikelentwicklung im Raum mit 400 m<sup>3</sup> mit LW = 2 h<sup>-1</sup>



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

1 Person spricht mit 100 Aerosolpartikeln pro Sekunde (Emission bei einem Raumvolumen von 400 m<sup>3</sup>)

## Partikelentwicklung im Raum mit 400 m<sup>3</sup> mit LW = 4 h<sup>-1</sup>



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

1 Person spricht mit 100 Aerosolpartikeln pro Sekunde (Emission bei einem Raumvolumen von 400 m<sup>3</sup>)

## 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

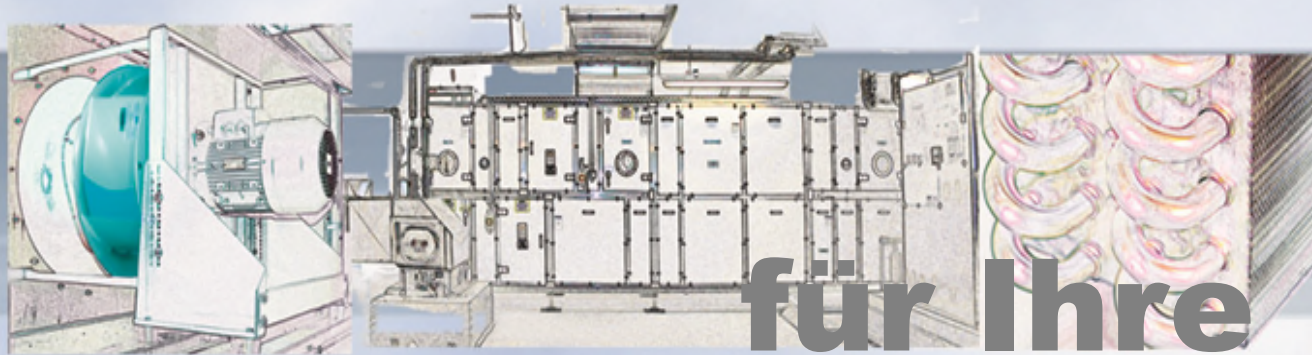
**Luftmenge** pro erwartete **Anzahl von Infizierten** (meist  $k = 1$ ).

### 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