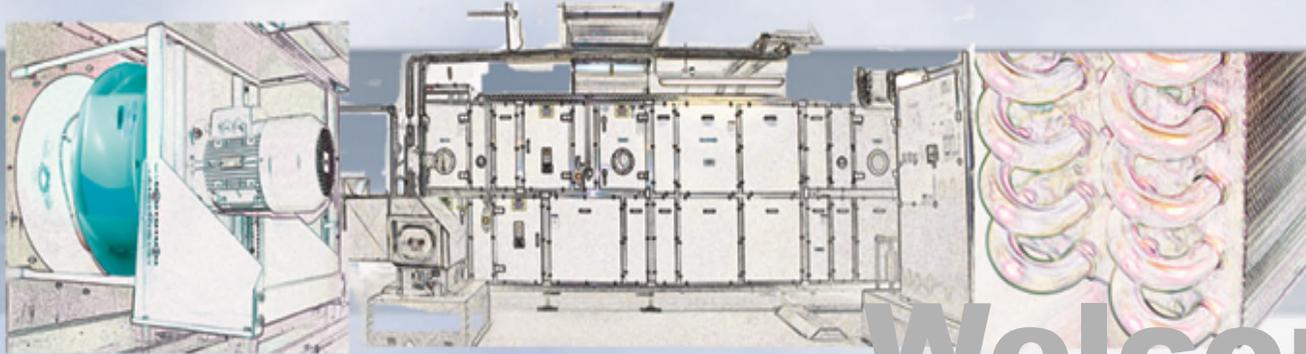


# Willkommen



# Bienvenue

# Welcome

## Luftmengenfestlegung auf Basis der Schadstoffbelastung

Festlegung auf Basis der CO<sub>2</sub>-Belastung oder der Partikelbelastung (z. B. Viren) (generell Gefahrstoffe)

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

## 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>]

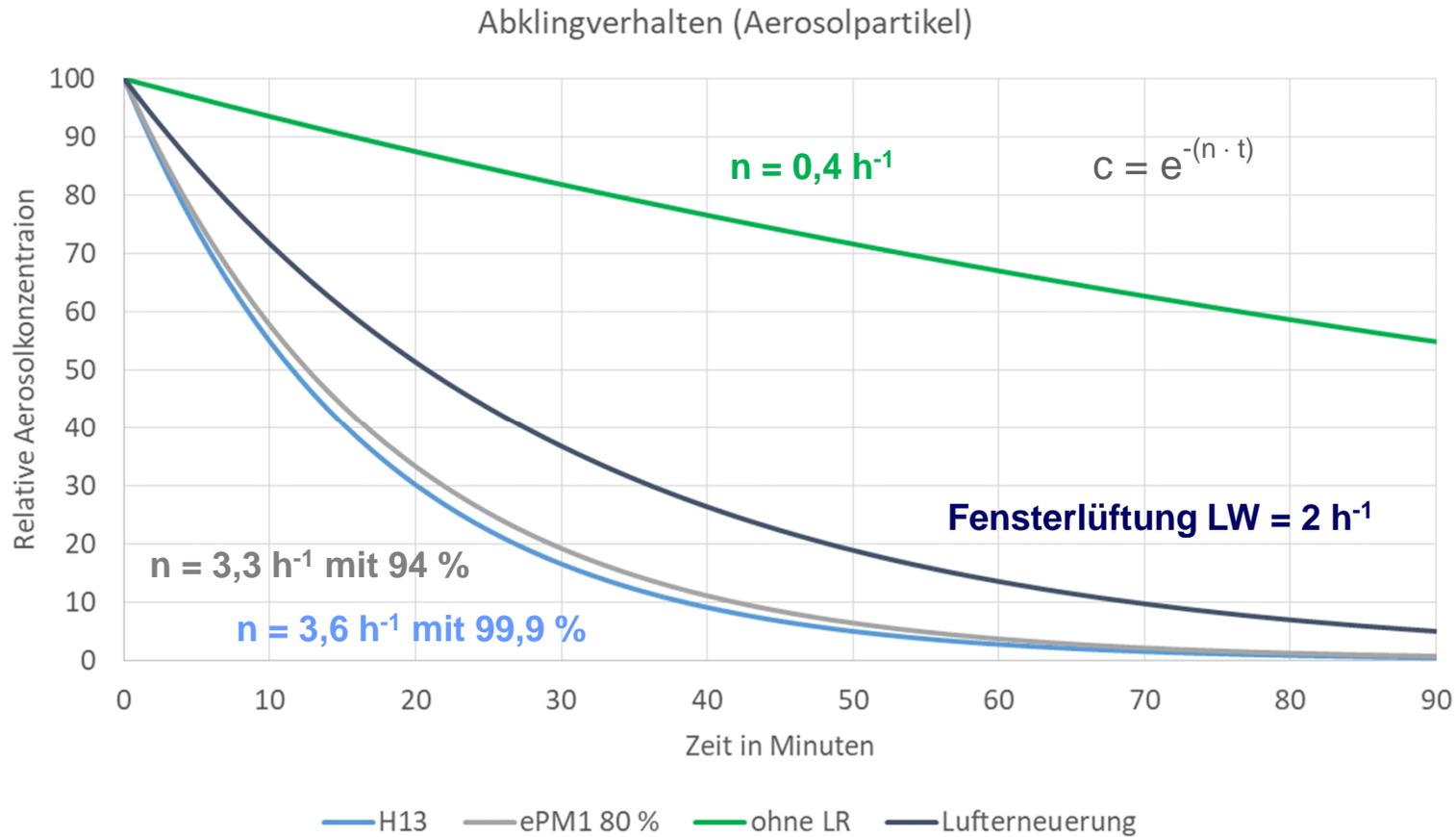
$\varepsilon_V$  **Lüftungseffektivität**

## Lüftungseffektivität

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

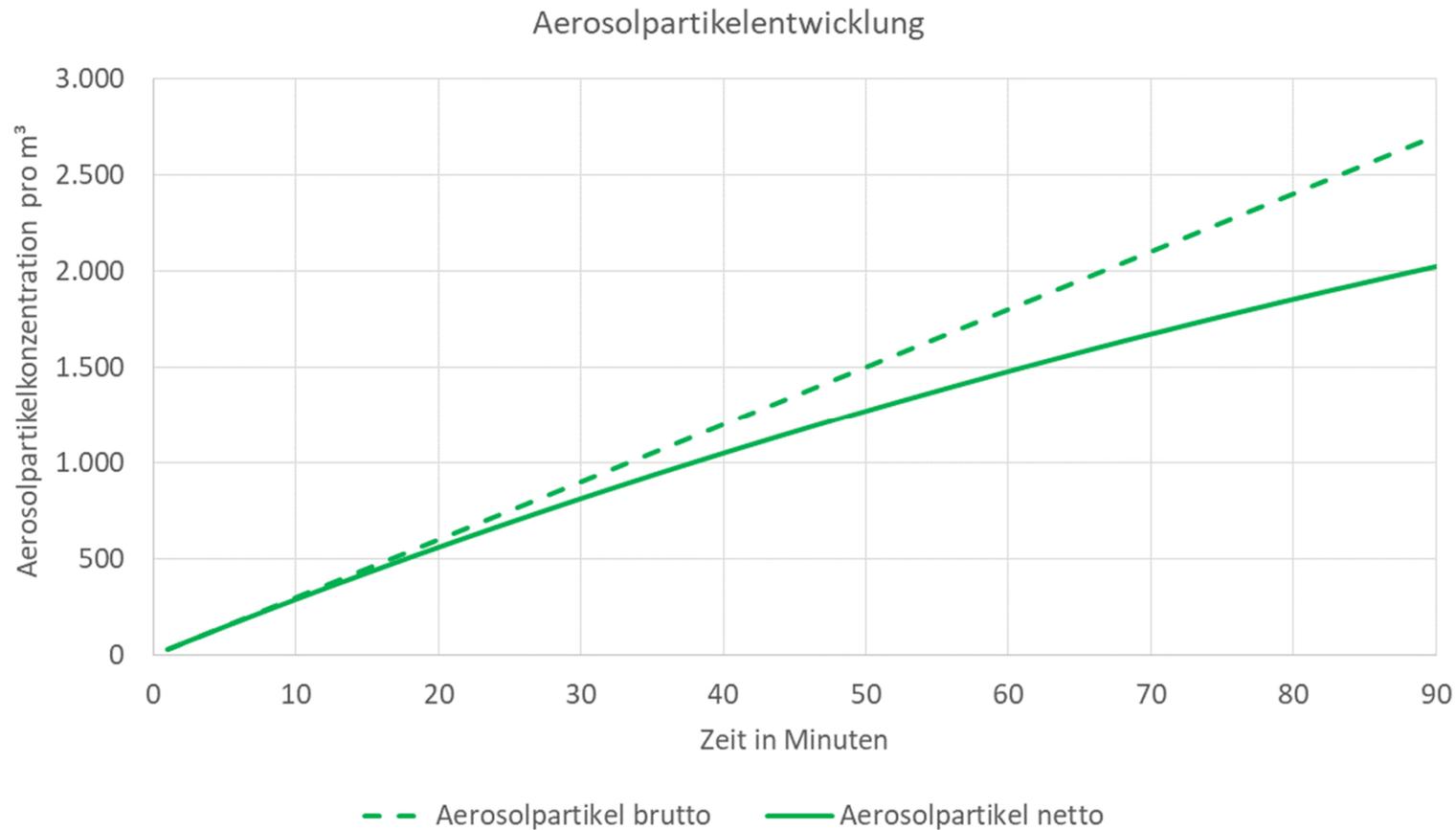
- $\varepsilon_V$  Lüftungseffektivität (1 = ideale **Mischlüftung**  
> 1 **Quelllüftung** und < 1 Kurzschlusslüftung)
- $c_E$  Verunreinigungskonzentration Abluft [mg/m<sup>3</sup>]
- $c_S$  Verunreinigungskonzentration Zuluft [mg/m<sup>3</sup>]
- $c_I$  Verunreinigungskonzentration Atemluft [mg/m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

## 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

$$c_t = [ (c_0 - c_a) - q / (n \cdot V) ] \cdot e^{-n \cdot t} + q / (n \cdot V) + c_a$$

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

$c_a$  Ausgangskonzentration der Zuluft [z. B. ppm]

$c_0$  Startkonzentration im Raum [z. B. ppm]

**n** **Luftwechsel je h** [ $h^{-1}$ ]

**q** **Abgabe der Personen** z. B.  $CO_2$  [z. B. l/h]

**V** **Raumvolumen** [ $m^3$ ]

## Konzentrationsänderung mit $c_0 = c_a$

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

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

$c_a$  Ausgangskonzentration der Zuluft [z. B. ppm]

$n$  **Luftwechsel je h** [ $h^{-1}$ ]

$q$  **Abgabe der Personen** z. B.  $CO_2$  [z. B. l/h]

$V$  **Raumvolumen** [ $m^3$ ]

## Konzentrationsänderung mit $c_0 = c_a$

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

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

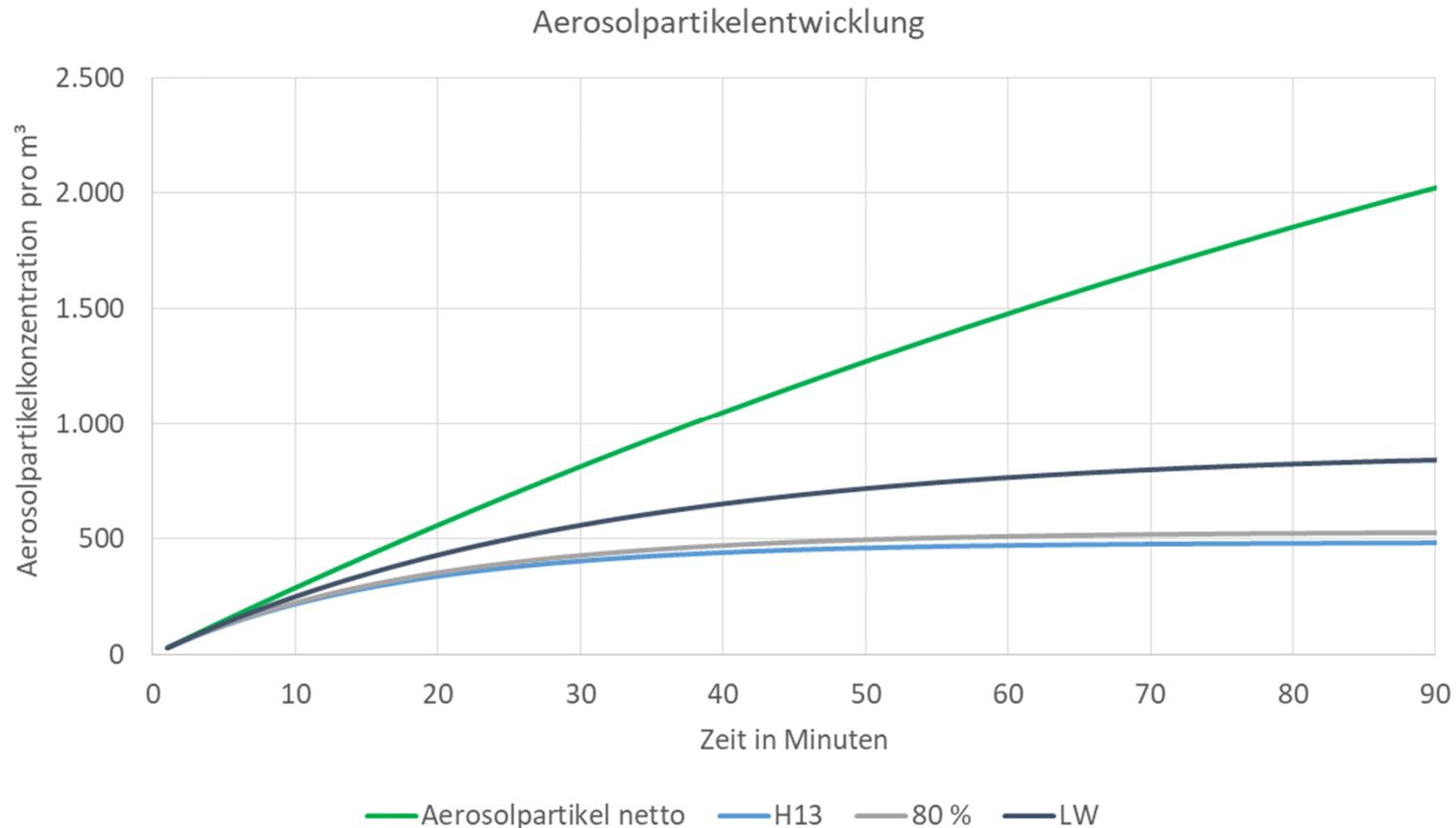
$c_a$  Ausgangskonzentration [z. B. ppm]

$n$  **Luftwechsel je h** [ $h^{-1}$ ]

$q$  **Abgabe der Personen** z. B.  $CO_2$  [z. B. l/h]

$V$  **Raumvolumen** [ $m^3$ ]

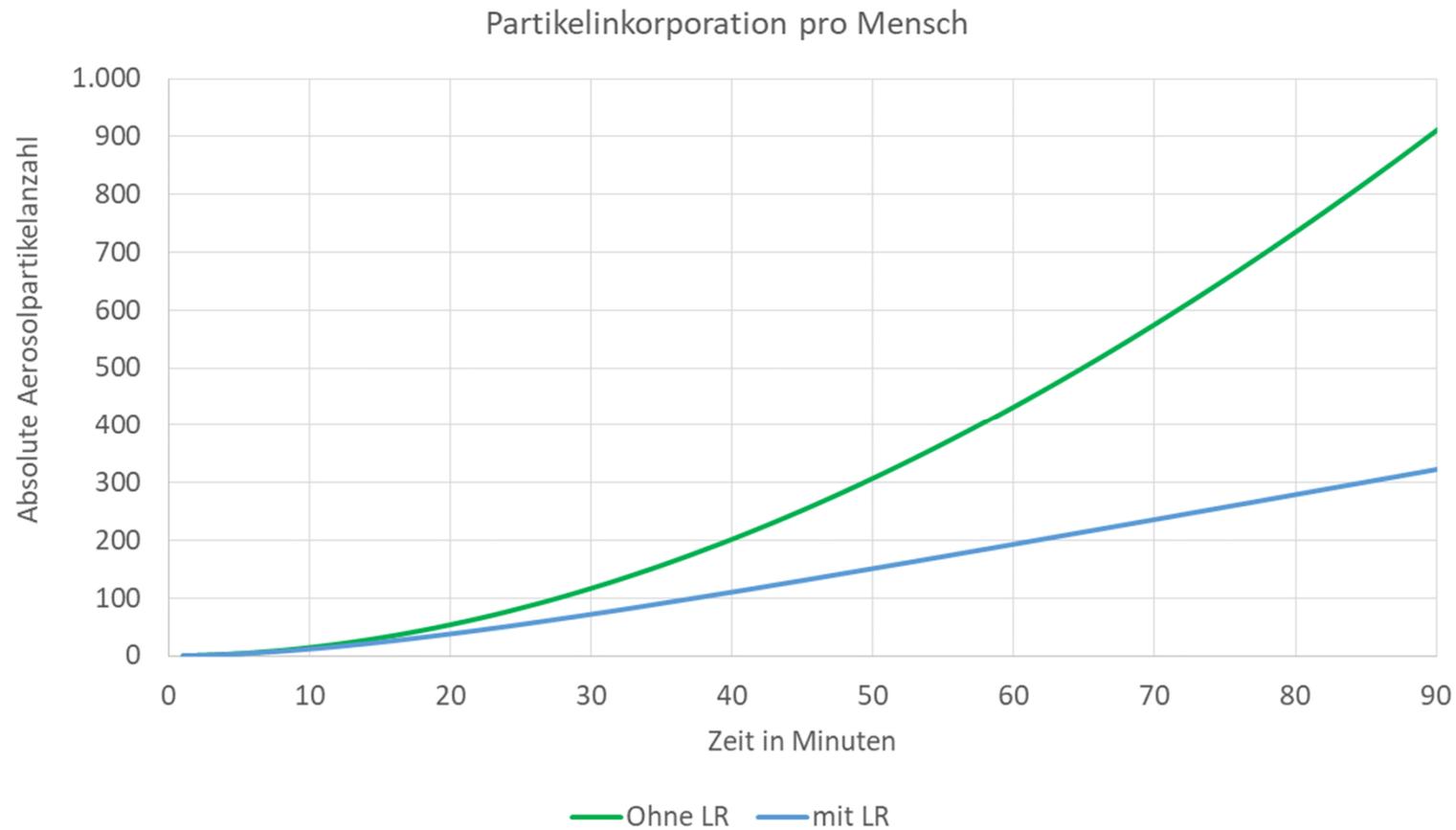
## Partikelentwicklung mit einer infizierten Person



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**)

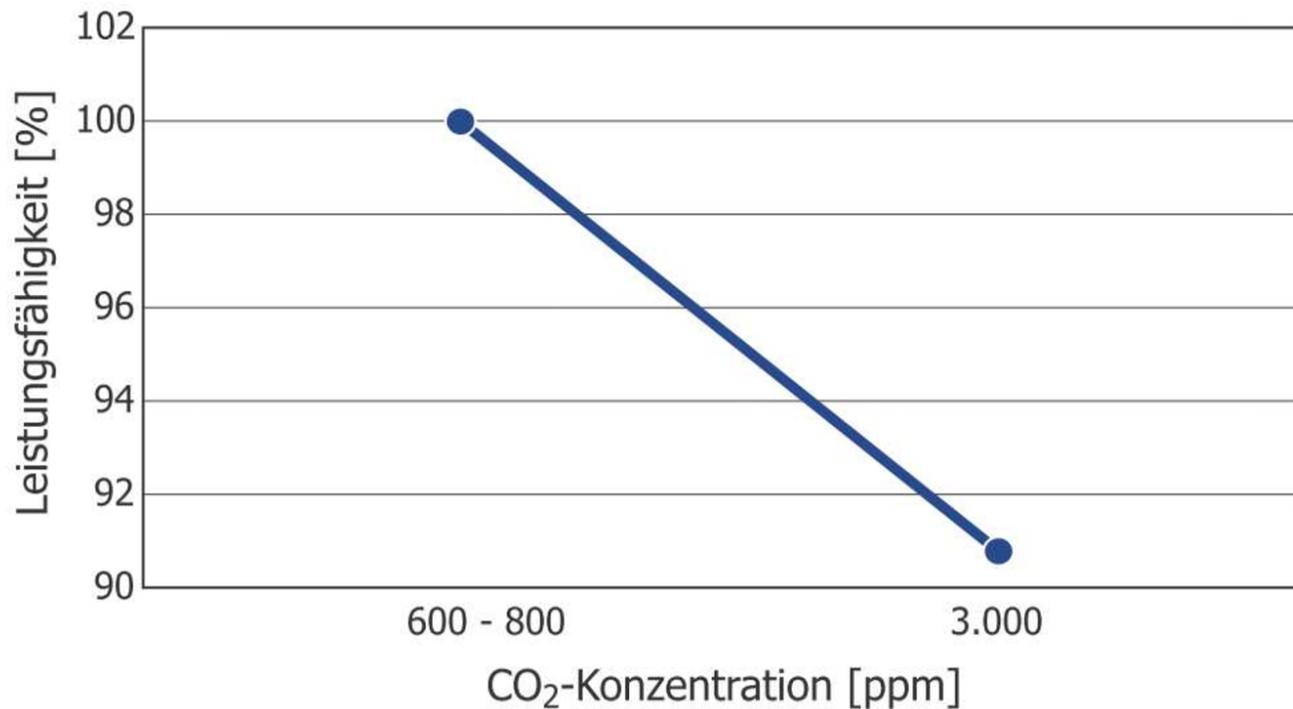
## Partikelinkorporation



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**)

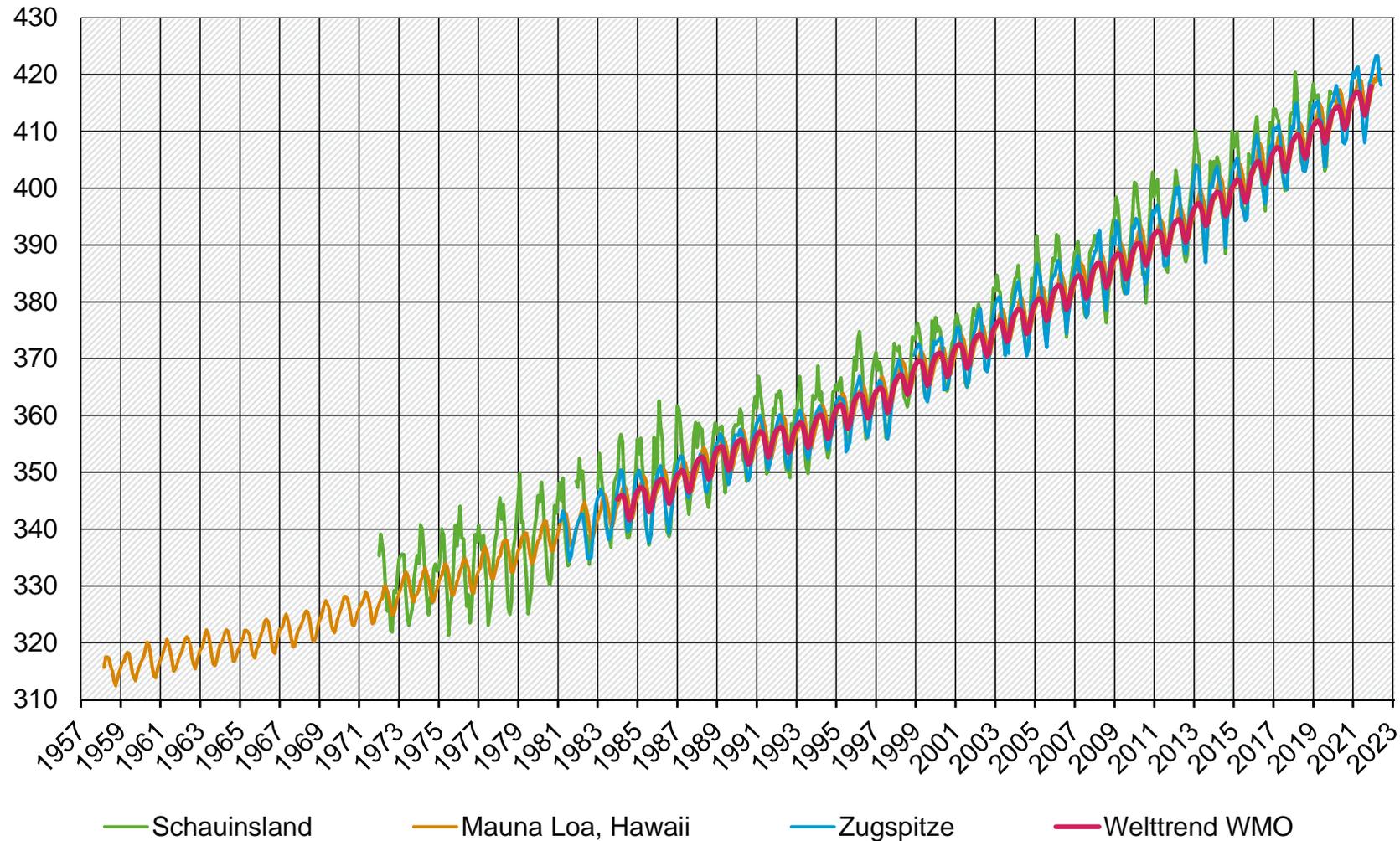
## CO<sub>2</sub>-Einfluss auf die kognitive Leistungsfähigkeit



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

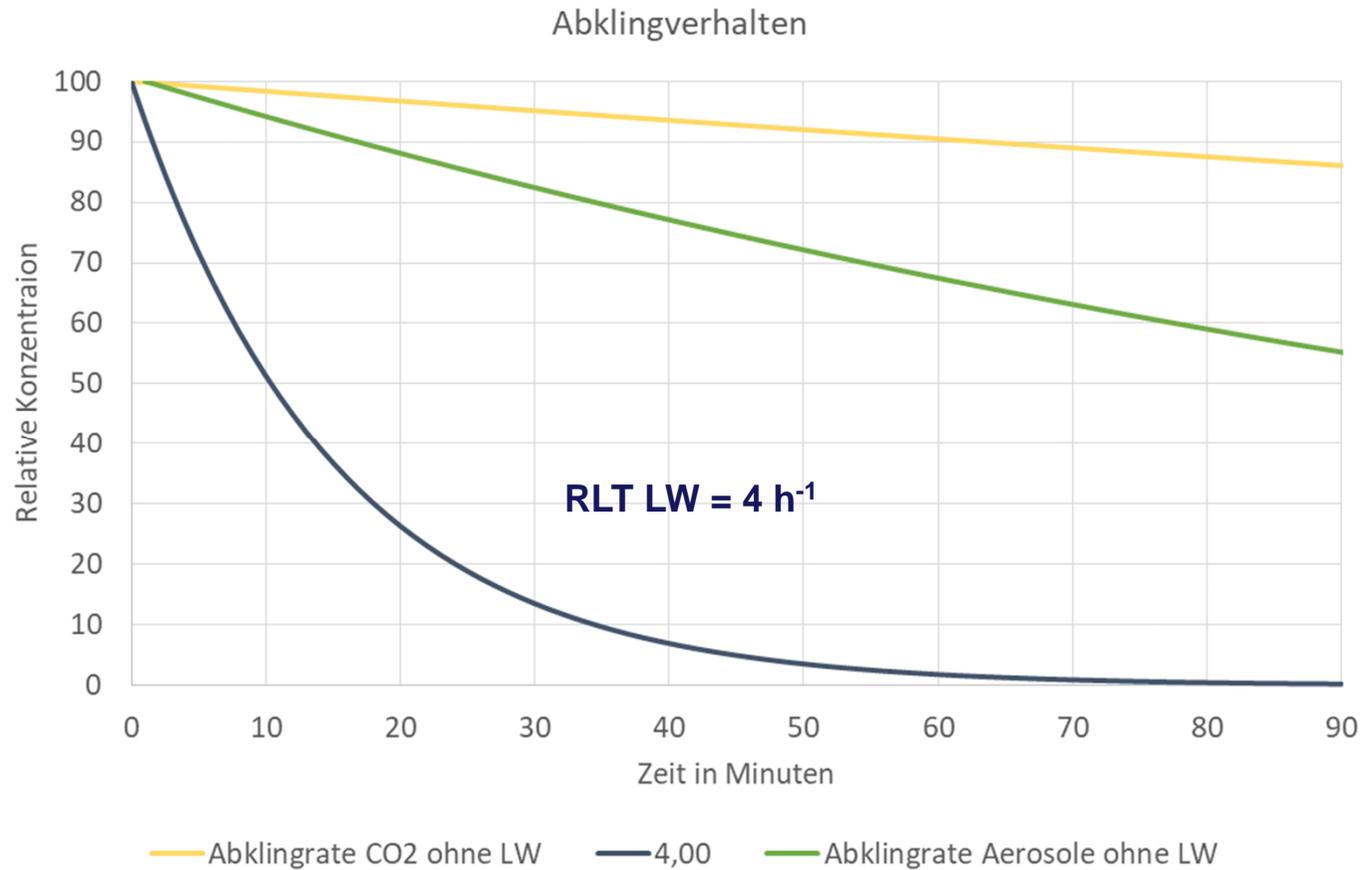
# CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre

Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre (Monatsmittelwerte) in ppm



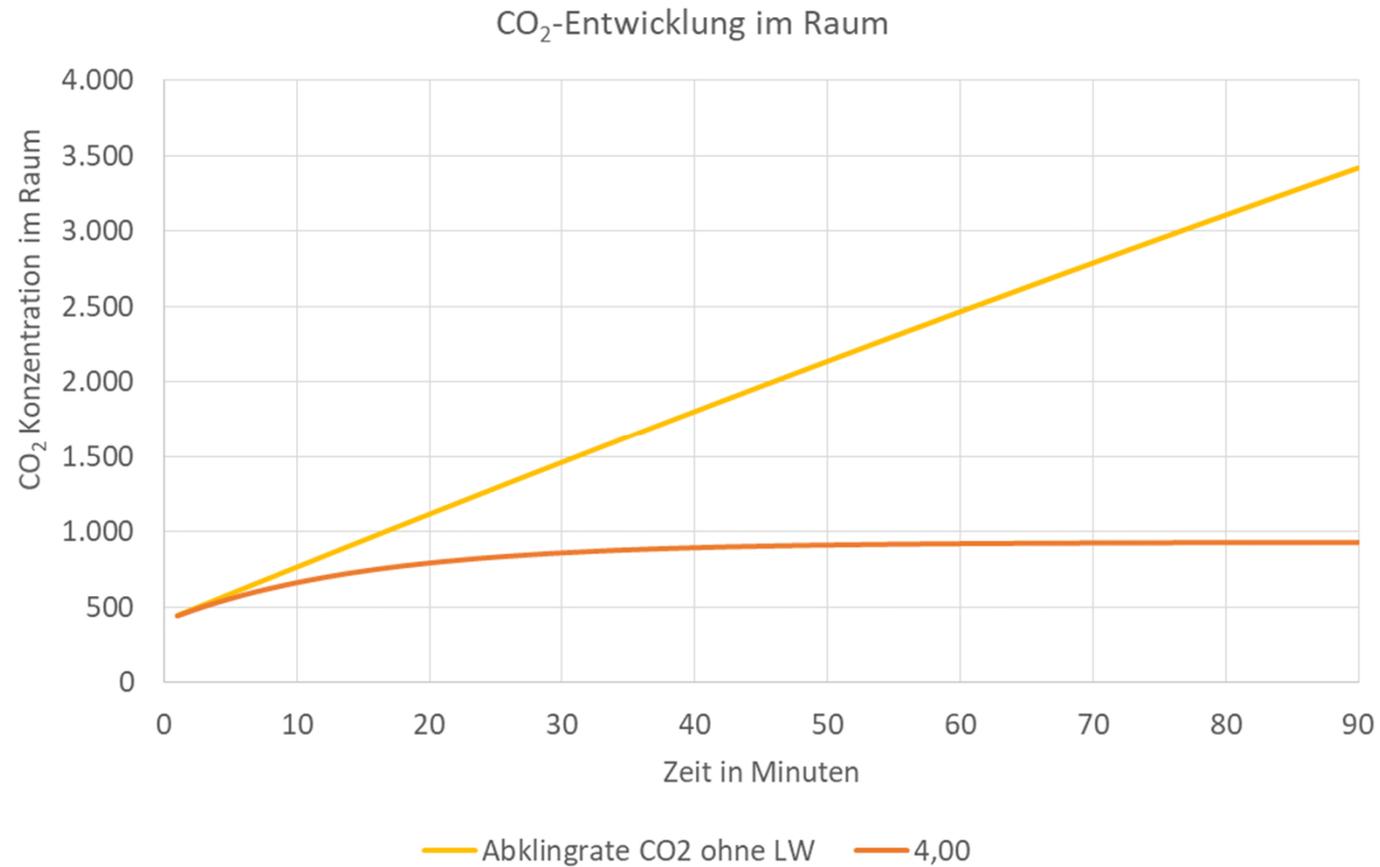
Quelle: Umweltbundesamt (Schauinsland, Zugspitze), NOAA Global Monitoring Division and Scripps Institution of Oceanography (Mauna Loa, Hawaii), World Meteorological Organization, WDCGG (World Trend)

## Reduktion nach „Anfangsbelastung“



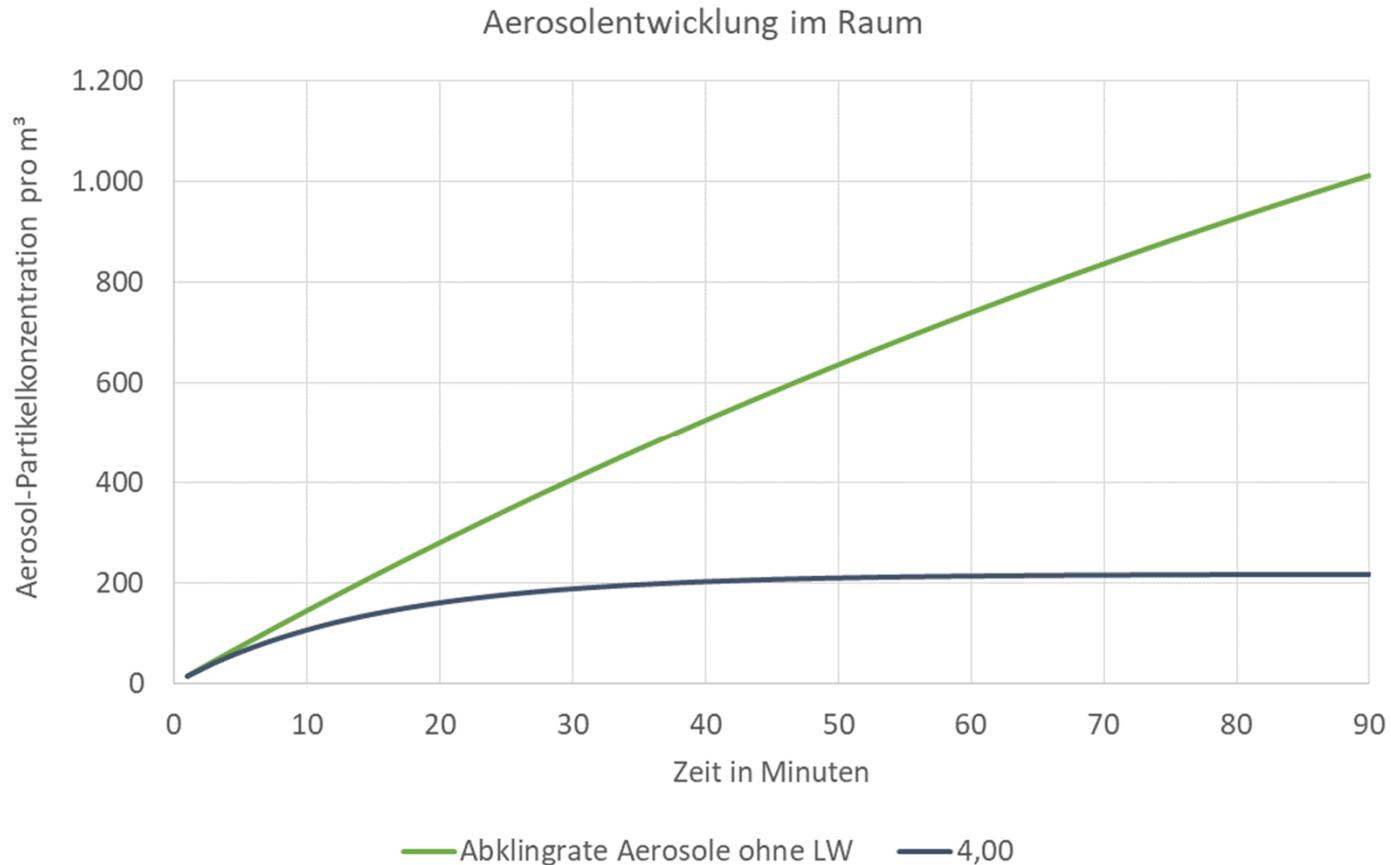
Reduktion einer Anfangskonzentration mit RLT-Anlage mit LW = 4 h<sup>-1</sup> / Abklingrate CO<sub>2</sub> 0,1 h<sup>-1</sup> / Abklingrate Partikel 0,4 h<sup>-1</sup>

## 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>**

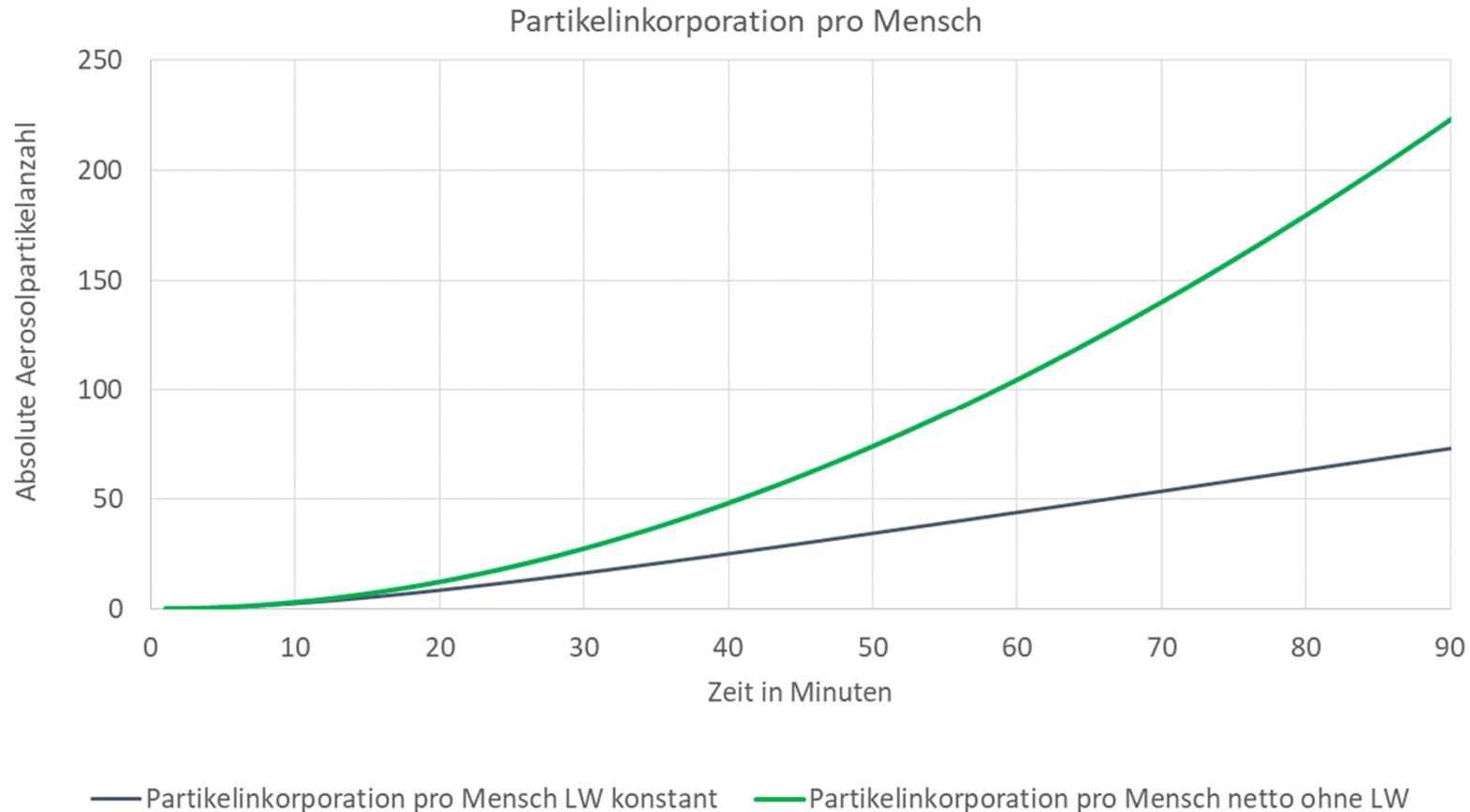
## Partikelentwicklung mit einer infizierten Person



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  $200 \text{ m}^3$ )

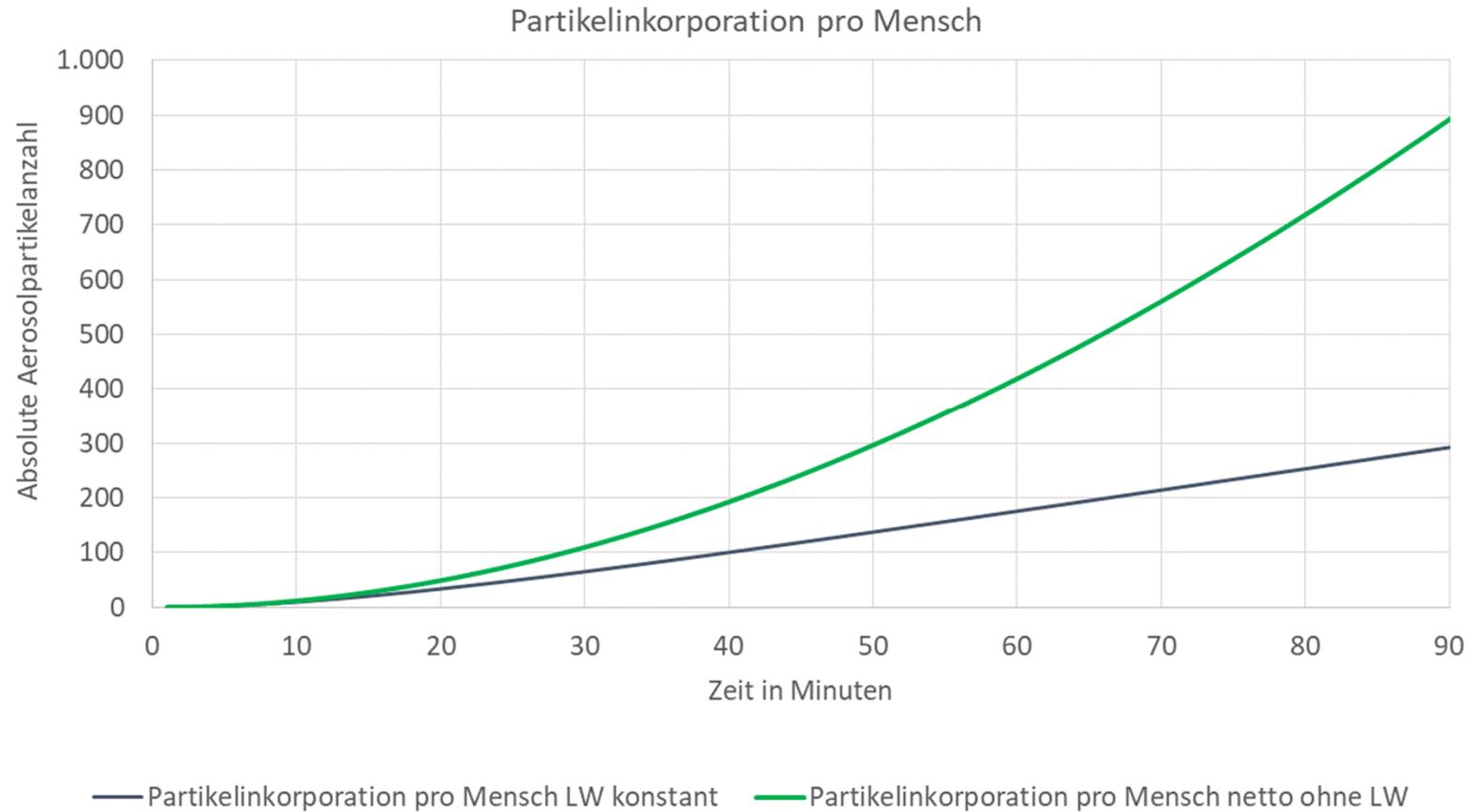
## Partikelinkorporation mit Masken



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

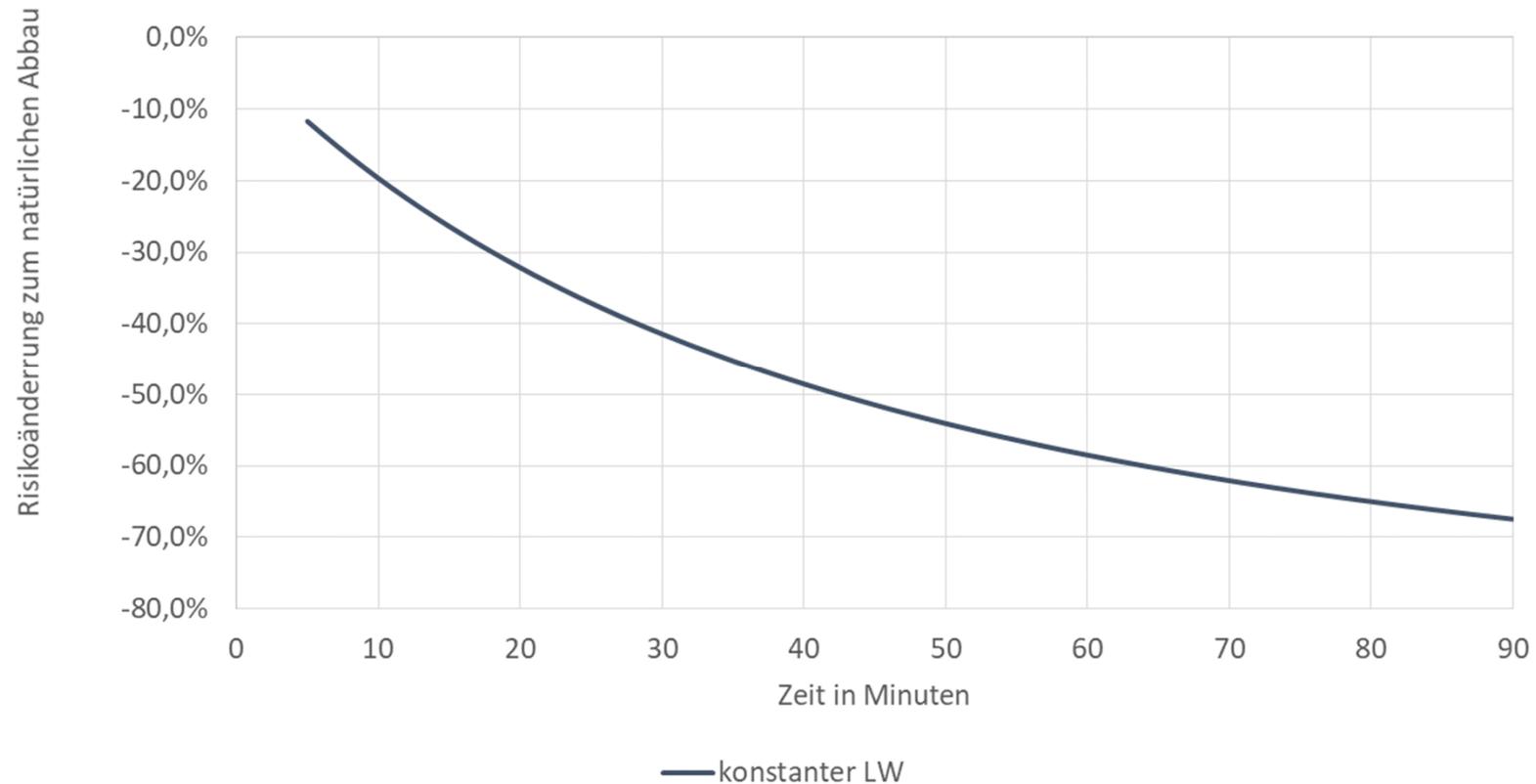


Partikelanzahl an Aerosolen **RLT-Anlage** mit **LW = 4 h<sup>-1</sup>**

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

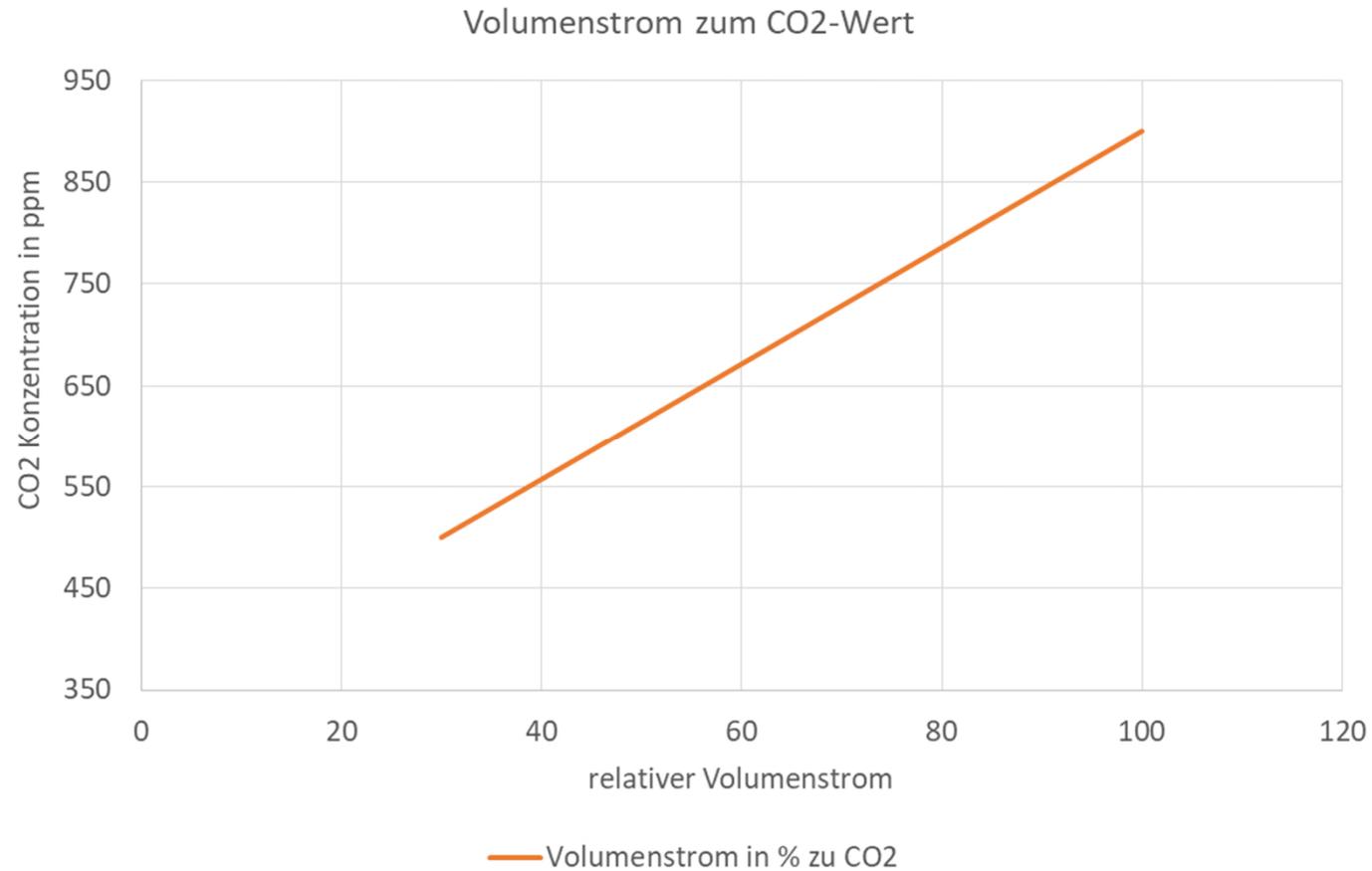
$n_R$       **Anzahl der Personen im Raum**

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 $k \geq 1$

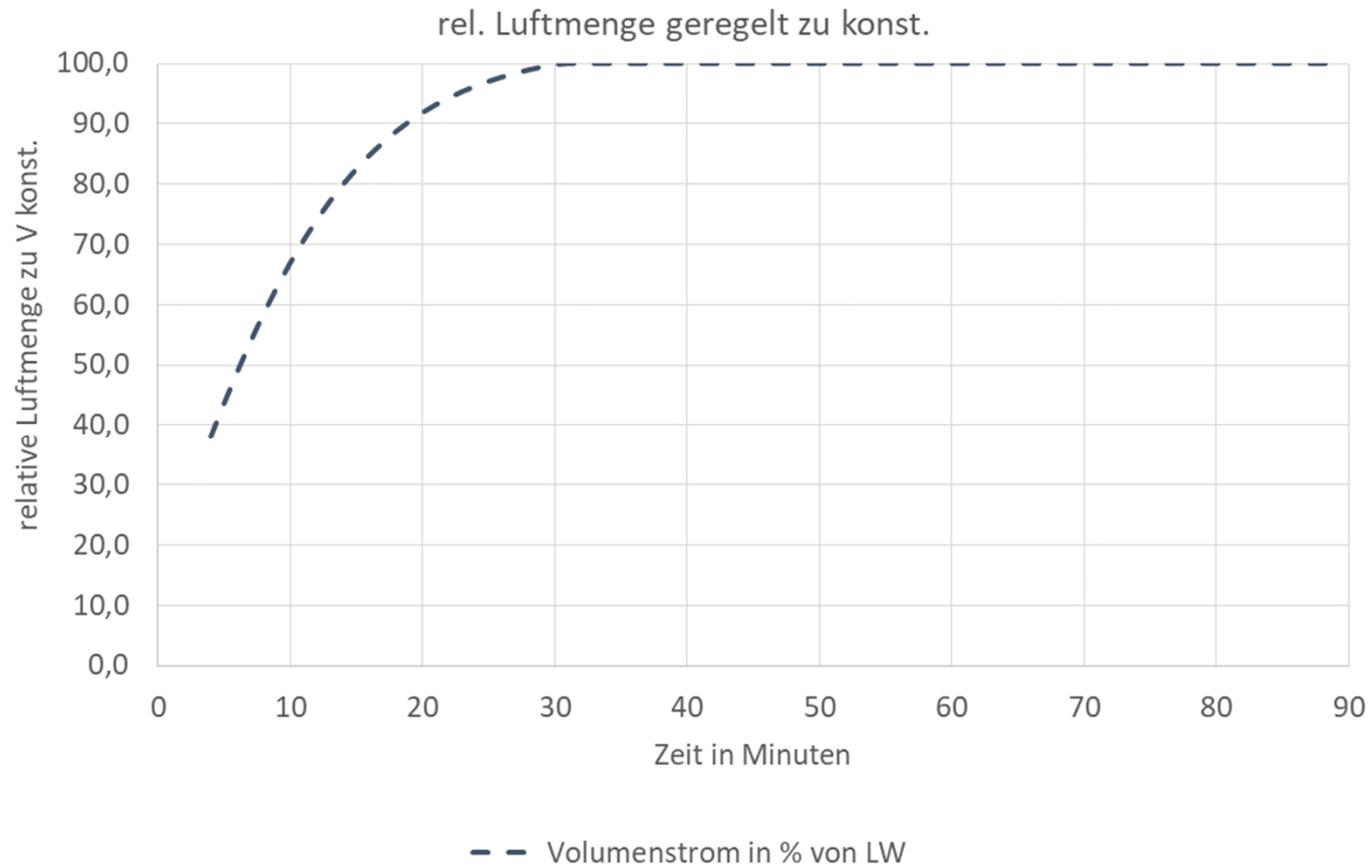
Anzahl Personen im Raum	Inzidenz				
	100	200	300	400	500
5	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%	2,5%
10	1,0%	2,0%	3,0%	3,9%	4,9%
15	1,5%	3,0%	4,4%	5,8%	7,2%
20	2,0%	3,9%	5,8%	7,7%	9,5%
25	2,5%	4,9%	7,2%	9,5%	11,8%
50	4,9%	9,5%	13,9%	18,2%	22,2%
100	9,5%	18,1%	26,0%	33,0%	39,4%
150	13,9%	25,9%	36,3%	45,2%	52,9%
250	22,1%	39,4%	52,8%	63,3%	71,4%
500	39,4%	63,2%	77,7%	86,5%	91,8%
1.000	63,2%	86,5%	95,0%	98,2%	99,3%

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



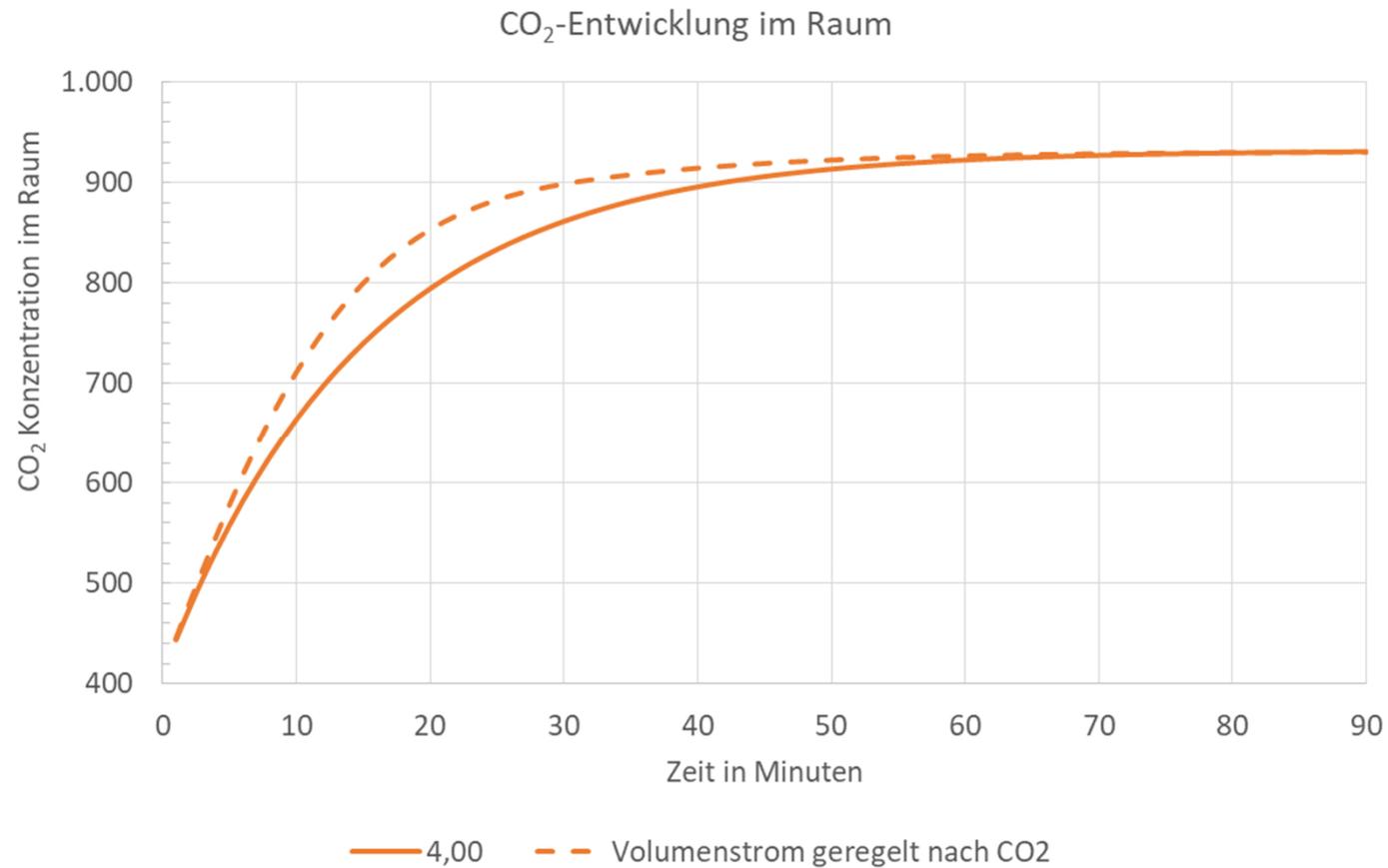
Regler Kennlinie CO<sub>2</sub> zum Volumenstrom

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



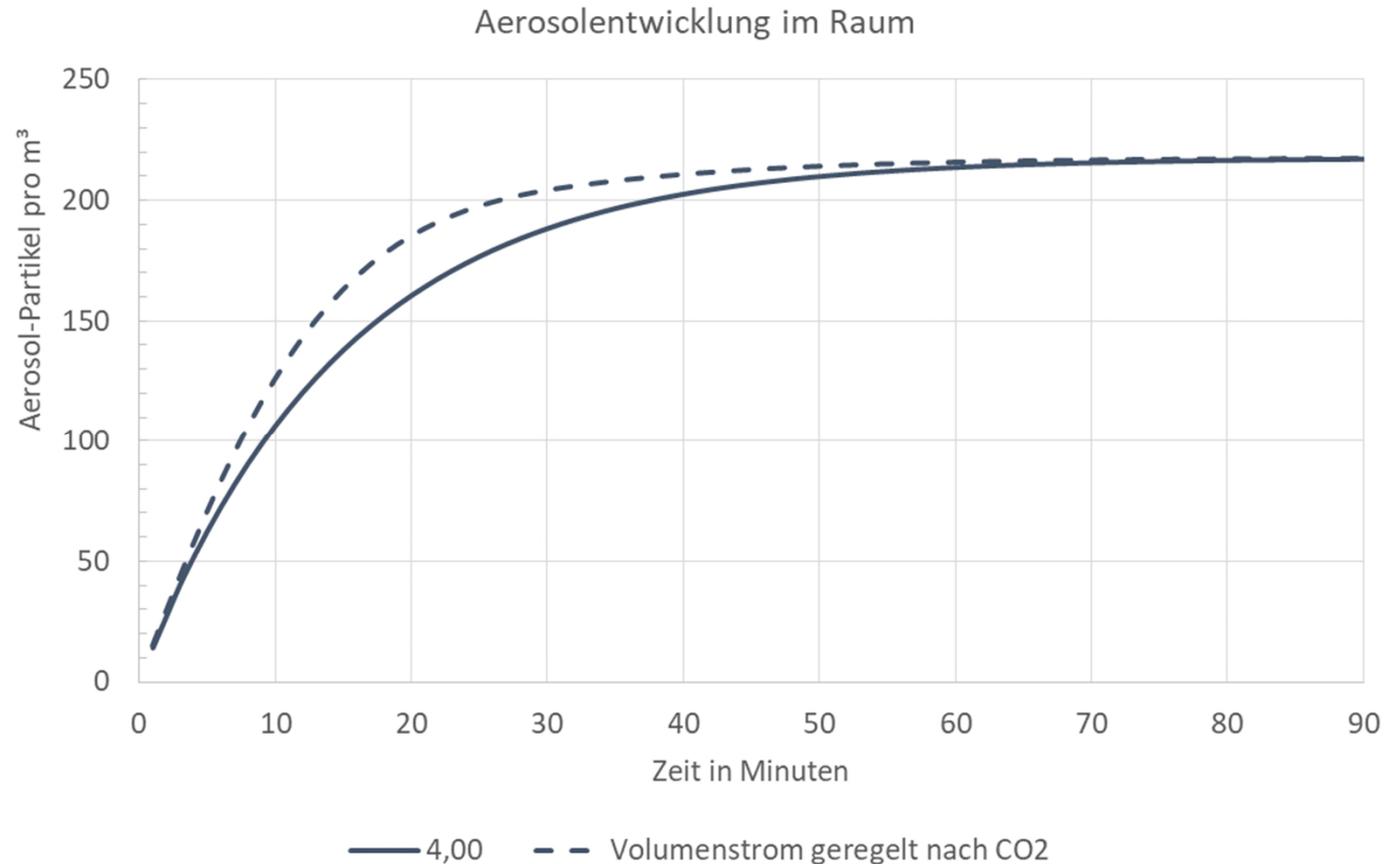
Volumenstrom Kennlinie bei **24 Personen** im Raum (18 l/h CO<sub>2</sub>-Produktion pro Person)

## 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>

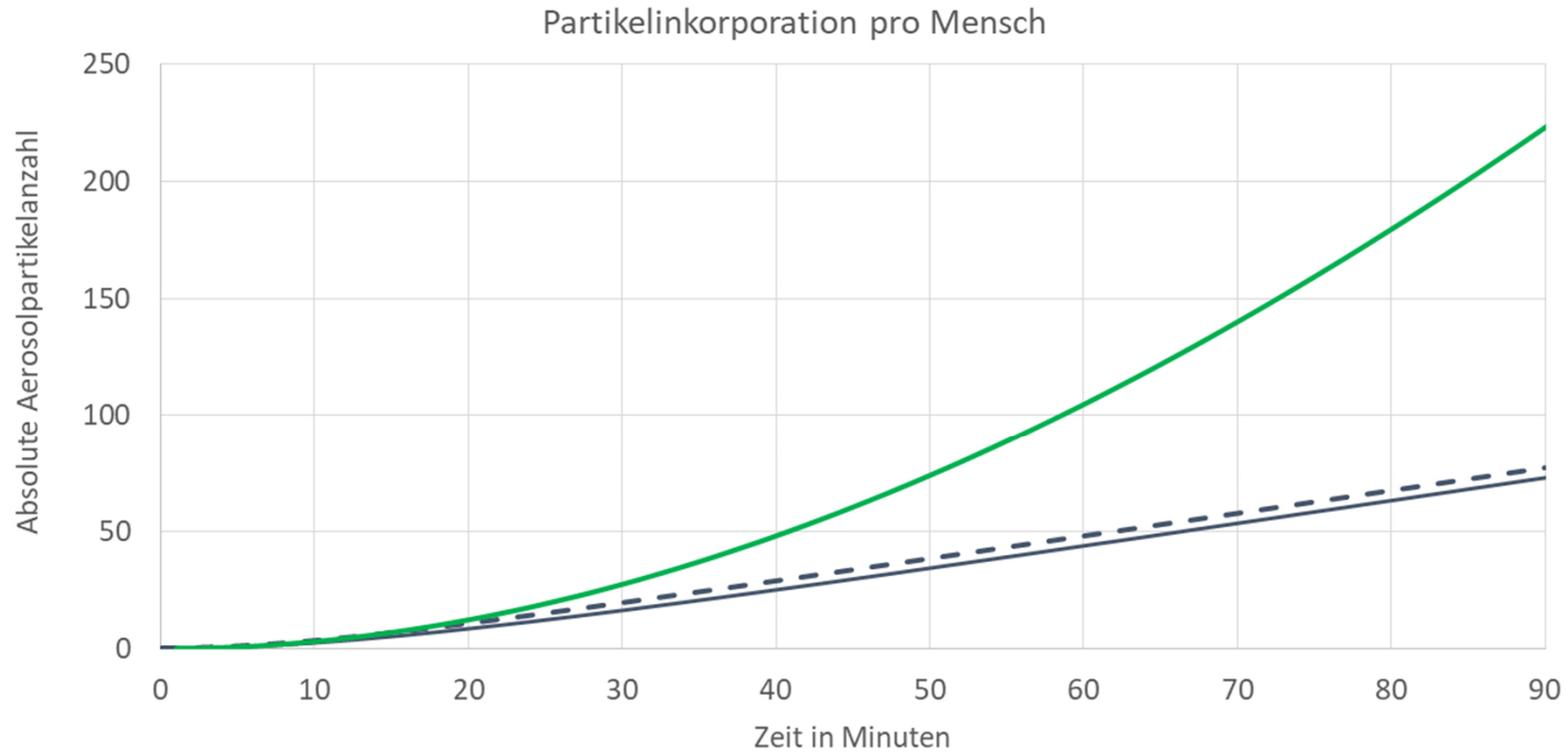
## Partikelentwicklung mit einer infizierten Person



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



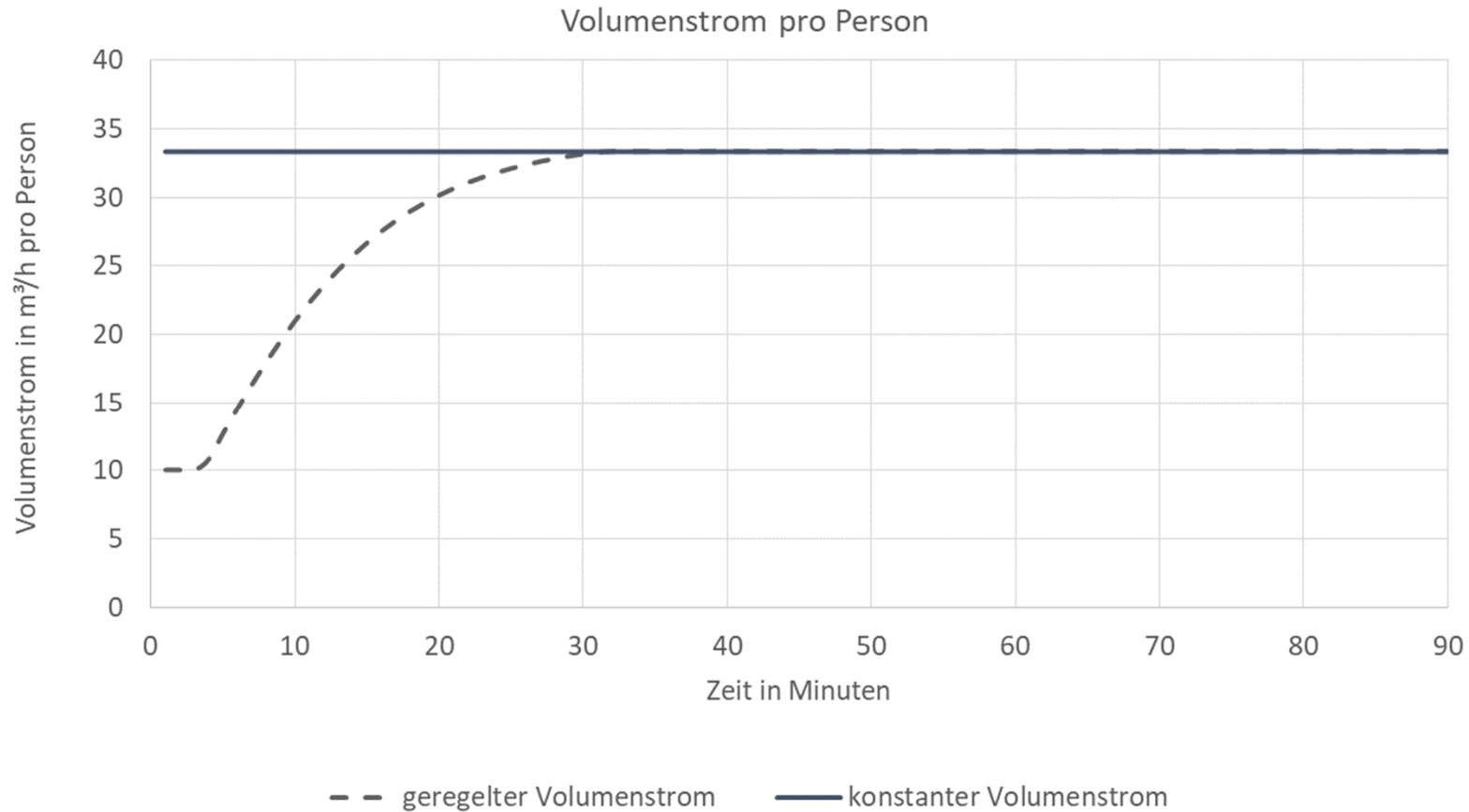
--- Partikelinkorporation pro Mensch LW geregelt    — Partikelinkorporation pro Mensch LW konstant

— Partikelinkorporation pro Mensch netto ohne LW

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

Rahmenbedingungen wie zuvor

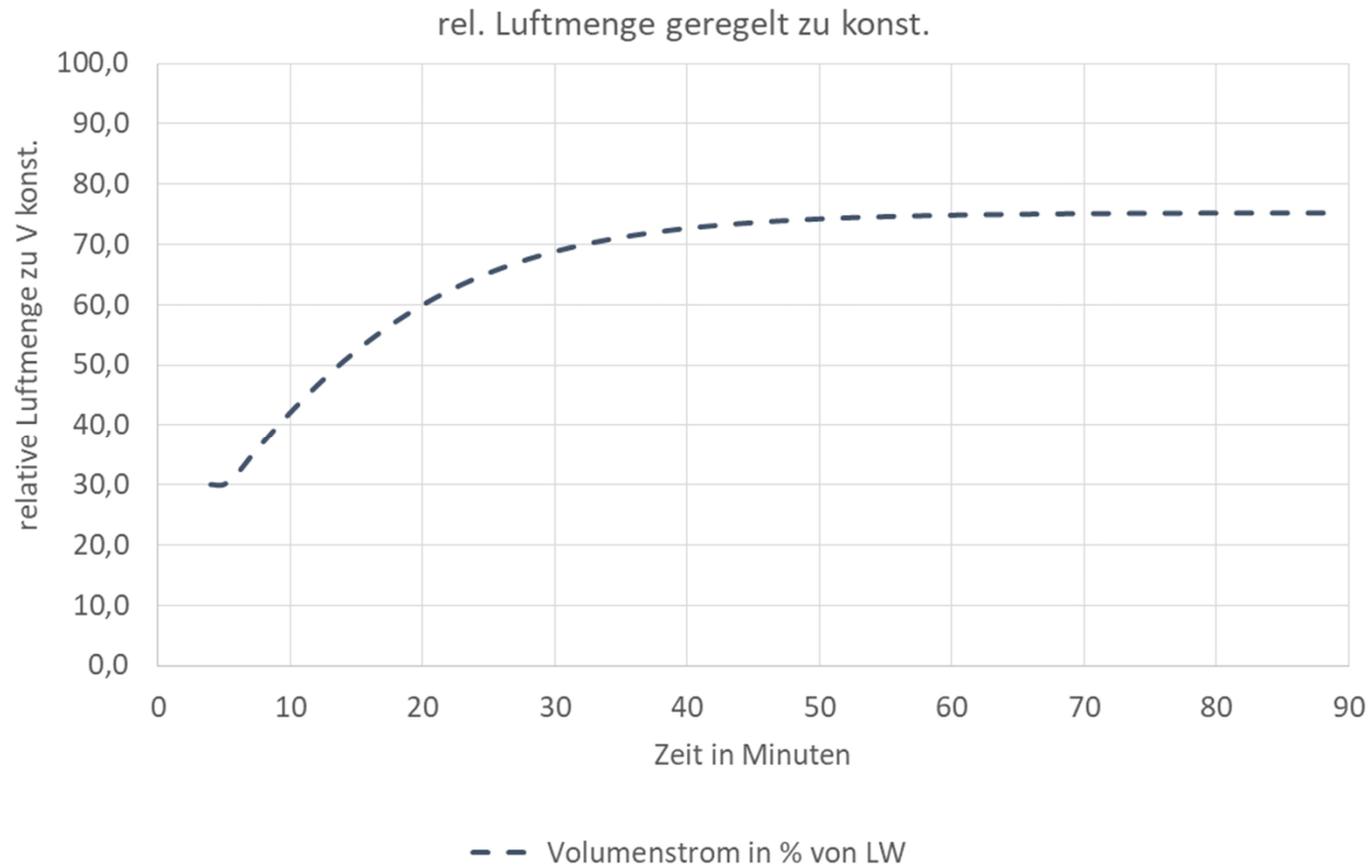
## Virenfreie Luftmenge pro Person



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

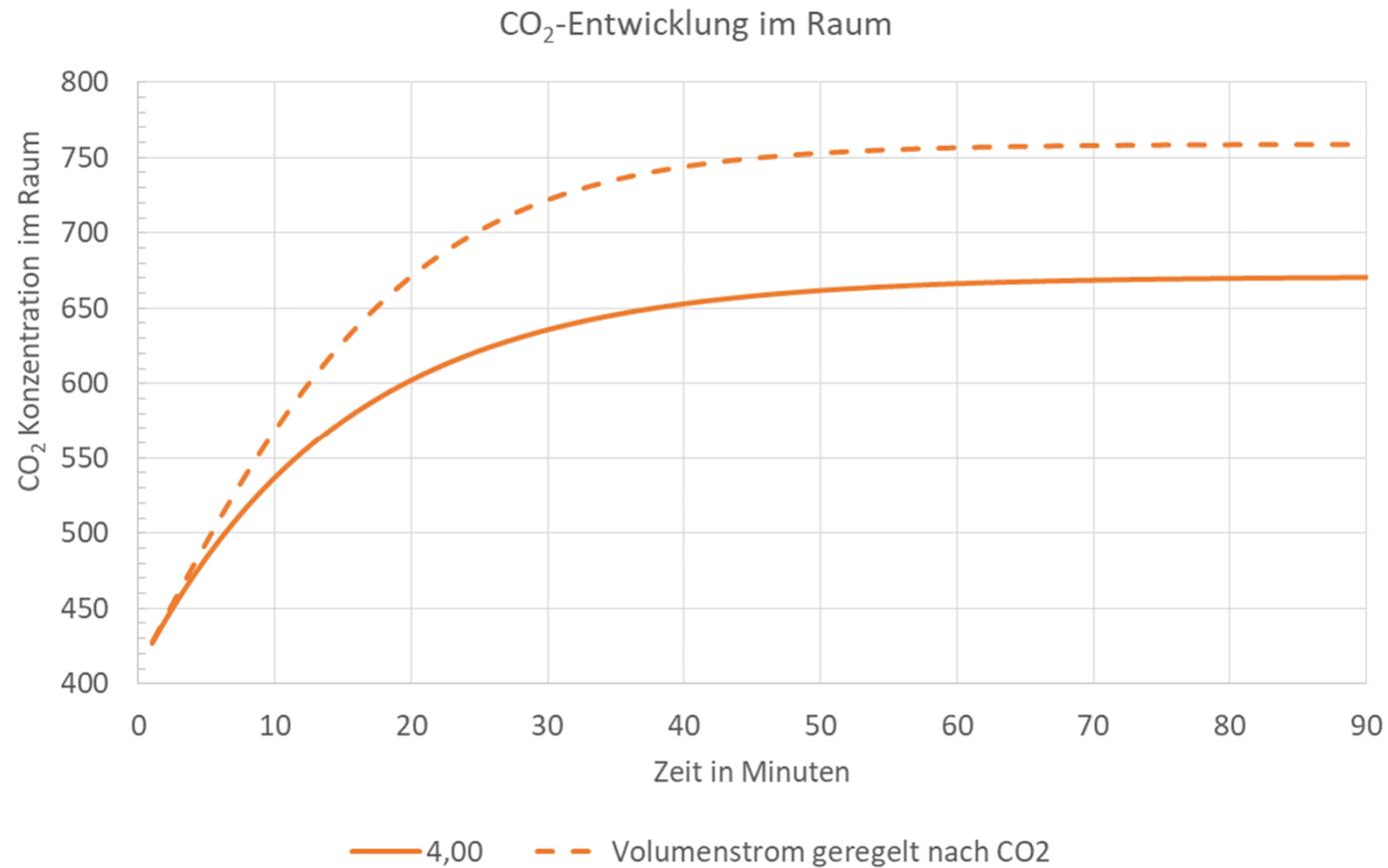
Rahmenbedingungen wie zuvor

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



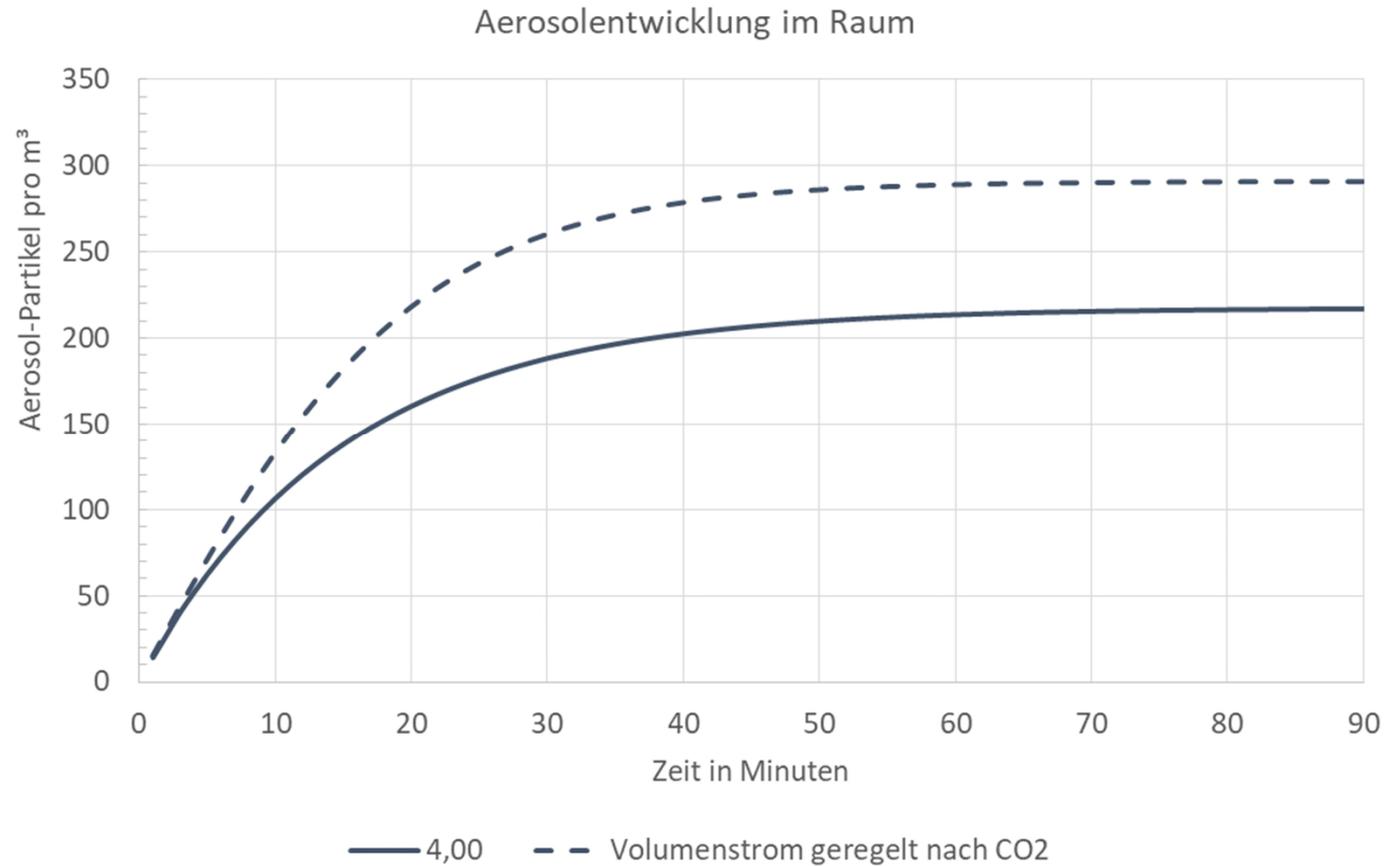
Volumenstrom Kennlinie bei **12 Personen** im Raum (18 l/h CO<sub>2</sub>-Produktion pro Person)

## 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>

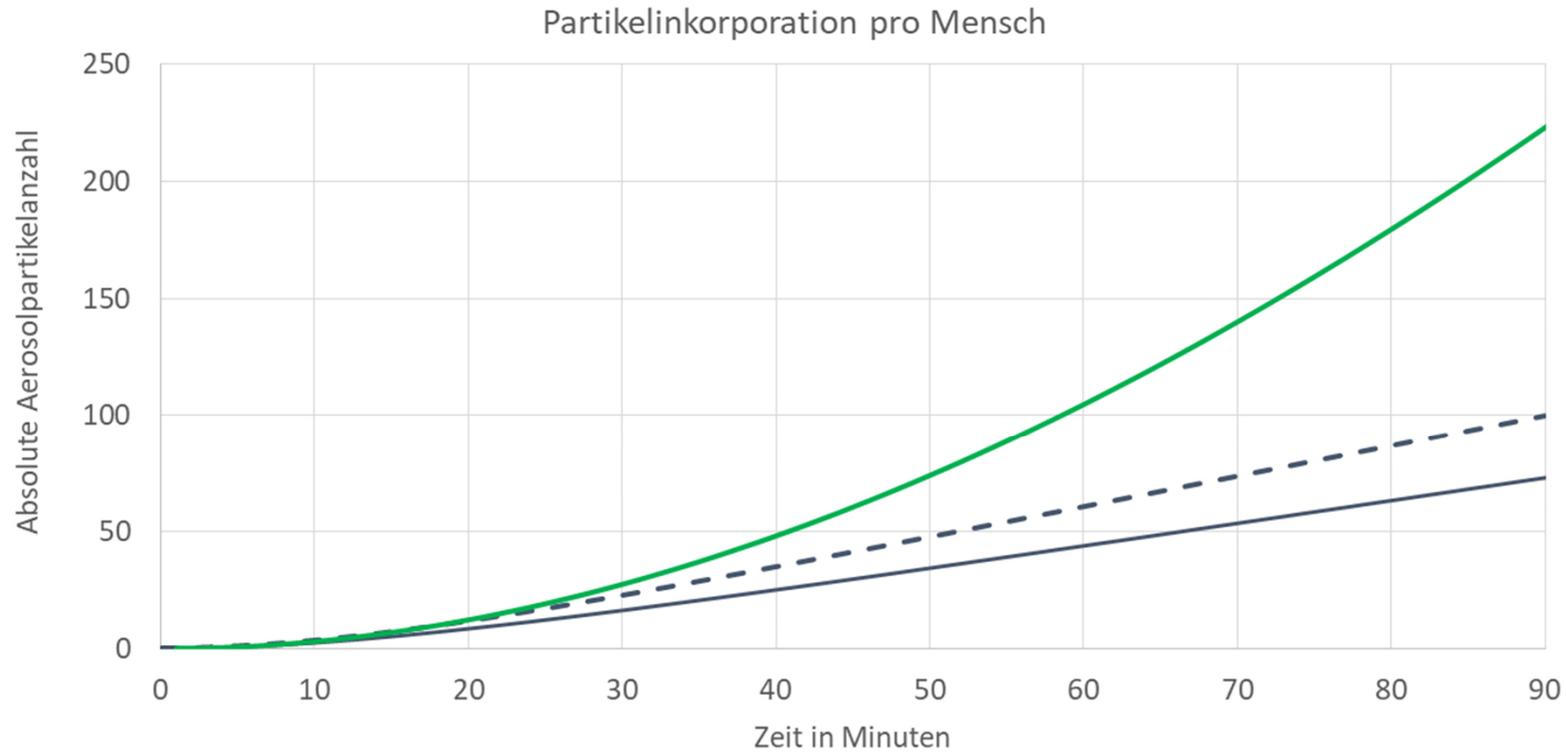
## Partikelentwicklung (halbe Belegung)



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

Rahmenbedingungen wie zuvor

## Partikelinkorporation (halbe Belegung)



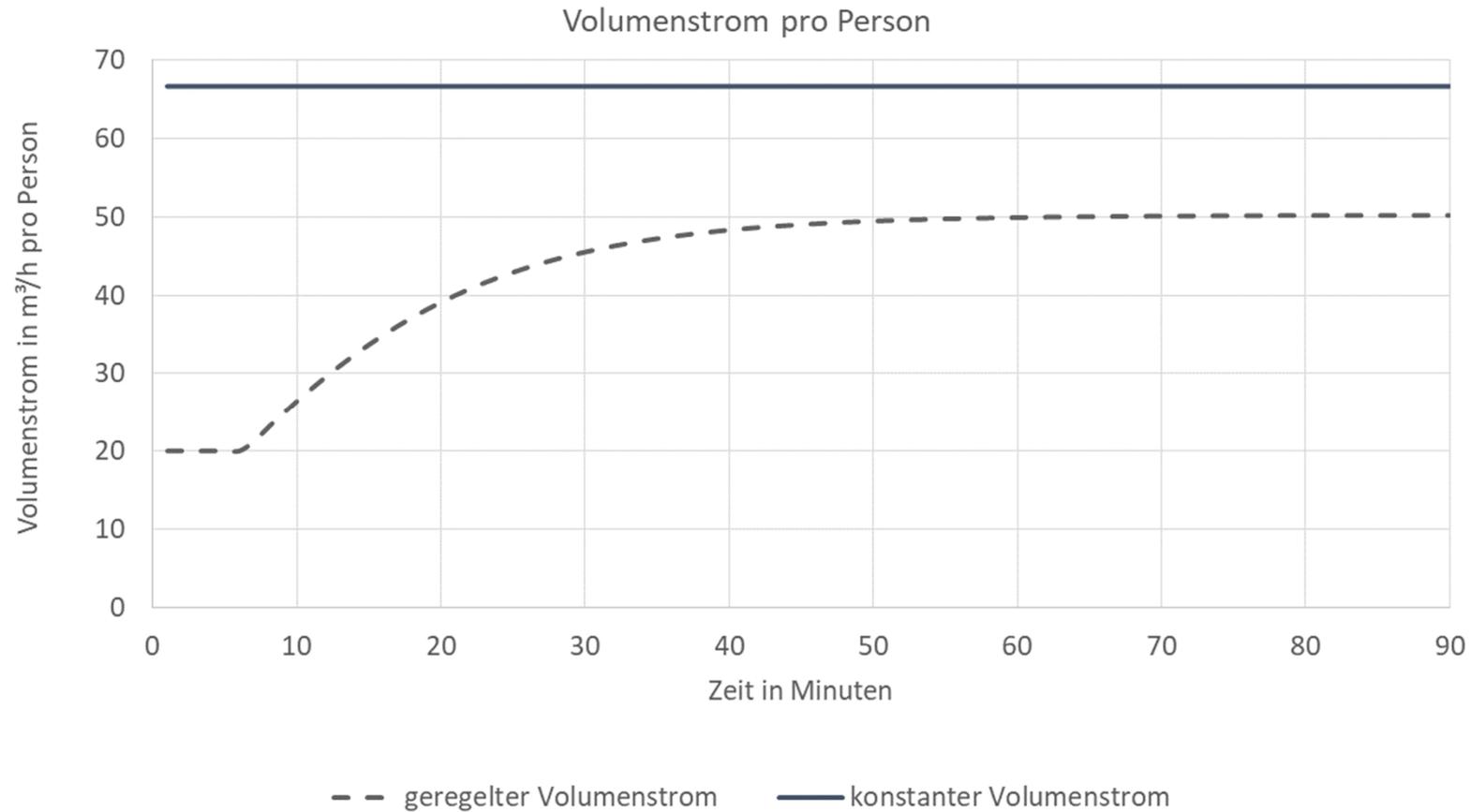
--- Partikelinkorporation pro Mensch LW geregelt    — Partikelinkorporation pro Mensch LW konstant

— 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 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

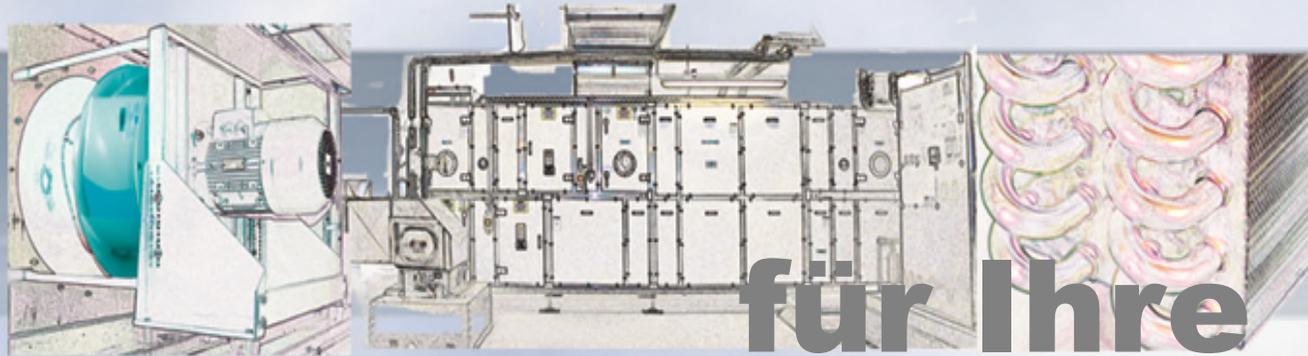
Die CO<sub>2</sub>-Regelung kann das Infektionsrisiko prinzipiell erhöhen.

### 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**

# Herzlichen Dank



# für Ihre Aufmerksamkeit

## Luftmengenfestlegung auf Basis der Schadstoffbelastung

Festlegung auf Basis der CO<sub>2</sub>-Belastung oder der  
Partikelbelastung (z. B. Viren) (generell Gefahrstoffe)

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