

OTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITÄT MAGDEBURG

Masterarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science

Luftfilteranlagen zur Reinigung von Raumlufth

zur Bekämpfung der Ausbreitung des Corona
Virus in geschlossenen Räumen

Florian Jacob

Kontakt: florian.jacob@ovgu.de

12. Mai 2022

Inhaltsverzeichnis

1	Bisherige Forschungsergebnisse	1
2	Simulation der Partikel-Konzentration	2
2.1	Theoretische Modellgrundlagen	2
2.1.1	Bildung der Partikel	2
2.1.2	Abbau der Partikel durch den Luftreiniger	3
2.1.3	Abbau der Partikel durch Lüften	3
2.1.4	Neutralisation der Viruspartikel durch Absterben	3
2.2	Bildung einer Modellfunktion	4
2.3	Bewertung der Einflussfaktoren	7
2.3.1	Einfluss des Luftreinigers	9
2.3.2	Einfluss der Fensterlüftung	10
2.3.3	Einfluss der Aktivität	11
2.3.4	Einfluss der Viruslebensdauer	12
2.3.5	Einfluss der Raumgröße	12
2.4	Vergleich mit experimentellen Daten	13
3	Abbildungsverzeichnis	17
4	Tabellenverzeichnis	18

1 Bisherige Forschungsergebnisse

2 Simulation der Partikel-Konzentration

Um nicht in jedem Raum die Partikel-Konzentration messen zu müssen, ist es sinnvoll ein Modell zu entwickeln. Dieses kann dann in einer Simulation die Partikel-Konzentration anhand bestimmter Parameter bemessen.

2.1 Theoretische Modellgrundlagen

Für die Simulation der Viruslast gibt es mehrere relevante Einflussfaktoren. Diese lassen sich prinzipiell in 4 Gruppen einteilen:

- Partikel-Bildung
- Partikel-Abbau durch den Luftreiniger
- Partikel-Abbau durch das Fensterlüftung
- Neutralisierung der Partikel durch das Absterben der Viren

Für jeden dieser Faktoren lassen sich nun Gleichungen bzw. Algorithmen finden, die die Entwicklung der Viruslast beschreiben.

2.1.1 Bildung der Partikel

Die Partikelbildung ist sehr stark von der Aktivität der Person abhängig. Daraus ergibt sich zum einen das Atemvolumen, zum anderen aber auch die Konzentration an Partikeln in der ausgeatmeten Luft.

$$\dot{P}_{\text{add}} = c_{\text{breath}} \dot{V}_{\text{breath}} \quad (2.1)$$

Mit Hilfe der Raumgröße und der Annahme idealer Durchmischung der Raumluft lässt sich daraus die Änderung der Partikel-Konzentration bestimmen.

$$\dot{c}_{\text{add}} = \frac{\dot{P}_{\text{add}}}{V_{\text{room}}} \quad (2.2)$$

Für die nicht infizierten Personen ändert sich durch die Erhöhung ihres Atemvolumens auch Signifikat ihr Infektionsrisiko.

$$\dot{P}_{\text{inhaliert}} = c_{\text{ges}} \dot{V}_{\text{breath}} \quad (2.3)$$

\dot{P}_{add}	Durch Ausatmen eingetragener Partikelanzahlstrom (Partikel/s)
c_{breath}	Konzentration der Partikel in der Ausatemluft (Partikel/ m^3)
\dot{V}_{breath}	Durchschnittlicher Atemvolumenstrom (m^3/s)
\dot{c}_{add}	Durch Ausatmen erzeugte Änderung der Raumkonzentration (Partikel/($m^3 \cdot s$))
V_{room}	Raumvolumen (m^3)
$\dot{P}_{\text{inhaliert}}$	Durch Einatmen aufgenommene Partikelanzahl (Partikel/s)

2.1.2 Abbau der Partikel durch den Luftreiniger

Ein Luftreiniger saugt mithilfe eines Motors einen gewissen Luftstrom an und reinigt diesen zu einem gewissen Grad. Es lässt sich also formulieren:

$$\dot{P}_{\text{ap}} = \dot{V}_{\text{ap}} \eta_{\text{ap}} c_{\text{room}} \quad (2.4)$$

$$\dot{c}_{\text{ap}} = -\frac{\dot{P}_{\text{ap}}}{V_{\text{room}}} \quad (2.5)$$

\dot{P}_{ap}	Durch Luftreiniger entfernte Partikelanzahl (Partikel/s)
c_{room}	Konzentration der Partikel im Raum (Partikel/ m^3)
\dot{V}_{ap}	Durchschnittlicher Volumenstrom des Luftreinigers (m^3/s)
η_{ap}	Partikel-Wirkungsgrad des Luftreinigers (%)
\dot{c}_{ap}	Durch Luftreiniger erzeugte Änderung der Raumkonzentration (Partikel/($m^3 \cdot s$))

2.1.3 Abbau der Partikel durch Lüften

Durch Lüften verdünnt sich quasi die Raumluft. Damit lässt sich die Partikel-Anzahl beschreiben mit:

$$P_{\text{room},t+1} = P_{\text{room},t} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{\text{vent}}}{t_{\text{vent}}}\right) \quad (2.6)$$

$P_{\text{room},t}$	Partikelanzahl im Raum (Partikel)
η_{vent}	Lüftungseffizienz (Raumvolumen/Luftaustauschstrom in Lüftungszeitraum, s)
t_{vent}	Lüftungsdauer (s)

Das Lüften findet immer in Intervallen $t_{\text{ventintervall}}$ statt und wird zu den anderen Zeiten übersprungen.

2.1.4 Neutralisation der Viruspartikel durch Absterben

Um den Effekt des Absterbens zu simulieren, werden die Viruspartikel in einzelne Fraktionen mit dem entsprechenden Zeitpunkt gespeichert. Da sich die Fraktionen nur minimal gegenseitig beeinflussen, kann jede der vorherigen Operationen auch auf jede Gruppe einzeln angewendet werden. Ist eine

Fraktion älter als die Viruslebensdauer t_{vir} , so wird ihre Anzahl auf 0 gesetzt. Auch ein Modell, das ein Absterben mit Hilfe einer Normalverteilung um den Todeszeitpunkt nutzt, wurde untersucht, führte jedoch zu keiner signifikanten Änderung der Ergebnisse.

2.2 Bildung einer Modellfunktion

Die Berechnung der Konzentration der mit Virus beladenen Partikel in der Raumluft führt zu einem zeitlichen Verlauf, wie er in der blauen Kurve in Abbildung 2.1 dargestellt ist. Der zeitliche Mittelwert ist dabei eine relativ stetige Funktion, die sich möglicherweise mit einer einfacheren mathematischen Funktion approximieren lässt. Mit Hilfe einer solchen Funktion ließe sich der zeitliche Verlauf der Partikelkonzentration für verschiedene Randbedingungen wesentlich schneller bestimmen, als mit der zuvor vorgestellten Methode.

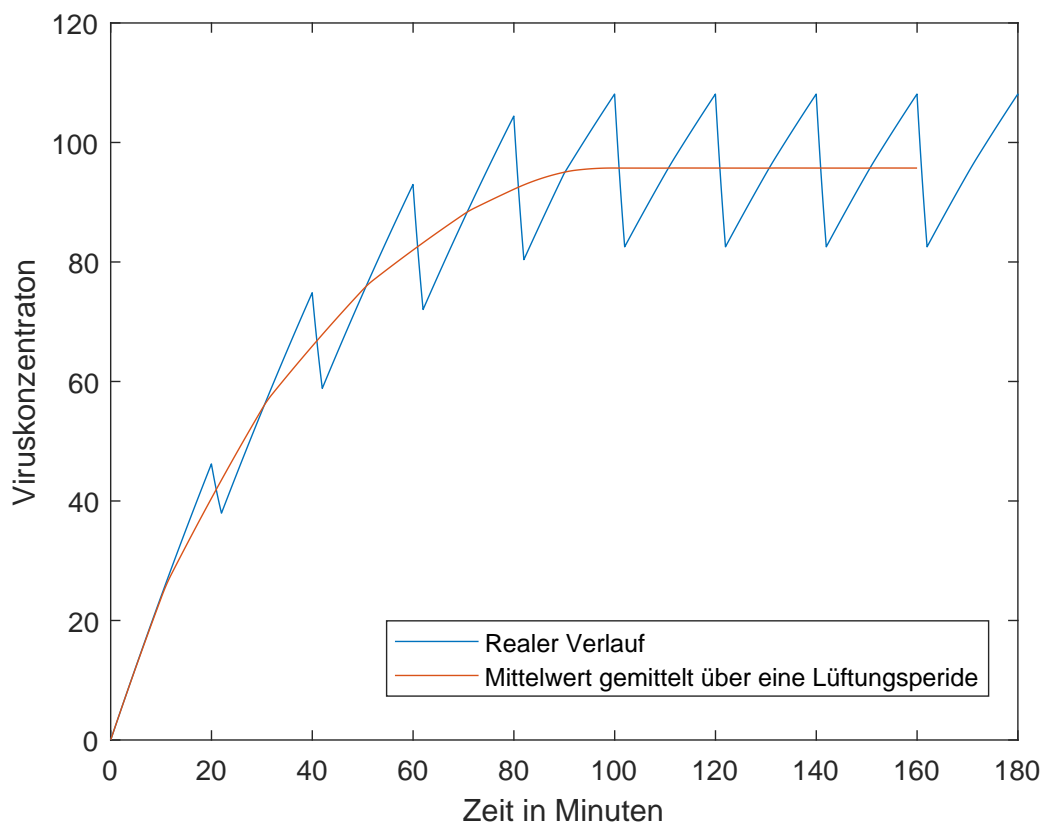


Abbildung 2.1: Entwicklung der Partikel-Konzentration im Raum

Um eine potentielle Funktion zu bestimmen, ist es interessant, sich Grenzwerte anzuschauen. Dabei sind interessant:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} c(t) = c_{\max} \quad (2.7)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{c}(t) = 0 \quad (2.8)$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} c(t) = 0 \quad (2.9)$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} \dot{c}(t) = m_0 \quad (2.10)$$

c_{\max} Maximale Konzentration, Grenzwert

m_0 Anfangsanstieg

Für die Bestimmung von m_0 lässt sich eine einfache Betrachtung anstellen. Da zu Beginn die Partikel noch nicht absterben, entspringt die Konzentrationsänderung hier nur der durch die Atemluft erzeugten Partikel (\dot{c}_{add}).

Eine Funktion, die die Limes Bedingungen erfüllt, ist eine Exponentialfunktion.

$$c_t = a \cdot (1 - e^{-bt}) \quad (2.11)$$

Nun können wir mit Hilfe der Limes-Bedingungen einzelne Parameter bestimmen. Aus Gleichung 2.10 folgt:

$$\lim_{t \rightarrow 0} ab \cdot e^{bt} = ab = \dot{c}_{\text{add}} \quad (2.12)$$

$$a = \frac{\dot{c}_{\text{add}}}{b} \quad (2.13)$$

$$c_t = \frac{\dot{c}_{\text{add}}}{b} \cdot (1 - e^{-bt}) \quad (2.14)$$

Mit Gleichung 2.7 lässt sich schlussfolgern:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\dot{c}_{\text{add}}}{b} \cdot (1 - e^{-bt}) = c_{\max} \quad (2.15)$$

$$\frac{\dot{c}_{\text{add}}}{b} = c_{\max} \quad (2.16)$$

Der Parameter b stellt also eine Art Gegenwirkung zur Partikel Bildung dar. Er setzt sich zusammen aus dem Abbau der Partikel durch die Fensterlüftung und den Luftfilter.

$$b = \frac{\eta_{\text{vent}}}{t_{\text{ventintervall}}} + \frac{\dot{V}_{\text{ap}} \eta_{\text{ap}}}{V_{\text{room}}} \quad (2.17)$$

Das sterben der Viren lässt sich nicht einfach integrieren. Prinzipiell könnte man die Virusanzahl mit Hilfe einer exponentiellen Zerfallsfunktion bestimmen, hier wurde jedoch von einer festen Lebensdauer für alle Viren ausgegangen. Unter dieser Annahme, stabilisiert sich die Virusanzahl am Ende der Viruslebensdauer, da stets so viele Viren eingetragen werden, wie durch sterben und Luftaustausch bzw. Reinigung entzogen werden. Damit lässt sich die Viruskonzentration beschreiben mit:

$$c_t = \frac{a}{b} \cdot (1 - e^{-b \cdot \min(t, t_{\text{vir}})}) \quad (2.18)$$

mit

$$a = c_{\text{breath}} \frac{\dot{V}_{\text{breath}}}{V_{\text{room}}} \quad (2.19)$$

$$b = \frac{\eta_{\text{vent}}}{t_{\text{ventintervall}}} + \frac{\dot{V}_{\text{ap}} \eta_{\text{ap}}}{V_{\text{room}}} \quad (2.20)$$

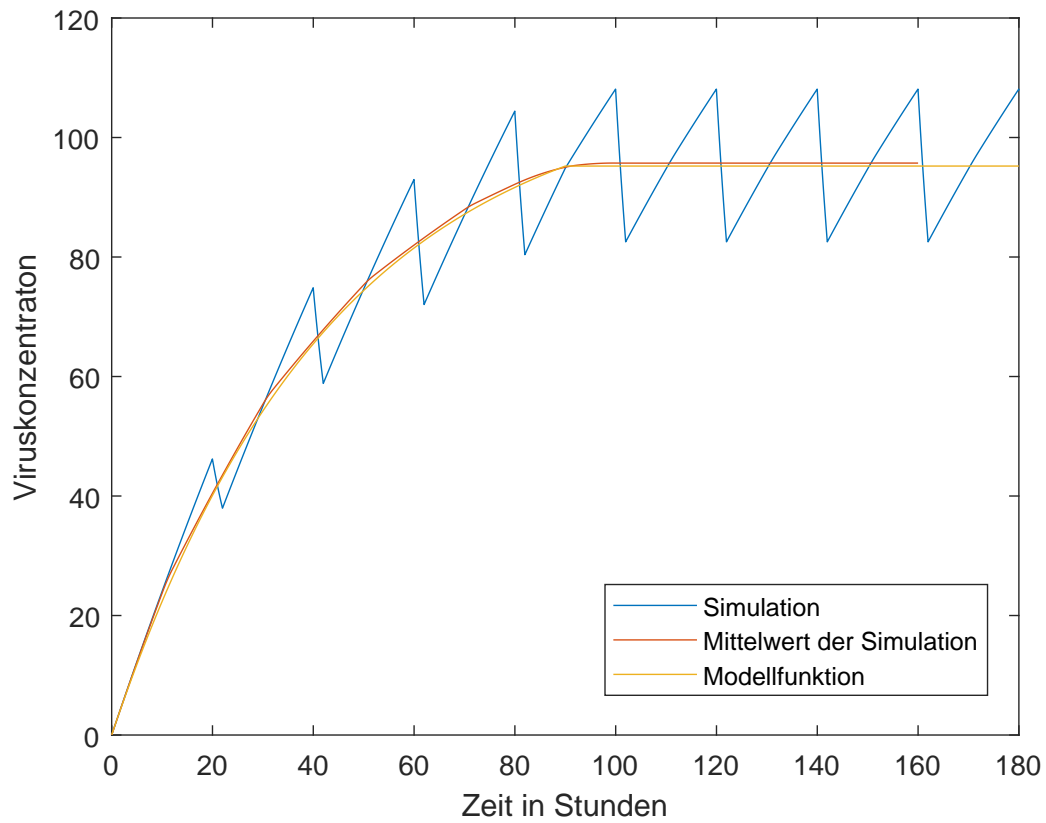


Abbildung 2.2: Vergleich der Modellfunktion mit der Simulation bei guter Raumlüftung

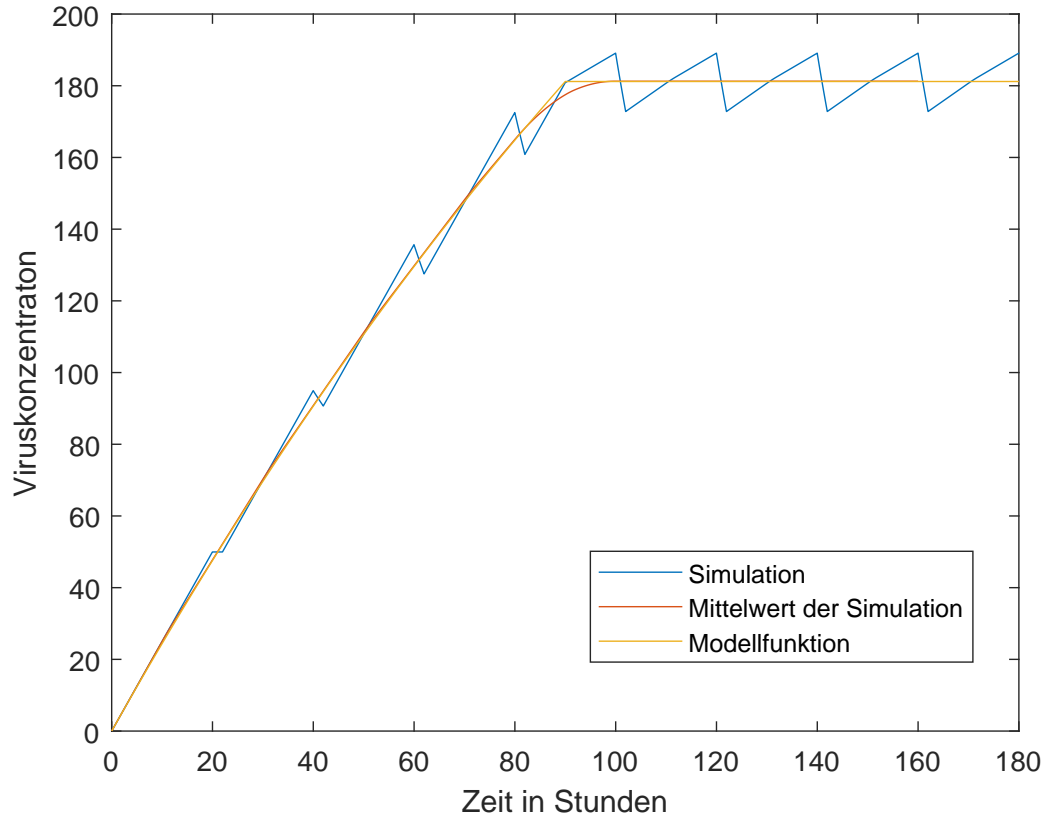


Abbildung 2.3: Vergleich der Modellfunktion mit der Simulation bei schlechter Raumlüftung

Durch Integration der Funktion lassen sich die aufgenommenen Partikel-Mengen bestimmen

2.3 Bewertung der Einflussfaktoren

Mit Hilfe von Gleichung 2.18 lassen sich die einzelnen Einflussfaktoren sehr gut analysieren. Dabei lässt sich die Gleichung in 2 Teile zerlegen:

- Den Vorfaktor, der eine Streckung in y-Richtung erzeugt
(a/b)
- Den exponentielle Teil, der die Zeit bis zum Erreichen des Maximums vorgibt
($1 - \exp(-b \cdot \min(t, t_{\text{vir}}))$)

Daraus lässt sich ableiten:

- Steigt a , so steigt die Streckung in y-Richtung, was bedeutet, dass die Viruskonzentration schneller anwächst und das Maximum höher liegt. Da a ein Maß für die ausgestoßene Menge an Partikeln bezogen auf die Raumgröße ist, ist dieses Verhalten auch durchaus plausibel.
- Für b gilt das gleiche, jedoch befindet sich b auch im exponentiellen Teil der Gleichung. Durch eine Steigerung von b in diesem Bereich, erreicht der exponentiellen Teil schneller den Wert von 1 und somit die Gesamtfunktion schneller die maximale Konzentration. Dieser Effekt ist dadurch zu erklären, dass sich durch die geringere maximale Konzentration schneller das Gleichgewicht zwischen Partikel-Bildung und Partikel-Abbau einstellen kann.

Zudem zeigt die Gleichung, dass Partikel-Abbau durch den Luftreiniger und Partikel-Abbau durch das Lüften sich sehr ähnlich verhalten. Diese Eigenschaft wird häufig in der Luftwechselrate n zusammengefasst.

$$n = \frac{\dot{V}}{V_{\text{room}}} \quad (2.21)$$

Mit Gleichung 2.20 lassen sich die beiden Lüftungseffekte als Luftwechselraten darstellen:

$$n_{\text{purifier}} = \frac{\dot{V}_{\text{ap}} \eta_{\text{ap}}}{V_{\text{room}}} \quad (2.22)$$

$$n_{\text{vent}} = \frac{\eta_{\text{vent}}}{t_{\text{ventintervall}}} \quad (2.23)$$

$$b = n_{\text{purifier}} + n_{\text{vent}} \quad (2.24)$$

In den folgenden Szenarien wird jeweils eine Größe variiert, während die anderen auf einem Standard-Wert verweilen. Die Standardwerte sind die folgenden:

t_{ges}	5 h
c_{breath}	100 particle/L
V_{breath}	5 L/min
V_{room}	200 m ³
t_{vir}	90 min
V_{ap}	500 m ³ /h
$t_{\text{ventintervall}}$	20 min

Für Analysen zum Luftreiniger:

η_{vent}	0.0
η_{ap}	0.95

Sonst:

η_{vent}	0.5
η_{ap}	0.0

Da in den meisten Fällen entweder ein Luftreiniger läuft oder das Fenster geöffnet wird, wird in den folgenden Analysen jeweils die Effizienz der anderen Methode auf 0 gesetzt, so dass ihr Einfluss entfällt.

Da die meisten Schulen keine Luftfilter besitzen, wird 20 minütiges Lüften als Standard angenommen. Die einzelnen Einflussfaktoren wurden immer mit $\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, 1, 2$ und 4 multipliziert, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Für die Werte der Effizienz würden jeweils sinnvolle Bereiche verwendet, da eine Effizienz über 1 nicht sinnvoll wäre.

2.3.1 Einfluss des Luftreinigers

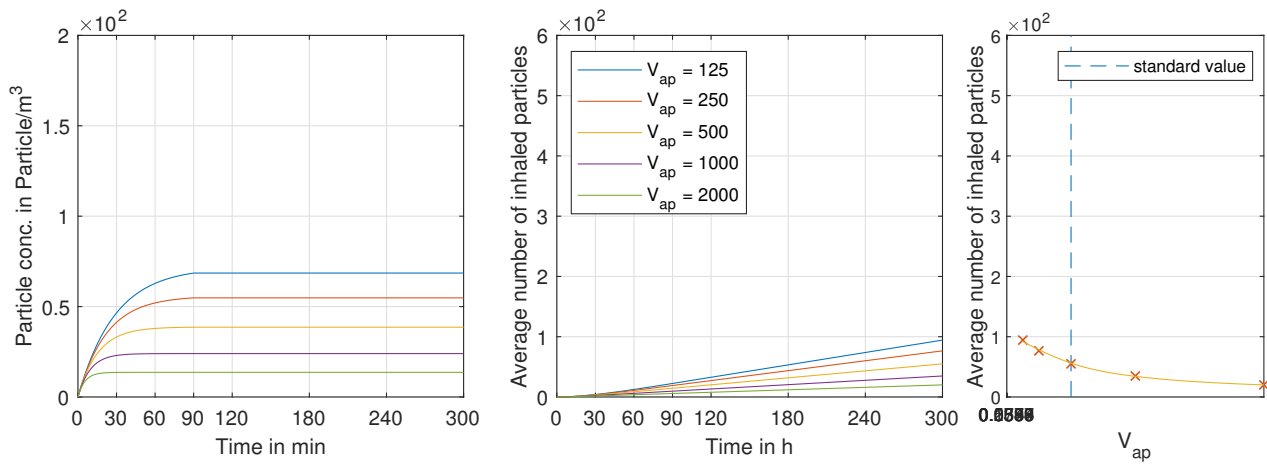


Abbildung 2.4: Einfluss des Luftreiniger Volumenstroms (Faktor b)

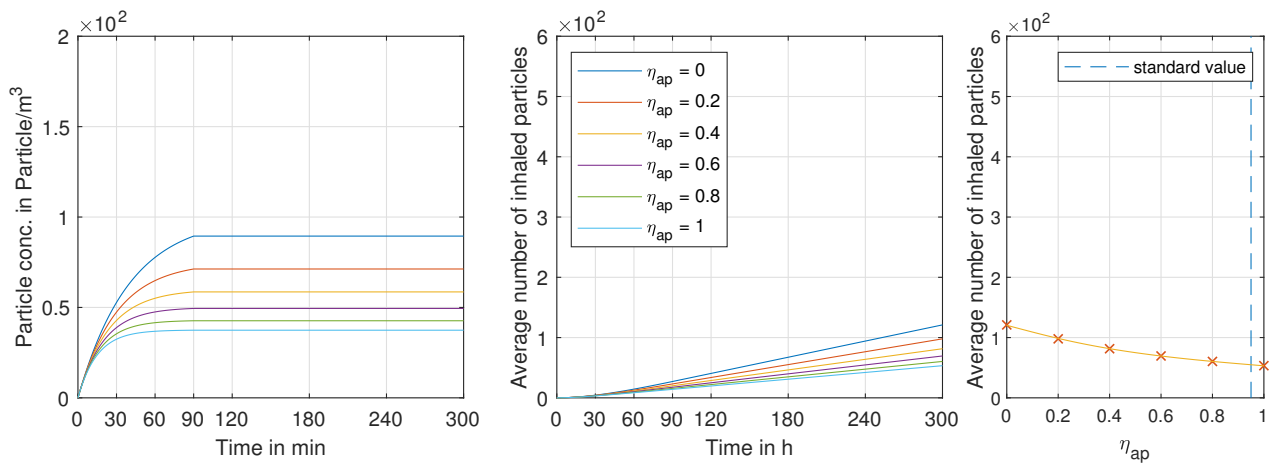


Abbildung 2.5: Einfluss der Luftreiniger Filtereffizienz (Faktor b)

Bereits ein geringer Volumenstrom einer Luftreinigers bringt eine deutliche Verbesserung der Raumluft. Die Filtereffizienz hingegen hat nur einen sehr geringen Einfluss. Da mit steigender Filtereffizienz auch der Luftwiderstand und so der Energieverbrauch steigt, sollte eher ein Lüfter mit ineffizientem Filter gewählt werden.

2.3.2 Einfluss der Fensterlüftung

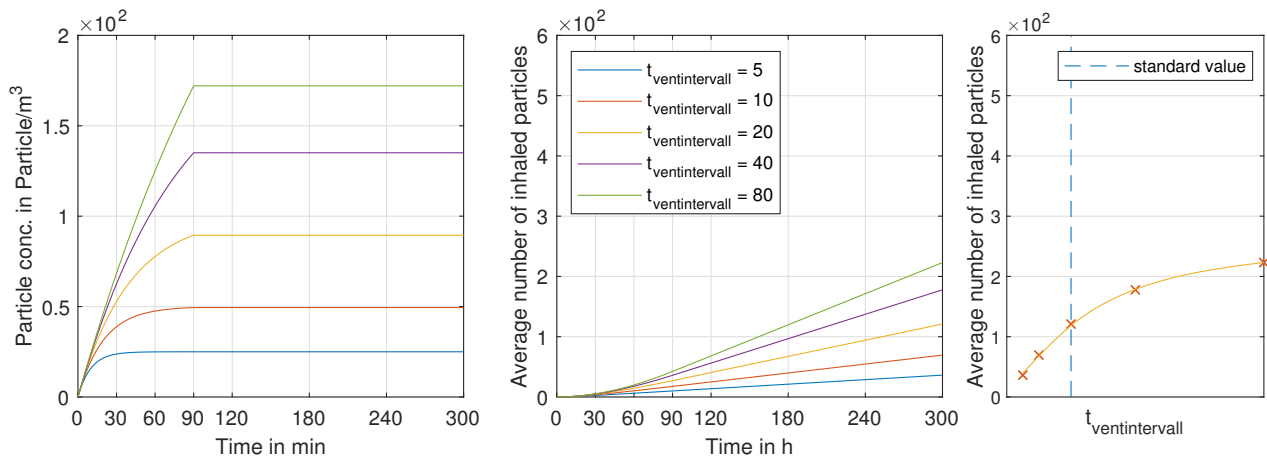


Abbildung 2.6: Einfluss der Fensterlüftungsintervalle (Faktor b)

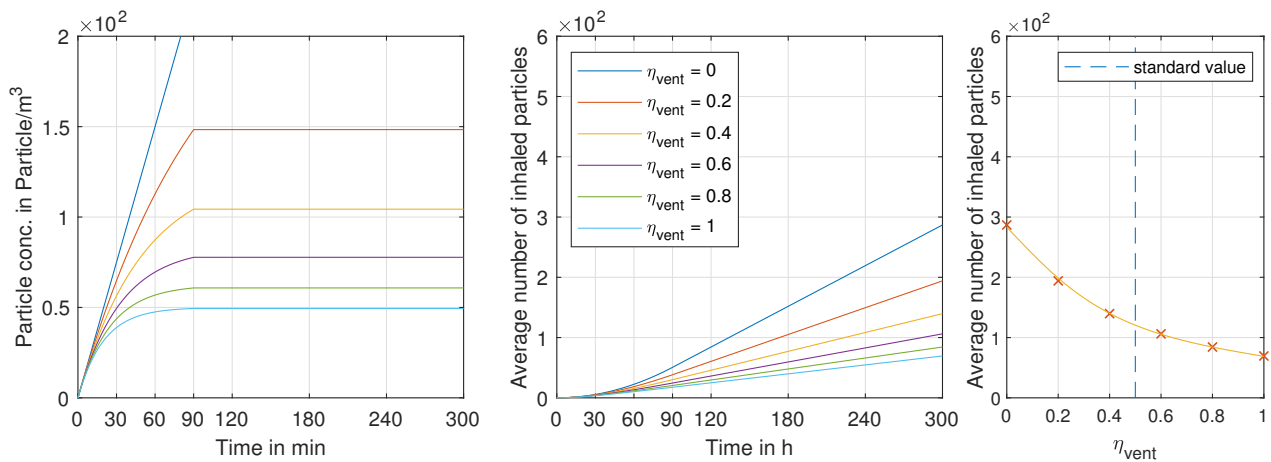


Abbildung 2.7: Einfluss der Fensterlüftungseffizienz (Faktor b)

Fensterlüftung kann aus Partikel-technischer Sicht durchaus mit Raumluftfiltern mithalten. Dafür muss die Raumluft jedoch ausreichend austauscht werden. Das heißt, das Durchzug oder ähnliche Bedingungen hergestellt werden müssen, damit die Luft auch im ausreichenden Maße ausgetauscht wird.

2.3.3 Einfluss der Aktivität

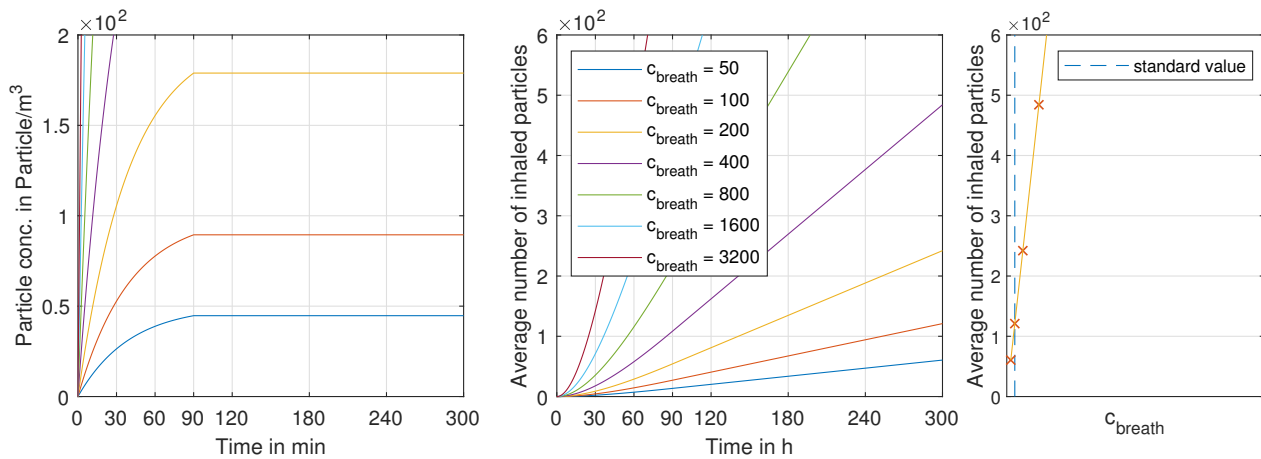


Abbildung 2.8: Einfluss der Atemkonzentration (Faktor a)

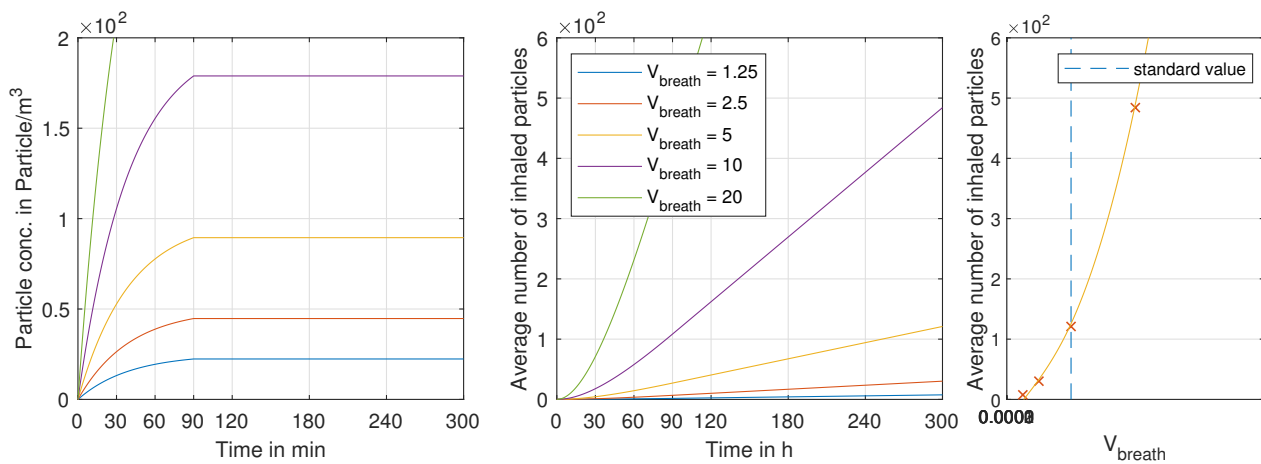


Abbildung 2.9: Einfluss der Atemmenge (Faktor a)

Die Aktivität hat einen sehr hohen Einfluss auf das Infektionsrisiko. Die Atemmenge wirkt sich quadratisch auf die eingeatmete Partikelmenge aus, da sie die ausgestoßene und die eingeatmete Menge an partikelhaltiger Luft erhöht.

2.3.4 Einfluss der Viruslebensdauer

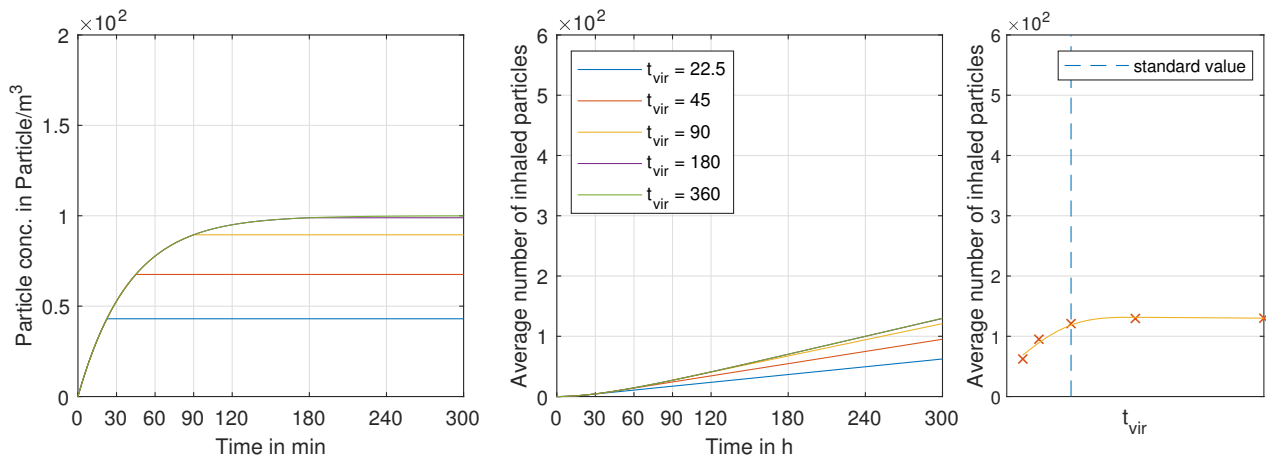


Abbildung 2.10: Einfluss der Viruslebensdauer

Der Einfluss der Viruslebensdauer ist eher gering, solange sie größer als 90 Minuten ist. Sehr kurze Viruslebensdauern können jedoch das Infektionsrisiko deutlich senken.

2.3.5 Einfluss der Raumgröße

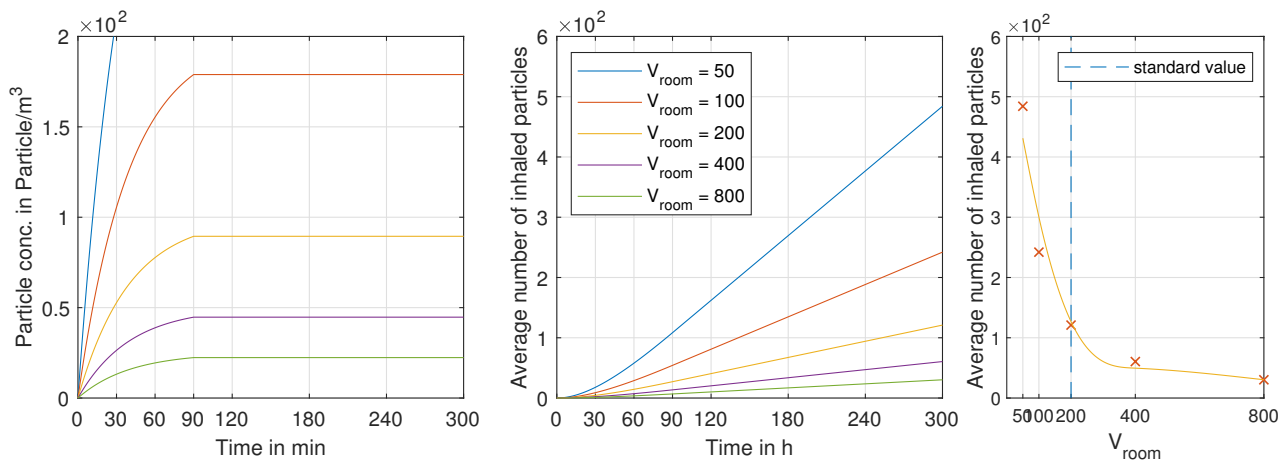


Abbildung 2.11: Einfluss der Raumgröße (Faktor a und b)

Die Raumgröße hat einen sehr signifikanten Einfluss. Verringert sie sich, verdünnt sich die ausgeatmete Luft nicht so stark, wodurch die Partikel-Konzentration in der Luft sehr stark ansteigt. Es ist jedoch zu beachten, dass sich in größeren Räumen meist mehr Personen aufhalten. Das erhöht die Chance, dass eine oder mehrere Personen infiziert sind und es erhöht die Anzahl sich potentiell infizierender Personen.

2.4 Vergleich mit experimentellen Daten

Im Rahmen eines Experiments, wurden die folgenden Kurven durchlaufen. Dadurch sollten die verschiedenen Parameter charakterisiert und quantifiziert werden. Zudem kann so auch das Modell validiert werden. Die Graphen folgen der Reihenfolge der Messungen und schließen entsprechend an den vorherigen Graphen an.

(Angaben zu Raumgröße und Experimentparametern, wo? 186 m^3 , 0.995 etc.)

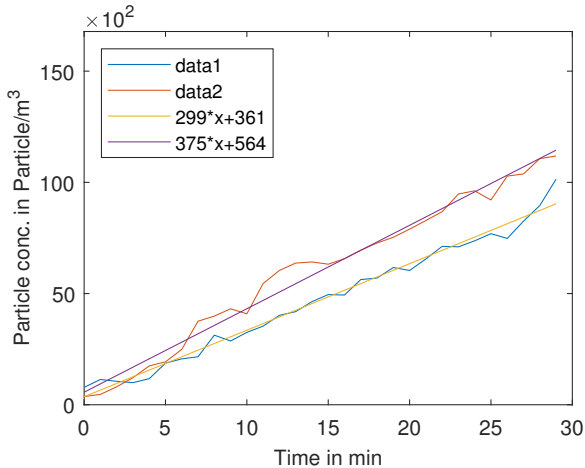


Abbildung 2.12: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, nur AG läuft

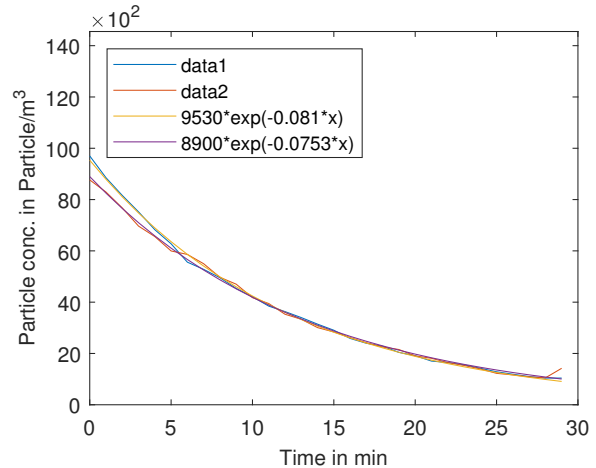


Abbildung 2.13: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Nur LR läuft

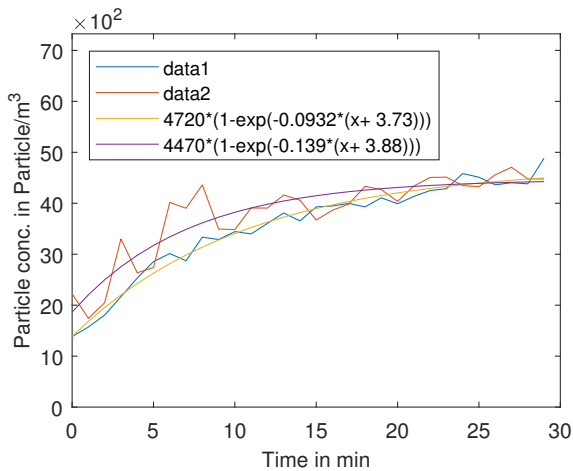


Abbildung 2.14: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, LR und AG laufen

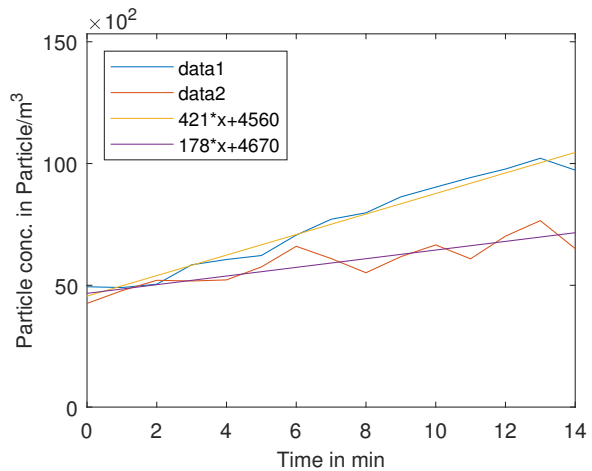


Abbildung 2.15: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, nur AG läuft

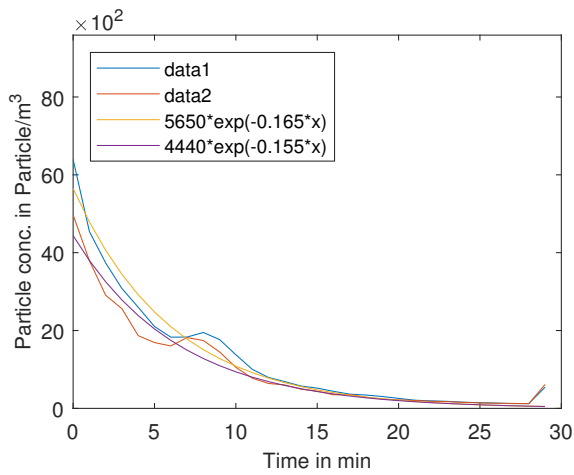


Abbildung 2.16: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet

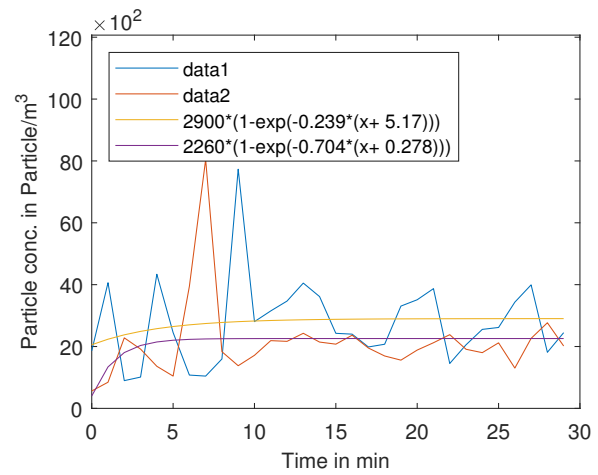


Abbildung 2.17: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet, AG läuft

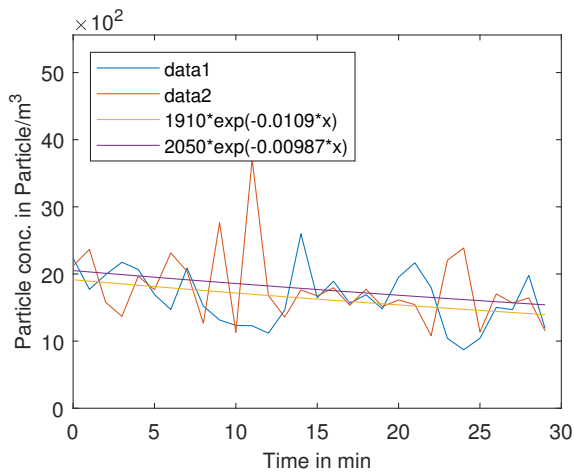


Abbildung 2.18: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet, LR und AG laufen

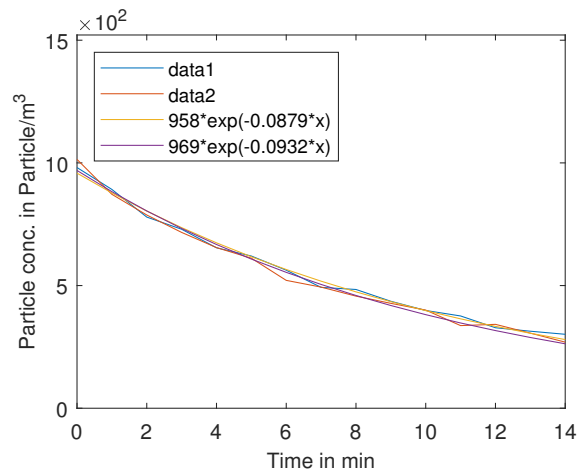


Abbildung 2.19: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, LR läuft

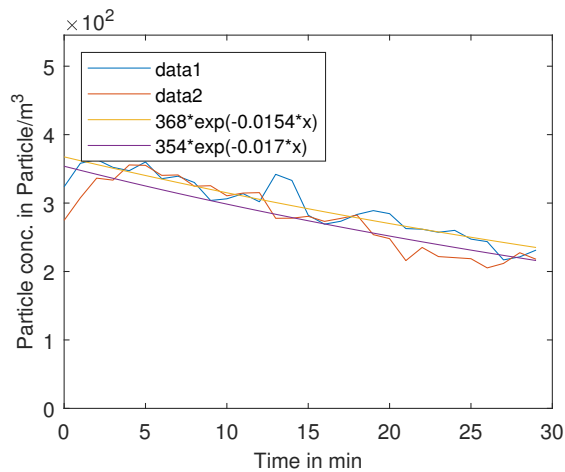


Abbildung 2.20: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet

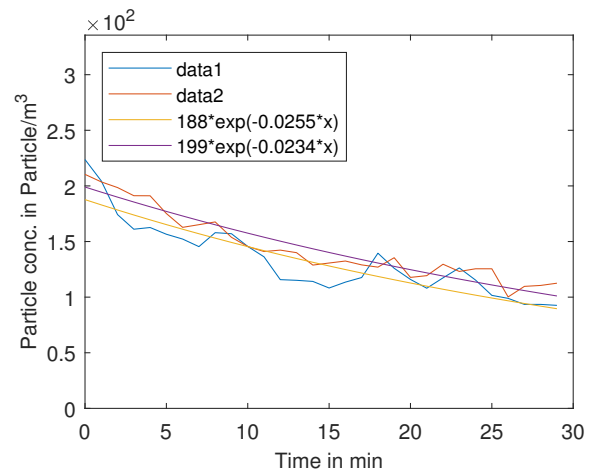


Abbildung 2.21: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet, LR läuft

Um die Funktion anwenden zu können, müssen 3 Kriterien erfüllt sein:

1. Es müssen sich Partikel bilden.
2. Es müssen Partikel aus dem Raum entfernt werden.
3. Die Bildung muss zu Beginn größer sein als der Abbau. Idealerweise sollte die Anfangskonzentration 0 sein, das kann aber mit einem Offset des Exponenten gelöst werden

Diese Bedingungen sind für Abbildung 2.14 und 2.17 erfüllt. Aus den anderen Funktionen lassen sich jedoch andere Parameter ablesen. Aus Abbildung 2.12 kann die Partikelbildung durch Aerosol Generator (AG) berechnet werden. Es ist aber zu beachten, das die Werte umd fast 25% voneinander abweichen. Dafür muss der Anstieg der Partikeldichte mit dem Raumvolumen multipliziert werden:

$$\dot{n} = c_t \cdot V_{\text{room}} \quad (2.25)$$

Damit erhält man eine Partikelbildung von 930 bzw. 1162 Partikeln pro Sekunde je nach Messkurve. Geht man von einem Standard Atemvolumen von $V_{\text{breath}} = 5 \text{ L/min}$ aus, so entspricht das einer Konzentration von 11 160 bis 13 950 Partikeln pro Liter Atemluft. Damit lassen sich nun die Daten aus Abbildung 2.14 validieren. Nach dem Modell müsste der Parameter b sich ergeben zu:

$$b = \frac{1000/3600 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 0.995}{186 \text{ m}^3} \quad (2.26)$$

$$= 0.001486/\text{s} \quad (2.27)$$

$$= 0.089158/\text{min} \quad (2.28)$$

Dieser Wert liegt ca. 25% unterhalb des Mittelwerts der Parameter der durch die Fits gebildeten Funktion. Das kann verschiedene Gründe haben. Zum einen sind die Schwankungen der Messdaten relativ hoch, so das es hier zu Fehlern gekommen sein könnte. Allein zwischen den Parametern der einzelnen

Funktionen gibt es eine Abweichung von fast 40%. Zum anderen könnte die Annahme der idealen Durchmischung, also des 1-D-Modells, nicht ganz die Wirklichkeit widerspiegeln. Gerade bei einer so hohen Konzentration durch den Aerosolgenerator können sich räumlich Gradienten ausbilden, die die Messdaten verfälschen.

$$a1 = \frac{11\,160 \text{ particle/L} \cdot 5/60 \text{ L/s}}{186 \text{ m}^3} \quad (2.29)$$

$$= 5 \text{ particle/s/m}^3 \quad (2.30)$$

$$a2 = \frac{13\,950 \text{ particle/L} \cdot 5/60 \text{ L/s}}{186 \text{ m}^3} \quad (2.31)$$

$$= 6.25 \text{ particle/s/m}^3 \quad (2.32)$$

$$(2.33)$$

Damit lässt dich nun das Verhältnis von a zu b bestimmen:

$$\frac{a1}{b} = 3364 \text{ particle/m}^3 \quad (2.34)$$

$$\frac{a2}{b} = 4206 \text{ particle/m}^3 \quad (2.35)$$

$$\frac{a1 + a2}{2b} = 3785 \text{ particle/m}^3 \quad (2.36)$$

3 Abbildungsverzeichnis

2.1	Entwicklung der Partikel-Konzentration im Raum	4
2.2	Vergleich der Modellfunktion mit der Simulation bei guter Raumlüftung	6
2.3	Vergleich der Modellfunktion mit der Simulation bei schlechter Raumlüftung	6
2.4	Einfluss des Luftreiniger Volumenstroms (Faktor b)	9
2.5	Einfluss der Luftreiniger Filtereffizienz (Faktor b)	9
2.6	Einfluss der Fensterlüftungsintervalle (Faktor b)	10
2.7	Einfluss der Fensterlüftungseffizienz (Faktor b)	10
2.8	Einfluss der Atemkonzentration (Faktor a)	11
2.9	Einfluss der Atemmenge (Faktor a)	11
2.10	Einfluss der Viruslebensdauer	12
2.11	Einfluss der Raumgröße (Faktor a und b)	12
2.12	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, nur AG läuft	13
2.13	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Nur LR läuft	13
2.14	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, LR und AG laufen	13
2.15	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, nur AG läuft	13
2.16	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet	14
2.17	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet, AG läuft	14
2.18	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet, LR und AG laufen	14
2.19	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, LR läuft	14
2.20	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet	15
2.21	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet, LR läuft	15

4 Tabellenverzeichnis