

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

24. Mai 2022

LR Luftreiniger

AG Aerosol Generator

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	4
2.2	Bildung einer Modellfunktion	4
2.2.1	Einstellen eines Gleichgewichts	6
2.2.2	Abbau der Partikel	6
2.2.3	Absterben der Viren	7
2.3	Bewertung der Einflussfaktoren	8
2.3.1	Einfluss des Luftreinigers	10
2.3.2	Einfluss der Fensterlüftung	11
2.3.3	Einfluss der Aktivität	13
2.3.4	Einfluss der Viruslebensdauer	14
2.3.5	Einfluss der Raumgröße	14
2.4	Vergleich mit experimentellen Daten	15
3	Wärmeverluste durch Lüftung	19
4	Literaturverzeichnis	20
5	Abbildungsverzeichnis	21
6	Tabellenverzeichnis	22

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 (LR)
- 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.

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

Neue Formelzeichen:

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

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

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

Neue Formelzeichen:

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

2.1.3 Abbau der Partikel durch Lüften

Das Lüften findet immer in Intervallen $t_{\text{ventintervall}}$ für eine Dauer von $t_{\text{ventduration}}$ statt und wird zu den anderen Zeiten übersprungen. Dabei liegt die Lüftungsdauer im Lüftungsintervall, das heißt die Fenster sind für $t_{\text{ventintervall}} - t_{\text{ventduration}}$ geschlossen. Durch Lüften verdünnt sich quasi die Raumluft. Das bisherige Modell bezog den Luftaustausch auf die Lüftungsdauer. Damit wurde die Partikel-Anzahl beschreiben durch:

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

Neue Formelzeichen:

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

Das Problem damit ist, das sich bei Verlängerung der Lüftungsdauer die ausgetauschte Luftmenge die gleiche blieb. Das entspricht jedoch nicht der Wirklichkeit. Daher ist es sinnvoller, eine Luftwechselrate zu definieren, die auf eine Stunde bezogen ist. Für Zeitschritte, die eine Sekunde lang sind ergibt sich so:

$$P_{\text{room},t+1} = P_{\text{room},t} \cdot \left(1 - \frac{n_{\text{vent}}}{60 \text{ min/h} \cdot 60 \text{ s/min}} \right) \quad (2.7)$$

Neue Formelzeichen:

n_{vent}	Luftwechselrate durch Lüften (Raumvolumen/Luftaustauschstrom bezogen auf eine Stunde, 1/h)
-------------------	--

Für die Umrechnung kann man beide Werte einfach gleichsetzen:

$$\frac{n_{\text{vent}}}{60 \text{ min/h} \cdot 60 \text{ s/min}} = \frac{\eta_{\text{vent}}}{t_{\text{vent}}} \quad (2.8)$$

$$n_{\text{vent}} = \frac{\eta_{\text{vent}}}{t_{\text{vent}}} \cdot 60 \text{ min/h} \cdot 60 \text{ s/min} \quad (2.9)$$

Für den bisherigen Standardwert von $\eta_{\text{vent}} = 0.5$ und $t_{\text{vent}} = 5 \text{ min}$ ergibt sich:

$$n_{\text{vent}} = \frac{0.5}{5 \text{ min}} \cdot 60 \text{ min/h} = 6 \quad (2.10)$$

Das heißt, das bei dauerhaft geöffnetem Fenster eine Luftwechselrate von 6 erreicht werden würde.

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.

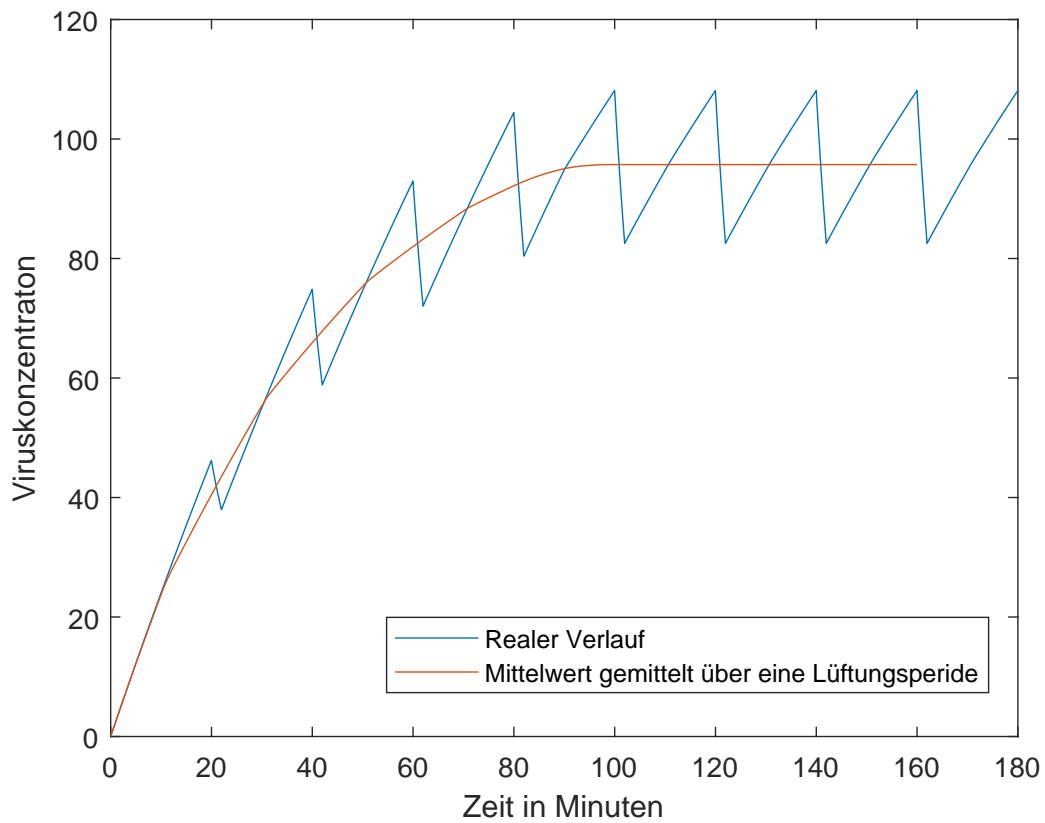


Abbildung 2.1: Entwicklung der Partikel-Konzentration im Raum

Für die Modellfunktion ist es sinnvoll, sich eine Stoffbilanz für den Raum zu betrachte. Diese lässt sich formulieren als:

$$\text{Konzentrationsänderung} = \text{Partikelgeneration} - \text{LR} - \text{Fensterlüftung} \quad (2.11)$$

$$\frac{dc}{dt} = \frac{c_{\text{breath}} \dot{V}_{\text{breath}}}{V_{\text{Room}}} - c V_{\text{ap}} \eta_{\text{ap}} - c n_{\text{vent}} \frac{t_{\text{ventduration}}}{t_{\text{ventintervall}}} \quad (2.12)$$

$$\frac{dc}{dt} = \frac{c_{\text{breath}} \dot{V}_{\text{breath}}}{V_{\text{Room}}} - c \left(V_{\text{ap}} \eta_{\text{ap}} + n_{\text{vent}} \frac{t_{\text{ventduration}}}{t_{\text{ventintervall}}} \right) \quad (2.13)$$

$$\frac{dc}{dt} = a - bc \quad (2.14)$$

mit

$$a = c_{\text{breath}} \frac{\dot{V}_{\text{breath}}}{V_{\text{room}}} \quad (2.15)$$

$$b = n_{\text{vent}} \frac{t_{\text{ventduration}}}{t_{\text{ventintervall}}} + \frac{\dot{V}_{\text{ap}} \eta_{\text{ap}}}{V_{\text{room}}} \quad (2.16)$$

Diese Funktion lässt sich nun umstellen.

$$\frac{dc}{a - bc} = dt \quad (2.17)$$

$$\int \frac{1}{a - bc} dc = \int 1 dt \quad (2.18)$$

$$\frac{\ln(a - bc)}{-b} = t + konst. \quad (2.19)$$

$$a - bc = konst. \cdot e^{-bt} \quad (2.20)$$

$$c(t) = \frac{a - konst. \cdot e^{-bt}}{b} \quad (2.21)$$

Um die Konstante zu bestimmen, ist es interessant, sich Grenzwerte anzuschauen.

2.2.1 Einstellen eines Gleichgewichts

Für einen Raum, der vorher nicht genutzt wurde gilt näherungsweise:

$$\lim_{t \rightarrow 0} c(t) = 0 \quad (2.22)$$

$$\frac{a - konst. \cdot e^{-b0}}{b} = 0 \quad (2.23)$$

$$a - konst. = 0 \quad (2.24)$$

$$konst. = a \quad (2.25)$$

Damit ergibt sich:

$$c(t) = \frac{a}{b}(1 - konst. \cdot e^{-bt}) \quad (2.26)$$

2.2.2 Abbau der Partikel

Für den Abbau der Partikel im Raum ohne die Bildung neuer Partikel gilt:

$$a = 0 \quad (2.27)$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} c(t) = c_0 \quad (2.28)$$

$$\frac{0 - konst. \cdot e^{-b0}}{b} = c_0 \quad (2.29)$$

$$konst. = -c_0 b \quad (2.30)$$

$$(2.31)$$

Damit ergibt sich:

$$c(t) = c_0 \cdot e^{-bt} \quad (2.32)$$

2.2.3 Absterben der Viren

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:

$$c(t) = \frac{a}{b} \cdot (1 - e^{-b \cdot \min(t, t_{\text{vir}})}) \quad (2.33)$$

bzw.

$$c(t) = \begin{cases} c_0 \cdot e^{-bt} & t < t_{\text{vir}} \\ 0 & t \geq t_{\text{vir}} \end{cases} \quad (2.34)$$

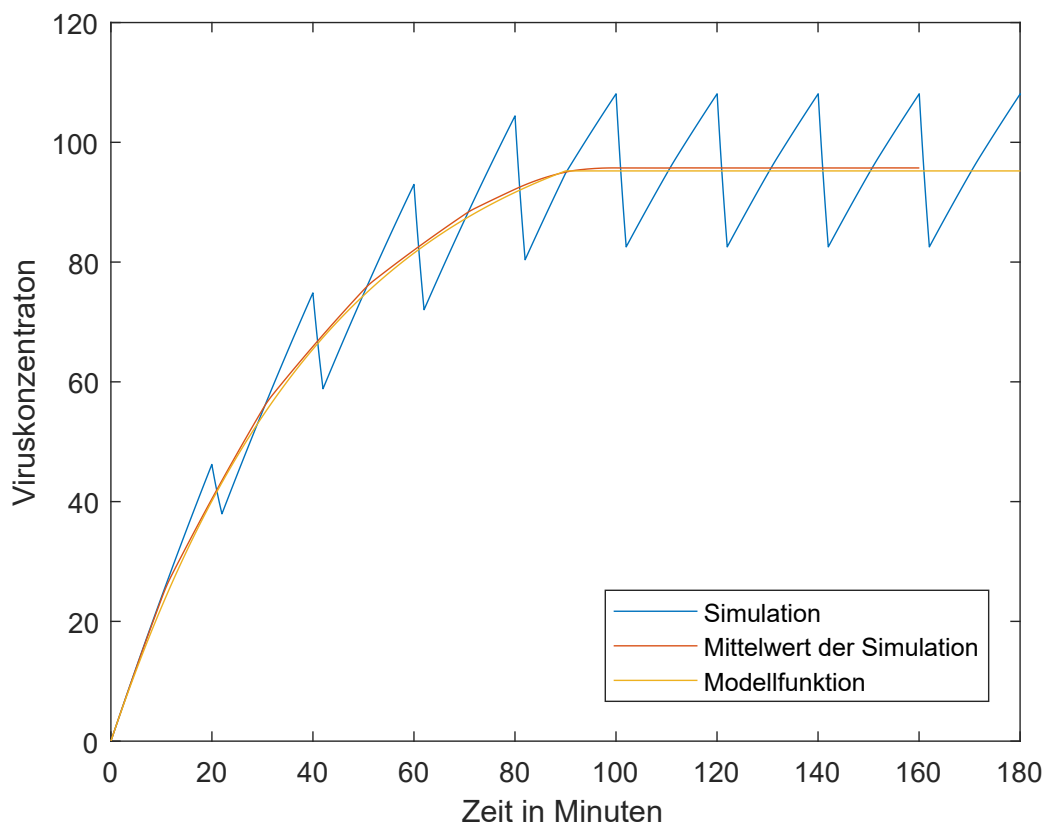


Abbildung 2.2: Vergleich der Modellfunktion mit der Simulation bei guter Raumlüftung

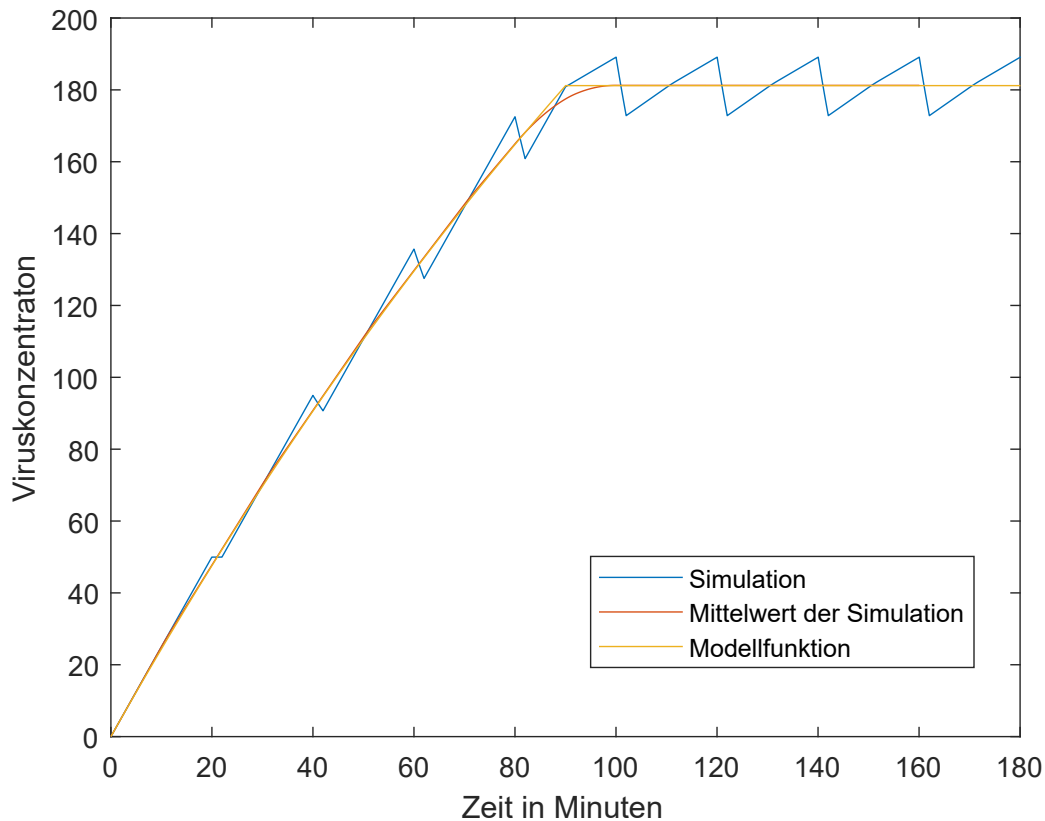


Abbildung 2.3: Vergleich der Modellfunktion mit der Simulation bei schlechter Raumlüftung

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

2.3 Bewertung der Einflussfaktoren

Mit Hilfe von Gleichung 2.33 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 exponentielle 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 LRs und Partikel-Abbau durch das Lüften sich sehr ähnlich verhalten. Diese Eigenschaft wird häufig in der Luftwechselrate n zusammengefasst.

$$n = \frac{\dot{V}}{V_{\text{room}}} \quad (2.35)$$

Mit Gleichung 2.16 lassen sich die beiden Lüftungseffekte als Luftwechselraten darstellen:

$$n_{\text{ap}} = \frac{\dot{V}_{\text{ap}} \eta_{\text{ap}}}{V_{\text{room}}} \quad (2.36)$$

$$n_{\text{vent,eff}} = n_{\text{vent}} \frac{t_{\text{ventduration}}}{t_{\text{ventintervall}}} \quad (2.37)$$

$$b = n_{\text{ap}} + n_{\text{vent,eff}} \quad (2.38)$$

n_{ap} Luftwechselrate des Luftreinigers

$n_{\text{vent,eff}}$ Effektive Luftwechselrate durch das Lüften

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
$t_{\text{ventduration}}$	5 min
$t_{\text{ventintervall}}$	20 min

Für Analysen zum Luftreiniger:

n_{vent}	0
η_{ap}	0.95

Sonst:

n_{vent}	6
η_{ap}	0.0

Da in den meisten Fällen entweder ein LR 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 wurden jeweils sinnvolle Bereiche verwendet, da eine Effizienz über 1 nicht sinnvoll wäre.

2.3.1 Einfluss des Luftreinigers

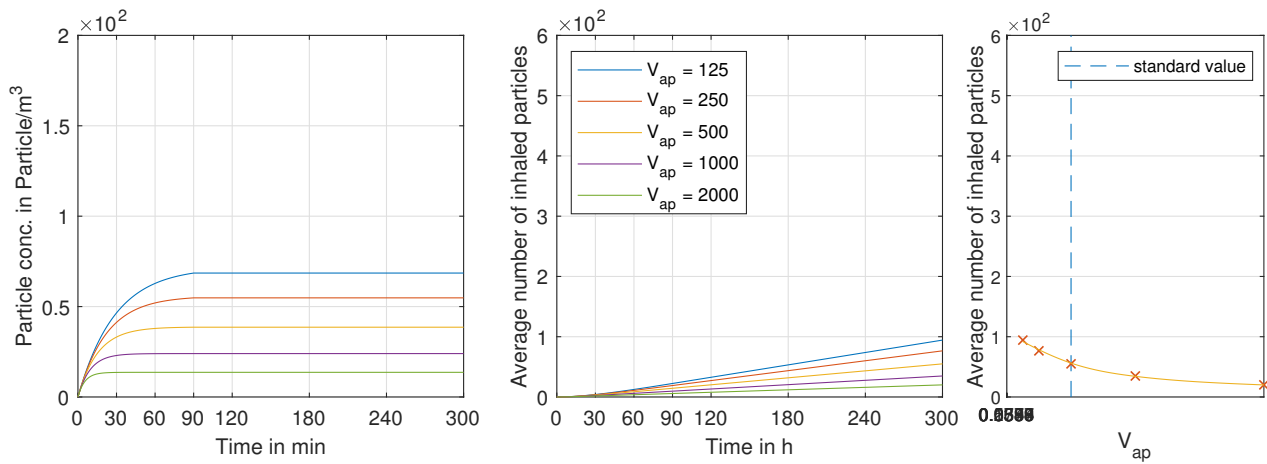


Abbildung 2.4: Einfluss des LR Volumenstroms (Faktor b)

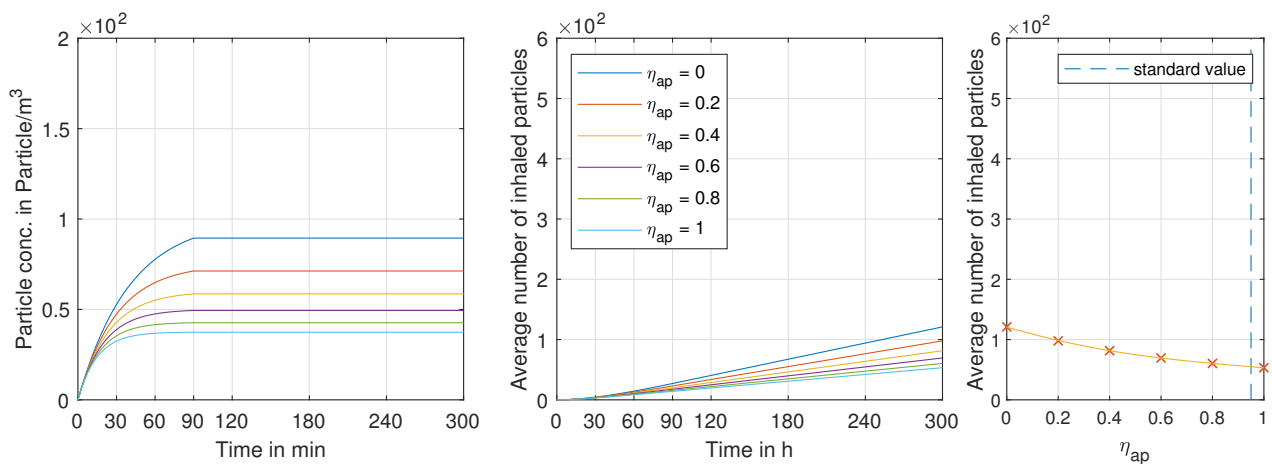


Abbildung 2.5: Einfluss der LR Filtereffizienz (Faktor b)

Bereits ein geringer Volumenstrom einer LRs 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

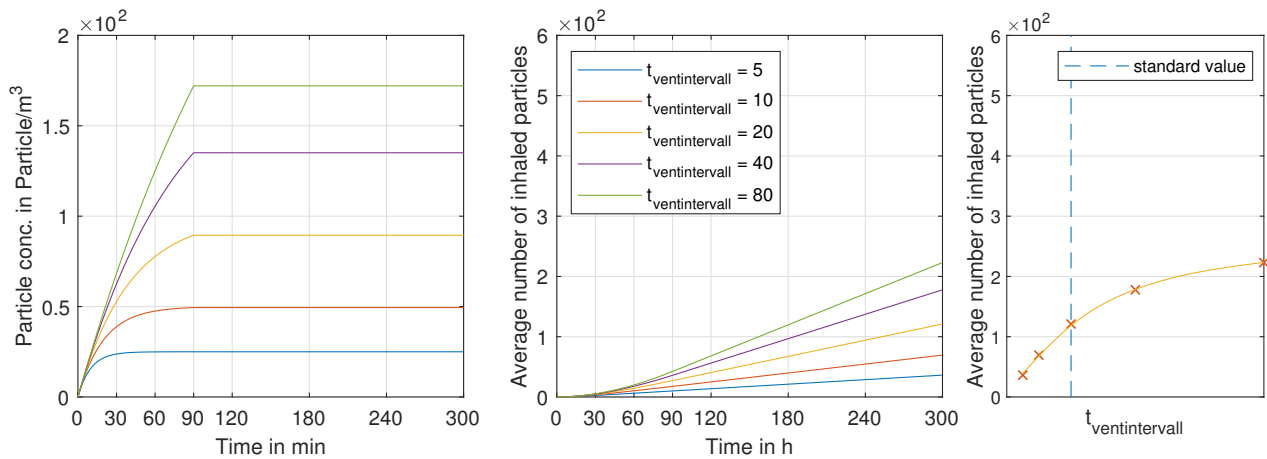


Abbildung 2.6: Einfluss der Fensterlüftungsintervalle (Faktor b)

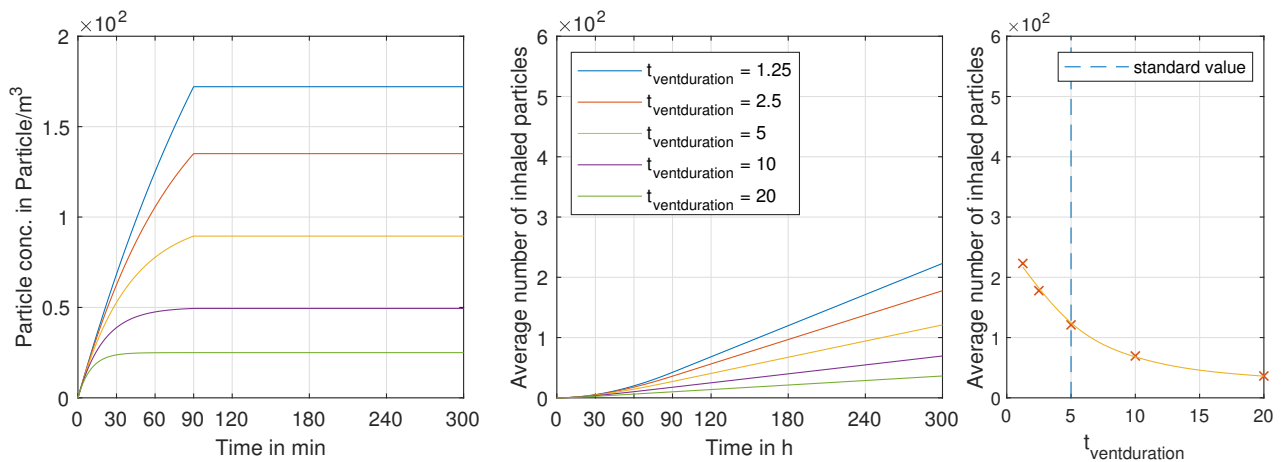


Abbildung 2.7: Einfluss der Fensterlüftungsintervalle (Faktor b)

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. Zudem ist eine regelmäßige Lüftung notwendig.

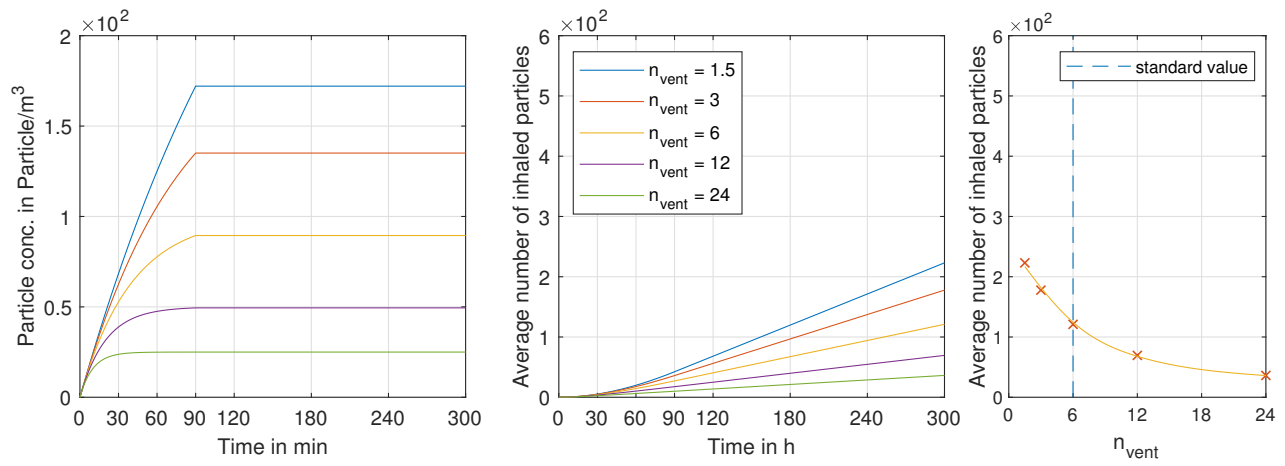


Abbildung 2.8: Einfluss der Fensterlüftungseffizienz (Faktor b)

2.3.3 Einfluss der Aktivität

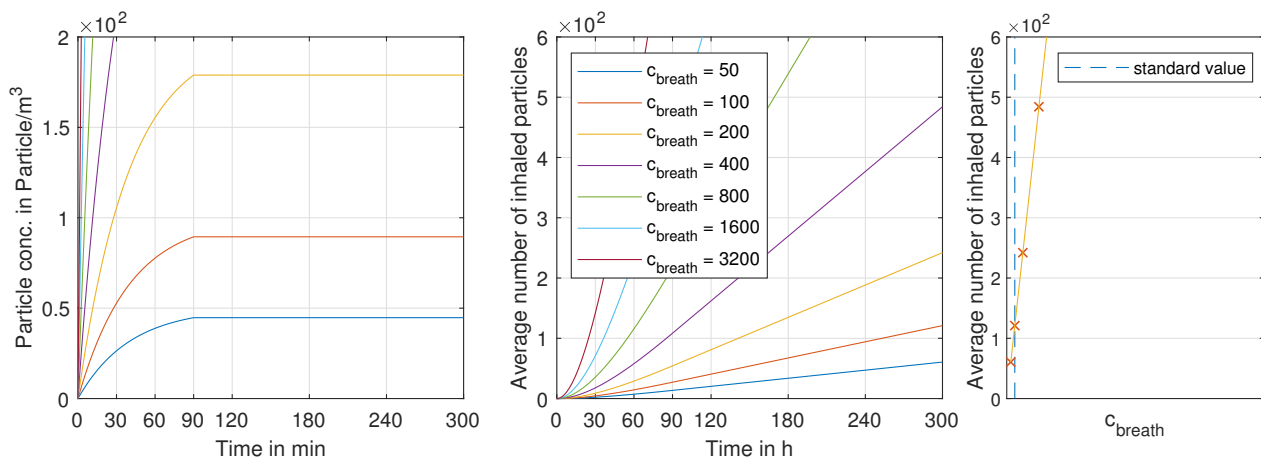


Abbildung 2.9: Einfluss der Atemkonzentration (Faktor a)

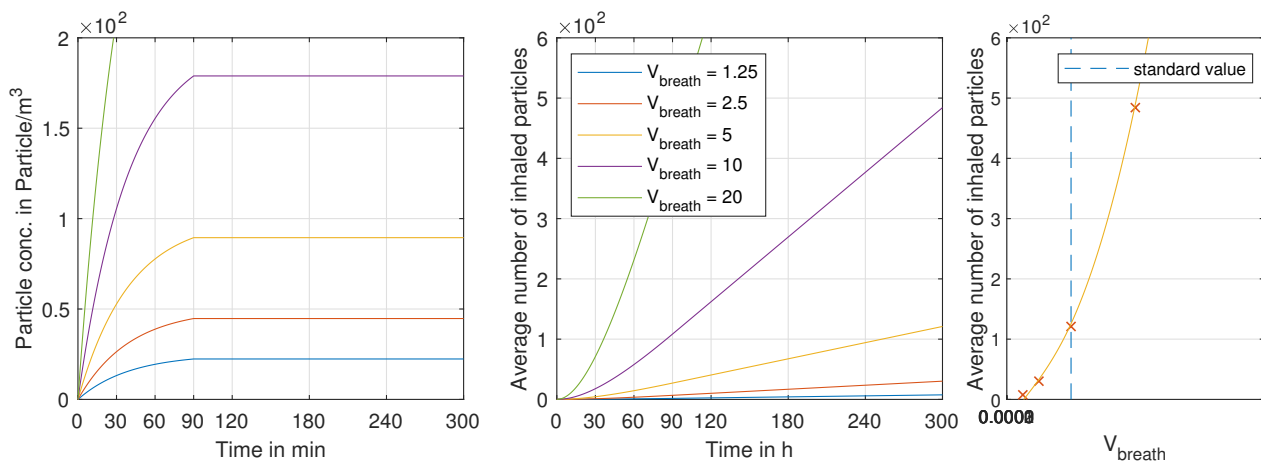


Abbildung 2.10: Einfluss der Atemmenge (Faktor a)

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

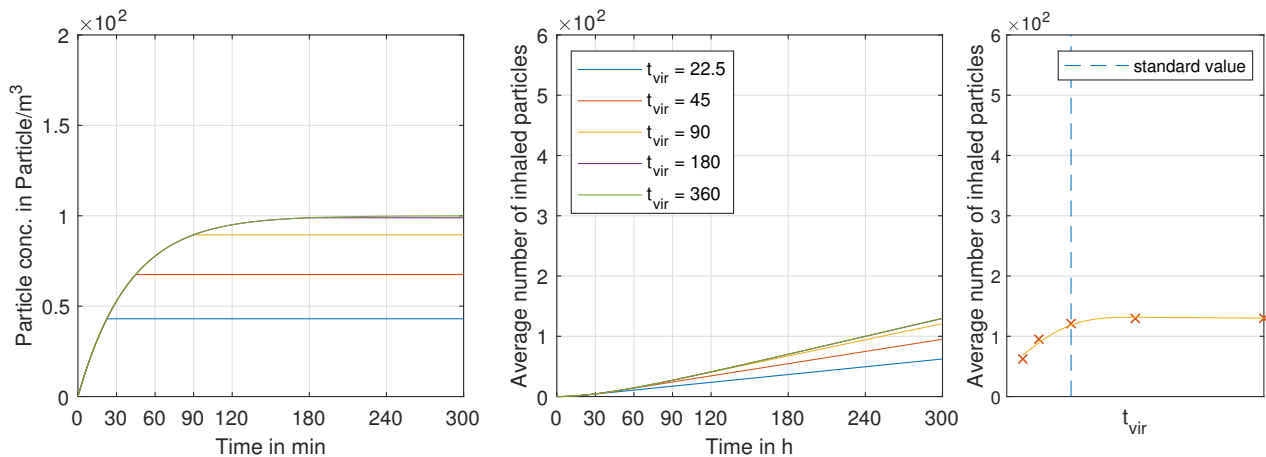


Abbildung 2.11: Einfluss der Viruslebensdauer

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

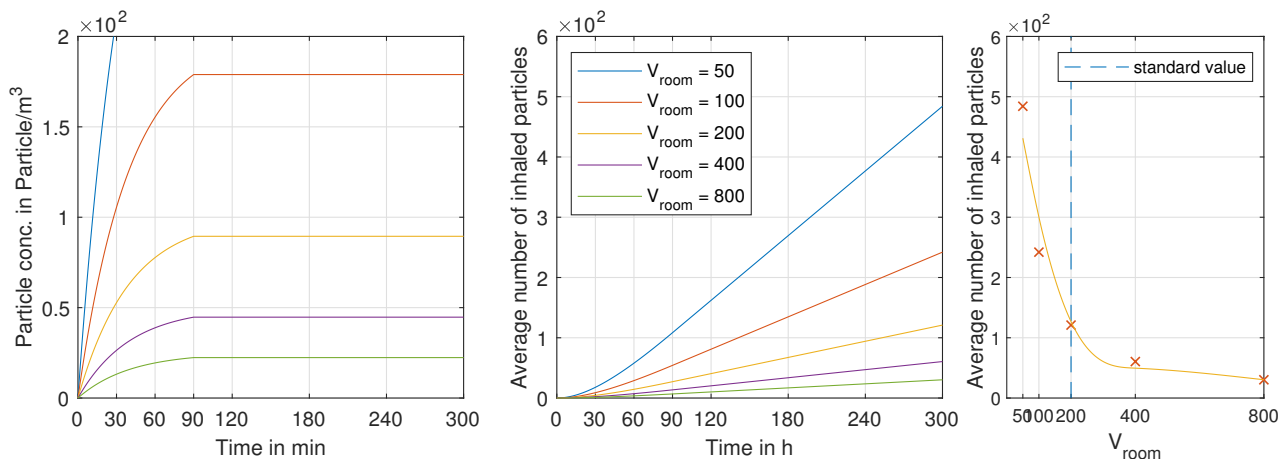


Abbildung 2.12: Einfluss der Raumgröße (Faktor a und b)

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.)

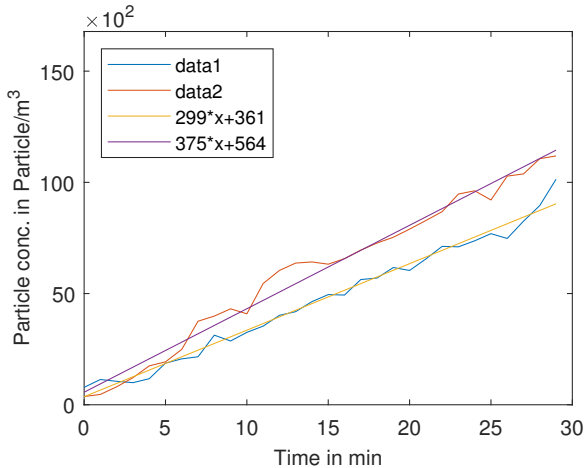


Abbildung 2.13: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, nur AG läuft

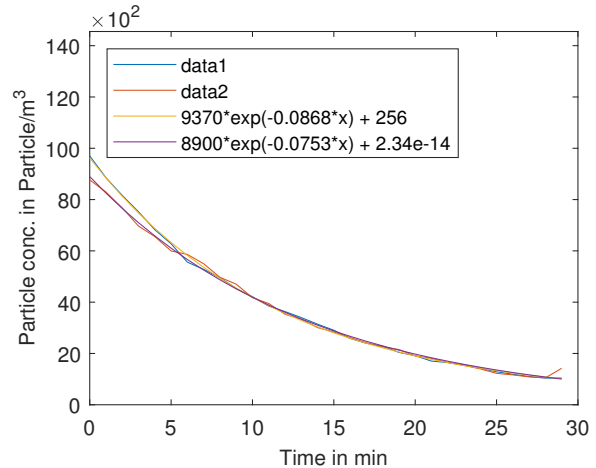


Abbildung 2.14: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Nur LR läuft

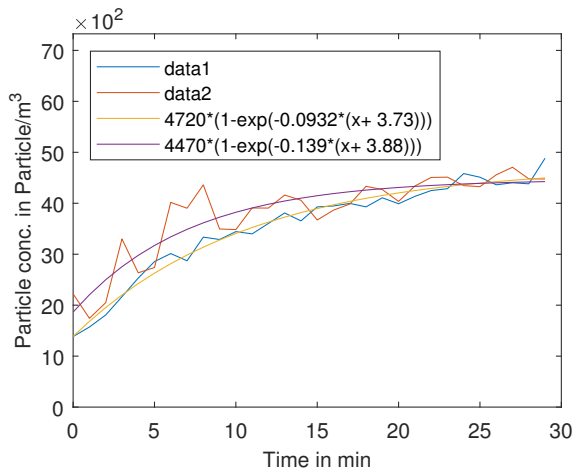


Abbildung 2.15: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, LR und AG laufen

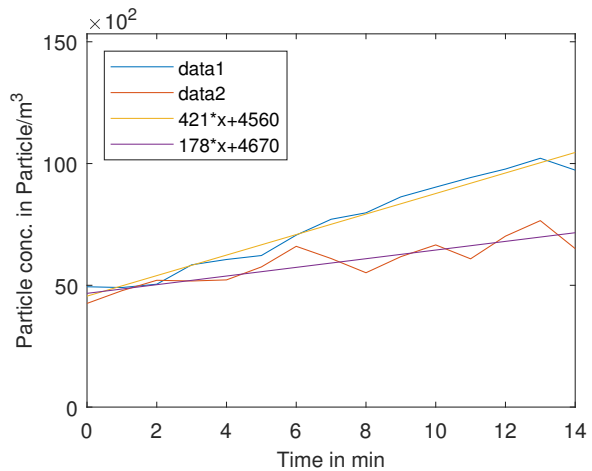


Abbildung 2.16: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, nur AG läuft

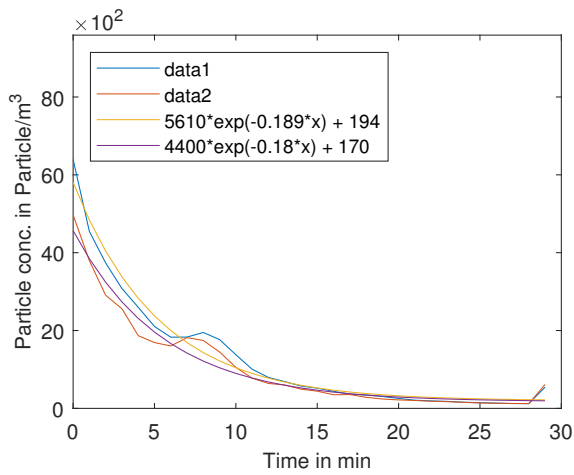


Abbildung 2.17: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet

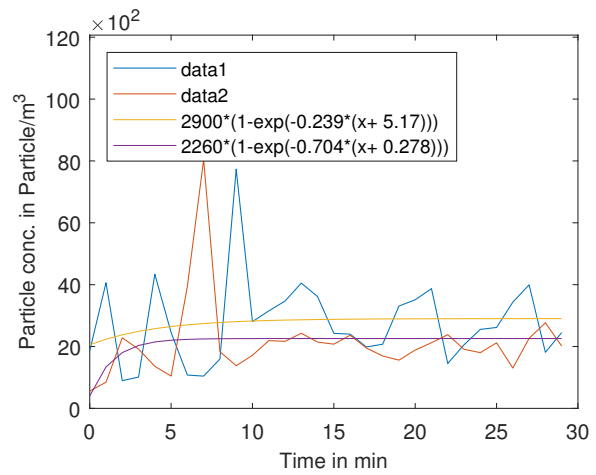


Abbildung 2.18: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet, AG läuft

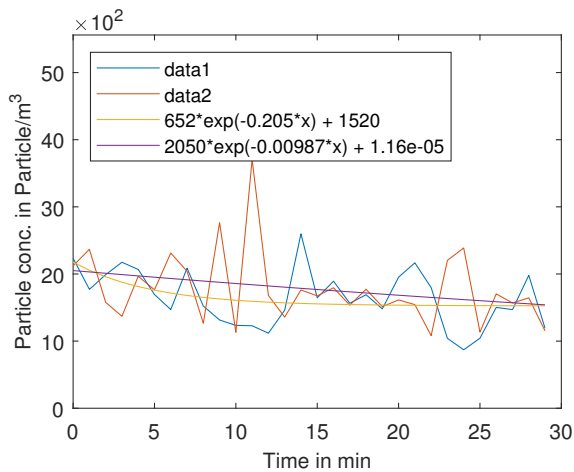


Abbildung 2.19: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet, LR und AG laufen

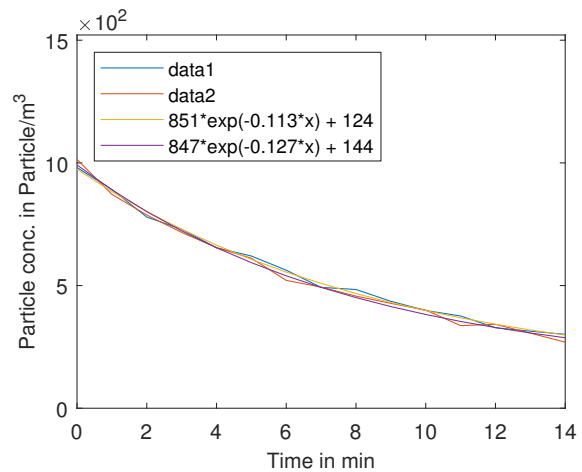


Abbildung 2.20: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, LR läuft

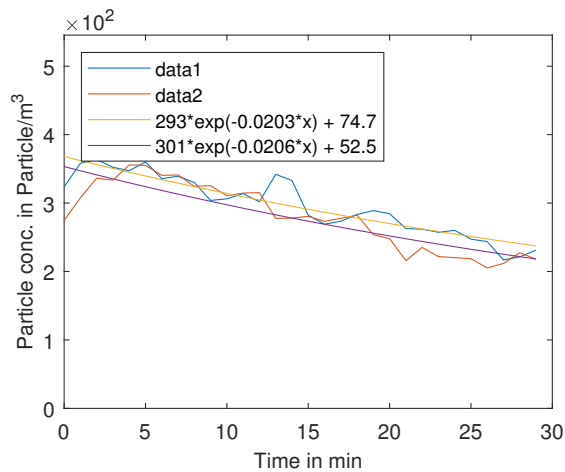


Abbildung 2.21: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet

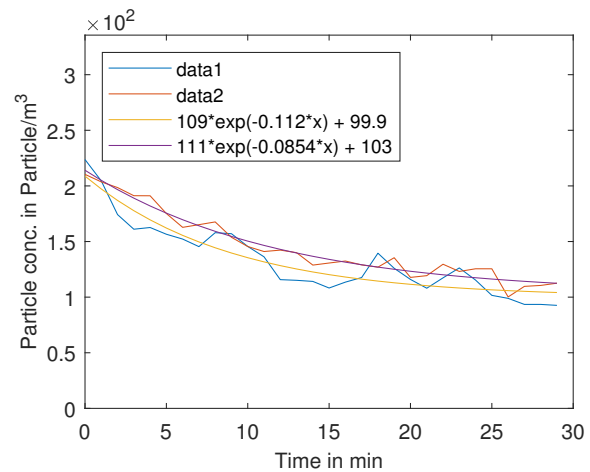


Abbildung 2.22: Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet, LR läuft

Aus Abbildung 2.13 kann die Partikelbildung durch Aerosol Generator (AG) berechnet werden. Es ist aber zu beachten, dass die Werte um fast 25% voneinander abweichen. Dafür muss der Anstieg der Partikeldichte mit dem Raumvolumen multipliziert werden:

$$\dot{n} = c_t \cdot V_{\text{room}} \quad (2.39)$$

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.

Aus Abbildung 2.14, 2.15 und 2.20 kann der Parameter b bezüglich des LRs validiert werden. Nach dem Modell müsste der Parameter b sich ergeben zu:

$$b = \frac{1000/3600 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 0.995}{186 \text{ m}^3} \quad (2.40)$$

$$= 0.001486/\text{s} \quad (2.41)$$

$$= 0.089158/\text{min} \quad (2.42)$$

Dieser liegt für den reinen Abbau der Partikel in Abbildung 2.14 etwas über dem erwarteten Wert. Für Abbildung 2.20 gibt es eine relative gute Übereinstimmung. In Abbildung 2.15 etwas darüber. Das kann verschiedene Gründe haben. Zum einen sind die Schwankungen der Messdaten relativ hoch, so dass es hier zu Fehlern gekommen sein könnte. Allein zwischen den Parametern der einzelnen Funktionen in Abbildung 2.15 gibt es eine Abweichung von fast 40%. Zum anderen könnte die Annahme der idealen Durchmischung, also des 0-D-Modells, nicht ganz die Wirklichkeit widerspiegeln. Gerade bei einer so hohen Konzentration durch den AG können sich räumlich Gradienten sowie Partikelwolken ausbilden, die die Messdaten verfälschen.

Aus der Partikelbildungsrate lässt sich auch nun noch der Faktor a berechnen:

$$a1 = \frac{11\,160 \text{ particle/L} \cdot 5/60 \text{ L/s}}{186 \text{ m}^3} \quad (2.43)$$

$$= 5 \text{ particle/s/m}^3 \quad (2.44)$$

$$a2 = \frac{13\,950 \text{ particle/L} \cdot 5/60 \text{ L/s}}{186 \text{ m}^3} \quad (2.45)$$

$$= 6.25 \text{ particle/s/m}^3 \quad (2.46)$$

$$(2.47)$$

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

$$\frac{a1}{b} = 3364 \text{ particle/m}^3 \quad (2.48)$$

$$\frac{a2}{b} = 4206 \text{ particle/m}^3 \quad (2.49)$$

$$\frac{a1 + a2}{2b} = 3785 \text{ particle/m}^3 \quad (2.50)$$

Auch hier kommt es zu einer Abweichung von 20% vom Mittelwert.

Mit Hilfe von Abbildung 2.17 kann auch der Lüftungsfaktor bestimmt werden. Da das Lüften kontinuierlich stattfand, wird das Verhältnis von $t_{\text{ventduration}}$ zu $t_{\text{ventintervall}}$ eins. Für die Umrechnung des Exponenten muss der Bezug auf eine Stunde angepasst werden:

$$n_{\text{vent}} = \frac{0.155/\text{min} + 0.165/\text{min}}{2} \cdot 60 \text{ min/h} n_{\text{vent}} = 9.6/\text{h} \quad (2.51)$$

Es ist jedoch zu beachten, das meist nicht richtig quer gelüftet wird, sondern die Tür(-en) geschlossen bleiben. In einem Zweiten versuch wurden daher verschiedene Arten zu lüften untersucht. [1, S. 927]

3 Wärmeverluste durch Lüftung

Durch das häufige Lüften im Raum kommt es zu relativ hohen Wärmeverlusten. Da die Ausgetauschte Luft auch die Wärme mit sich trägt, kann man über die notwendige Lüftung die Verluste bestimmen. Für das allgemeine Verhalten bietet sich wieder eine DGL an.

$$\frac{dT}{dt} = \dot{W}_{\text{heiz}} + \dot{W}_p - (T_{\text{in}} - T_{\text{out}}(t))c_p \varrho n_{\text{vent}} \frac{t_{\text{ventduration}}}{t_{\text{ventintervall}}} \quad (3.1)$$

Neue Formelzeichen:

\dot{Q}_{heiz}	Wärmeleistung durch Heizung
\dot{W}_p	Wärmeleistung durch Personen im Raum
T_{out}	Außentemperatur
T_{in}	Innentemperatur
c_p	Wärmekapazität Luft
ϱ	Dichte Luft

Ideal betrachtet sollte sich die Raumtemperatur nicht ändern, das heißt, die zeitliche Ableitung geht gegen 0. Damit lässt sich die Heizleistung berechnen nach:

$$\dot{W}_{\text{heiz}} = (T_{\text{out}}(t) - T_{\text{in}})c_p \varrho V_{\text{room}} n_{\text{vent}} \frac{t_{\text{ventduration}}}{t_{\text{ventintervall}}} - \dot{W}_p \quad (3.2)$$

Da die Außentemperatur nur linear abhängig ist, kann hier auch eine Jahresdurchschnitt gebildet werden. Mit den Daten aus [2] ergibt sich ein Jahresmittel von 8.78 °C. Die Innentemperatur soll bei 22 ± 1 °C [1, S. 109] liegen. Die Wärmeleistung eines Menschen liegt bei 60 - 80 Watt in Ruhe. Eine Schulklasse besteht aus 20-25 Schülern. Damit ergibt sich:

$$\dot{W}_{\text{heiz}} = (22 - 8.78)\text{K} \cdot 1 \text{ kJ}/(\text{kg K}) \cdot 1.225 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 200 \text{ m}^3 \cdot 9.6/\text{h} \cdot \frac{5}{25} - 22 \cdot 70 \text{ W} \quad (3.3)$$

4 Literaturverzeichnis

- [1] H. Recknagel and E.R. Schramek. *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 09/10*. Number Bd. 74. Oldenbourg Industrieverlag, 2009.
- [2] A. Sievers. Klimadaten deutschland. <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klimadatendeutschland.html>, 23.05.2022.

5 Abbildungsverzeichnis

2.1	Entwicklung der Partikel-Konzentration im Raum	5
2.2	Vergleich der Modellfunktion mit der Simulation bei guter Raumlüftung	7
2.3	Vergleich der Modellfunktion mit der Simulation bei schlechter Raumlüftung	8
2.4	Einfluss des LR Volumenstroms (Faktor b)	10
2.5	Einfluss der LR Filtereffizienz (Faktor b)	10
2.6	Einfluss der Fensterlüftungsintervalle (Faktor b)	11
2.7	Einfluss der Fensterlüftungsintervalle (Faktor b)	11
2.8	Einfluss der Fensterlüftungseffizienz (Faktor b)	12
2.9	Einfluss der Atemkonzentration (Faktor a)	13
2.10	Einfluss der Atemmenge (Faktor a)	13
2.11	Einfluss der Viruslebensdauer	14
2.12	Einfluss der Raumgröße (Faktor a und b)	14
2.13	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, nur AG läuft	15
2.14	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Nur LR läuft	15
2.15	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, LR und AG laufen	15
2.16	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, nur AG läuft	15
2.17	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet	16
2.18	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet, AG läuft	16
2.19	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet, LR und AG laufen	16
2.20	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, LR läuft	16
2.21	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet	17
2.22	Entwicklung der Partikel-Konzentration über der Zeit, Fenster und Tür geöffnet, LR läuft	17

6 Tabellenverzeichnis