

GEGENÜBERSTELLUNG VON LUFTREINIGUNGSMETHODEN GEGEN SARS-COV-2 VIREN ANHAND ZONALER STRÖMUNGSSIMULATIONEN

Thomas Brunner¹, Christina Matheis², Victor Norrefeldt³, Gunnar Grün⁴

¹ Universität Stuttgart, Deutschland, E-Mail: thomas.brunner@iabp.uni-stuttgart.de

² Fraunhofer Institut IBP, Deutschland, E-Mail: christina.matheis@ibp.fraunhofer.de

³ Fraunhofer Institut IBP, Deutschland, E-Mail: victor.norrefeldt@ibp.fraunhofer.de

⁴ Universität Stuttgart, Deutschland, E-Mail: gunnar.gruen@iabp.uni-stuttgart.de

1. Kurzfassung

In diesem Beitrag wird die Ausbreitung von Viren wie SARS-CoV-2 über luftgetragene Aerosole untersucht. Dazu werden mittels einer zonalen Simulationsmethode, dem VEPZO-Modell (Velocity Propagating zonal Model) (V. Norrefeldt et al. 2012), verschiedene Szenarien in einem 2-Personen-Büro untersucht. Das Aufteilen des Büroraumes in kleine Zonen ermöglicht eine schnellere Berechnung der Strömungsmuster im Innenraum und stellt eine gute Alternative zu aufwendigen CFD Simulationen dar. Auf dieser Basis werden Fragestellungen zum Einsatz von Luftreinigern und ein Quervergleich zur Fensterlüftung betrachtet.

This paper aims to explore the spread of viruses such as SARS-CoV-2 via airborne aerosols. For this purpose, a zonal simulation method, the VEPZO model (Velocity Propagating zonal Model) (V. Norrefeldt et al. 2012), is used and different scenarios in a 2-person office are investigated. The division of the office space into small zones allows a faster calculation of the flow patterns in the interior and is a good alternative to complex CFD simulations. On this basis, questions regarding the use of air cleaners and a cross-comparison with window ventilation are answered.

2. Einleitung

Luftreinigungssysteme gewinnen verstärkt durch die Corona-Pandemie an immer größerer Bedeutung in unserem Alltag. Für eine möglichst effiziente Nutzung sollten die Geräteeigenschaften den Anforderungen des Raumtyps entsprechen. Für die Untersuchung von Luftreinigern sind reale Messungen bedeutsam und können mit Simulationen unterstützt werden.

Für die Validierung der Simulationsmodelle wurden Messungen eines fiktiven 2-Personen-Büros im Labor durchgeführt. Der Messaufbau umfasst einen Luftreiniger, eine Aerosolquelle und sechs Partikelspektrometer zur Detektion der Partikelkonzentrationen. Zudem bilden Heiz-Dummies die internen Wärmequellen wie Gebäudenutzer oder elektronische Geräte ab. Im Simulationsmodell wird

durch eine grobmaschige Unterteilung des Raumes in kleine Zonen die Berechnungszeit im Gegensatz zu detaillierten Strömungssimulationen niedrig gehalten. Das Modell erlaubt eine zügige Auswertung verschiedener Raum- und Geräteparameter, sodass aufwendige Messungen auf ein notwendiges Minimum reduziert werden können. Der geringe Zeitaufwand für die Simulationsberechnungen führt zu effizienten Parameterstudien.

3. Simulation und Experiment

Bei zonalen Simulationsmodellen ist die Auflösung der Simulationsergebnisse an die Anzahl der Zonen gekoppelt. Wie in Abbildung 1 dargestellt ist, führen eine 1-zonale und multizonale Darstellung, wie es zum Beispiel die raumweise Betrachtung in der klassischen Gebäudesimulation betrifft, zu niedrigen Rechenzeiten. Die Konzentrationen in der Luft von beispielsweise Aerosoldichten können dabei nicht räumlich aufgelöst und aus den Simulationsdaten abgeleitet werden, sodass solche Modelle für eine Analyse eines Infektionsrisikos unzureichend sind.




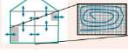
Modell	Schema	Rechenzeit	Auflösung
Ein Bilanzraum		Niedrig	Nein
Multizonen		Niedrig	Niedrig
VEPZO Zonal		Mittel	Mittel
CFD		Hoch	Hoch

Abbildung 1: Darstellung von Strömungssimulationen bezüglich ihrer Rechenzeit und Auflösung

Bei dem VEPZO-Modell (V. Norrefeldt et al. 2012) wird die zu simulierende Geometrie in 100 bis 1.000 Zonen unterteilt, welche im Luftaustausch zueinander stehen. Durch den Ansatz der Massenerhaltung werden die ein- und ausströmenden Luftmassen aufsummiert und die damit resultierenden Aerosolkonzentrationen bestimmt (V. Norrefeldt et al. 2012). Der zonale Ansatz verkürzt die

Berechnungsdauer auf wenige Minuten, sowie die Hardwareanforderungen auf gängige Computersysteme.

Im Bereich der Strömungssimulationen zeichnet sich die CFD-Simulation (Computational Fluid Dynamics) durch hohe Auflösungen aus – bei Berechnungszeiten von mehreren Stunden bis Tagen, welche für die zügige Parametervariation zu aufwendig sind.

3.1 Das VEPZO-Modell

Die objekt- und gleichungsorientierte Programmiersprache „Modelica“ wurde für die Implementierung der Modelle verwendet (The Modelica Association 31.03.2022). Für den Modellaufbau werden Daten des Luftreinigers, der Virenquelle und die inneren Wärmelasten, sowie definierte thermische Randbedingungen eingepflegt. Die Unterteilung der Raumgeometrie in eine dreidimensionale Gitterstruktur führt zu einzelnen Zonen, welche über Strömungspfade an den Grenzflächen miteinander verbunden sind. Die Knotenpunkte werden in Abbildung 2 schematisch in einer 2D-Darstellung aufgezeigt.

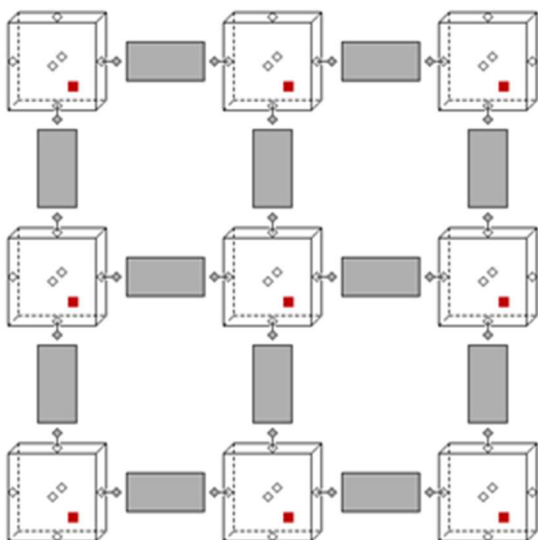


Abbildung 2: Schematische 2D-Darstellung des zonalen Modelles: Unterteilung des Raumes in Zonen (Würfel), diese über Strömungspfade (graue Rechtecke) verbunden sind

Die Eigenschaften der Luft sind als skalare Größen im Volumenmodell hinterlegt. Hier sind ebenfalls die Erhaltung von Massen, Enthalpie, sowie Partikel- und Aerosolkonzentrationen implementiert. Die Summe aller ab- und zufließenden Luftmengen sind im stationären Zustand gleich Null. Im Strömungsmodell wird der Massenfluss zwischen zwei benachbarten Zonen aufgrund der Druckdifferenzen berechnet. Dazu werden die Kräfte durch Druckdifferenz, Impulsdifferenz, Gravitation und Viskosität aufsummiert. Dadurch lassen sich einfache Strömungsmuster erkennen und eine Konzentrationsverteilung der Aerosole berechnen.

3.2 Die Modellvalidierung

Unter Laborbedingungen wurde in einer Nachbildung eines 2-Personen-Büros mit einer Grundfläche von 19,7 m² und einer Höhe von 3,6 m der Einfluss von Luftreinigungsgeräten auf das Aerosolverhalten untersucht. Die Messwerte von insgesamt 6 Partikelspektrometern dienen der Validierung des Simulationsmodells.

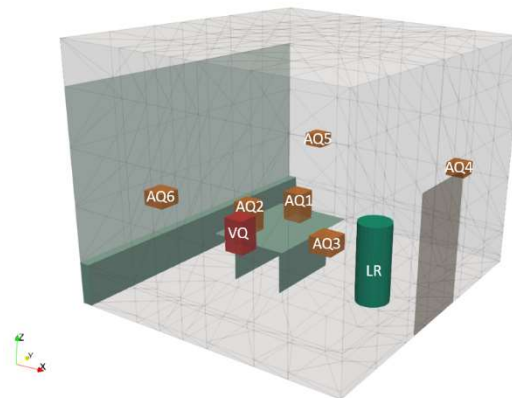


Abbildung 3: Zonierung des 2-Personen-Büros mit Luftreiniger (LR), Virenquelle (VQ) und Messgeräten (AQ1 bis AQ6)

Wie in Abbildung 3 dargestellt, werden die virenhaltigen Aerosole konstant auf Kopfhöhe eines Dummies in der Zone „VQ“ (rot) in den Raum freigesetzt. Der Luftreiniger reduziert gemäß seines Abscheidegrades die Anzahl an Aerosolpartikeln, welche im unteren Teil des Gerätes eingesaugt und im oberen Teil wieder abgegeben werden. Über das Auslesen der simulierten Konzentrationen in den jeweiligen Zonen AQ1 bis AQ6, werden die Abweichungen zu den Messwerten analysiert (T. Brunner et al. 2022).

Die Validierung mit zwei unterschiedlichen Luftreinigern zeigt geringe Abweichungen im eingeschwungenen Zustand der Systeme und größere Differenzen in den anfänglichen 20 Minuten auf. Bei Betrachtung der Messwerte über 70 Minuten ergibt sich bei dem Luftreiniger mit einem maximalen Volumenstrom Q von 900 m³/h eine mittlere Abweichungen von ca. $\pm 30\%$. Das zweite Gerät verfügt über einen maximalen Volumenstrom von 333 m³/h. Dessen Abweichungen betragen dabei -30% bis $+10\%$ (siehe Abbildung 4).

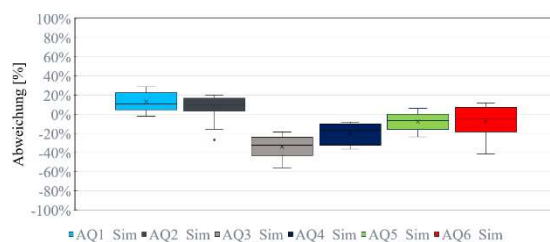


Abbildung 4: Simulationsabweichungen bei Luftreiniger mit Volumenstrom $Q = 333 \text{ m}^3/\text{h}$

3.3 Parameterstudie

In der Parameterstudie wird das validierte Simulationsmodell verwendet, um unterschiedliche Lüftungsszenarien mit Luftreiniger und Fensterlüftung zu untersuchen. Es werden dabei folgende Varianten genauer betrachtet (vgl. Tabelle 1):

Tabelle 1: Lüftungsszenarien Luftreiniger und Fensterlüftung

Szenario	Untersuchung
V0	Referenz ohne Lüftung/Luftreiniger
V1.1	Luftreiniger am Boden (Validierung)
V1.2	Luftreiniger auf Tischhöhe
V2.1	Luftreiniger mit Q = 333 m ³ /h (Boden)
V2.2	Luftreiniger mit Q = 180 m ³ /h (Boden)
V3.1	Fensterlüftung: 3 min alle 4 h
V3.2	Fensterlüftung: 3 min alle 2 h
V3.3	2 Fenster nebeneinander (3 min alle 2 h)

Für die Varianten mit Fensterlüftung werden bis zu zwei Drehfenster mit den Maßen 1,4x2,4 m betrachtet. Diese sind Bestandteile der Glassfassade gegenüber der Tür (vgl. Abbildung 5).

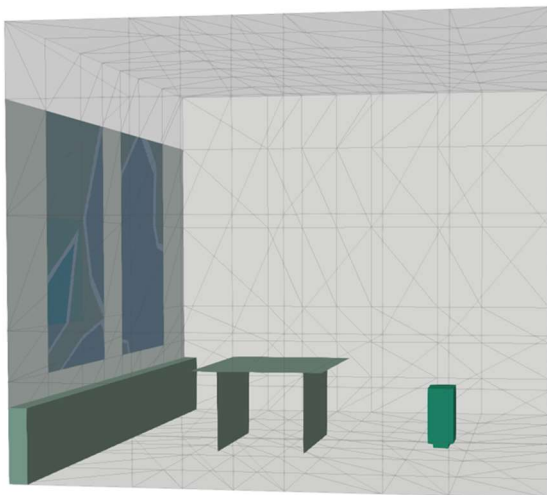


Abbildung 5: Simulationserweiterung mit 2 Schwingfenstern (blau-grau)

Bei den Szenarien mit Fensterlüftung müssen weitere Parameter beachtet werden. Die Differenz zwischen Innenraum- und Außentemperatur wird mit 10 K bei einer gemittelten Temperatur von 290,15 K angenommen. Durch einen Neigungswinkel von 60 Grad entsteht ein Luftaustausch mit einem Volumenstrom von 726 m³/h (1), welche mit einem

Kontraktionsfaktor von 0,4 über eine effektive Fläche von 1,68 m² stattfindet (W. Richter et al. 2003).

$$q = \frac{1}{3} \cdot C_d \cdot B \cdot H \cdot \sqrt{\frac{\Delta T}{T_m} \cdot g \cdot H} \quad (1)$$

q=Volumenstrom für Luftaustausch, C_d=Kontraktionsfaktor, B=Breite, H=Höhe, ΔT=Temperaturdifferenz, T_m=Mitteltemperatur, g=9,81 m/s² (Nordquist B. et al. 1998).

Die Ergebnisse der Simulation werden in quanta/m³ errechnet. "Ein Quanta ist definiert als die Dosis luftgetragener Tröpfchenkerne, die erforderlich ist, um bei 63 % der empfänglichen Personen eine Infektion zu verursachen" (G. Buonanno et al. 2020). Die eingeatmete Virendosis ist dabei abhängig von dem eingeatmeten Volumenstrom, welcher im Sitzen 0,54 m³/h beträgt (D. Müller et al. 2020). Die aufgenommene Dosis an einem Arbeitstag lässt über den Konzentrationsverlauf c_i im Zeitraum (t_{Ende}-t_{Start}) berechnen.

$$D = \dot{V}_{Atem} * \int_{t_{Start}}^{t_{Ende}} c_i(t) dt \quad (2)$$

D=Dosis, \dot{V}_{Atem} =Atemvolumenstrom, t_{Start}=Startzeitpunkt, t_{Ende}=Endzeitpunkt, c_i=Konzentrationswert i

4. Ergebnisanalyse und Diskussion

Die Variante 1.1 mit dem Luftreiniger in bodennaher Position wurde für die Validierung mit den realen Messwerten verwendet. Dies entspricht den gleichen Bedingungen wie Variante V2.1, weshalb für die Analyse dieser Fall nicht weiter betrachtet wird. Für die anderen Szenarien werden in den ersten 10 Minuten keine Viren freigesetzt, damit sich das System einschwingen kann. Ab diesem Zeitpunkt wird ein infizierter Mensch simuliert, welcher einen konstanten Aerosolausstoß von 46,5 quanta/h (M. Kriegel et al. 2020) besitzt.

In Abbildung 6 ist der Quanta-Konzentrationsverlauf an der Position des zweiten Arbeitsplatzes auf Kopfhöhe (1,1 m) dargestellt. Die Konzentration der entsprechenden Zone des VEPZO-Modells werden dabei minütlich ausgelesen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Verwendung eines Luftreinigers die Aerosolmenge stärker reduzieren kann, als die alleinige Fensterlüftung. Die besten Ergebnisse liefert das Szenario V2.1 (bzw. V1.1), bei welchem der Luftreiniger mit maximalen Volumenstrom Q = 333 m³/h auf Bodenhöhe betrieben wird. Die Positionierung auf Tischhöhe (V1.2) schließt besser ab, als die Drosselung des Volumenstroms auf 180 m³/h (V2.2). Daraus folgt die Empfehlung, das Gerät auf einer möglichst hohen Stufe zu betreiben, soweit die Lärmbelastung die Behaglichkeit nicht beeinträchtigt.

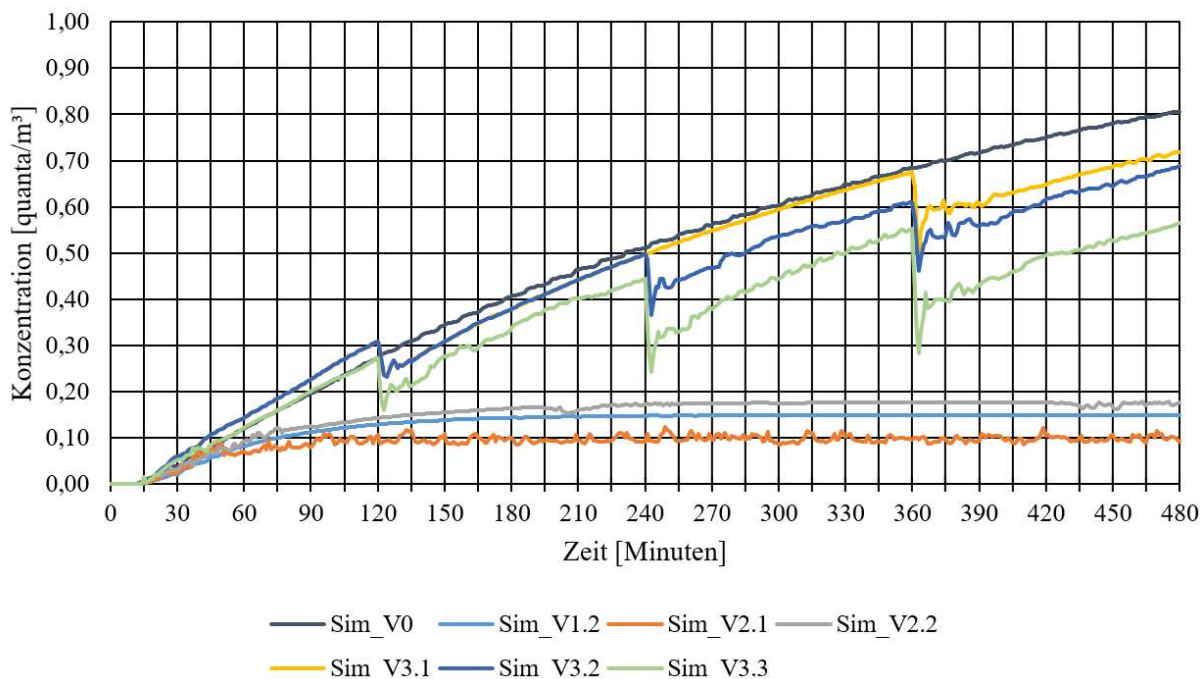


Abbildung 6: Konzentrationsverlauf auf Kopfhöhe der zweiten Person

Bei der Analyse der Fensterlüftung führt ein vermehrtes Lüften zu einer geringeren Aerosolbelastung, ebenso wie die Verwendung einer größeren Fensterfläche. Da der Raum über keine mechanische Lüftung verfügt, stellt sich beim Referenzfall V0 und bei den Lüftungsvarianten kein Gleichgewicht zwischen der Aerosolzufuhr und -reduktion ein. Tabelle 2 zeigt die aufgenommene Quantadosis, sortiert nach den Ergebnissen der Simulation. Nach einem 8-Stunden-Arbeitstag ist die Differenz zwischen V3.3 zu V3.2 größer als die Szenarien mit nur einem Fenster. Damit ergibt sich aus den Simulationsergebnissen, dass eine Lüftung mit zwei Fenstern, bzw. einer größeren Fensterfläche die Quatakonzentration prozentual stärker reduziert, als die Häufigkeit der Lüftungen (vier statt zwei mal Lüften). Damit folgt die Empfehlung, das Fenster während der Stoßlüftung komplett zu öffnen und nicht nur mit 60 Grad Öffnungswinkel.

Tabelle 2: Quanta-Dosis nach einem Arbeitstag

Szenario	Dosis [qunata]	Reduktion [%]
V2.1	0,379	81,0
V1.2	0,561	71,9
V2.2	0,596	70,1
V3.3	1,455	27,1
V3.2	1,737	13,0
V3.1	1,873	6,2
V0	1,996	0,0

Nach einem Arbeitstag liegt die aufgenommene Quanta-Dosis ohne Luftreinigungsmaßnahme für die 2. Person bei ca. 2 quanta. Die Simulation zeigt, dass mit einem Luftreinigungsgerät die Dosis um über 70 % reduziert werden kann. Mit den Fensterlüftungsvarianten werden weniger als 30 % erreicht. Im Vergleich zwischen dem Einsatz von Luftreinigern und Fensterlüftung, führt die reine Lüftungsstrategie zu mehr als der doppelten Quanta-Dosis.

5. Zusammenfassung

Mit einer Rechenzeit von weniger als 10 Minuten kann das VEPZO-Modell schnell Simulationsergebnisse liefern, welche nach einer Validierung mit realen Messungen auch für weitere Analysen verwendet werden können. Als Beispielszenario dient der Vergleich zwischen der Verwendung von Luftreinigern und unterschiedlichen Lüftungsstrategien.

Anhand der Ergebnisse kann eine Minderung der Quatakonzentration durch filtrierende Luftreinigungsgeräte festgestellt werden. Ebenso nähert sich der Quantaverlauf einem Maximalwert an, bei dem sich die Aerosolzufuhr und die Filterleistung des Luftreinigers im Gleichgewicht befinden. Dadurch kann die Dosis an eingeatmeten Viren reduziert werden, ebenso bei frequentierterem Stoßlüften des Raumes. Auch wenn die Reduktion der aufgenommenen Dosis bei der Fensterlüftung geringer ausfällt, wirkt sich diese auf die Luftqualität positiv aus.

Für die Versuchsplanung von Messuntersuchungen können solche Simulationen unterschiedliche Szenarien ausschließen, da beispielsweise ein höherer Volumenstrom der Geräte der Positionierung auf Tischhöhe vorzuziehen ist.

Literatur

D. Müller, K. Rewitz, D. Derwein, T. M. Burgholz, M. Schweiker, J. Bardey, P. Tappler (2020) Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen

G. Buonanno, L. Stabile, L. Morawska (2020) Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment. *Environment international*

M. Kriegel, U. Buchholz, P. Gastmeier, P. Bischoff, I. Abdelgawad, A. Hartmann (2020) Predicted Infection Risk for Aerosol Transmission of SARS-CoV-2

Nordquist B. et al. (1998) Vädring av skolor – ett komplement till normal ventilation?

T. Brunner, C. Matheis, L. Siebler, V. Norrefeldt, G. Grün (2022) Simulative Messdatenvalidierung von Luftreinigungssystemen gegen SARS-CoV-2-Viren

The Modelica Association (31.03.2022) Modelica. <https://modelica.org/>. Zugegriffen: 31. März 2022

V. Norrefeldt, G. Grün, K. Sedlbauer (2012) VEPZO – Velocity propagating zonal model for the estimation of the airflow pattern and temperature distribution in a confined space. *Building and Environment*

W. Richter, J. Seifert, R. Gritzki, M. Rösler (2003) Bestimmung des realen Luftwechsels bei Fensterlüftung aus energetischer und bauphysikalischer Sicht