

Bericht

30.10.2020

Aktive Filterung und Austausch der Raumluft mittels mobilem Klimagerät zur Vermeidung einer Infektion mit dem SARS-CoV-2-Virus

Prof. Dr.-Ing. Sebastian König

Fachbereich Medizintechnik und Biotechnologie der
Ernst-Abbe-Hochschule Jena

1 Problemstellung

In Schulen, Hochschulen und insbesondere bei Musikschulen (Chorproben) besteht das Problem, dass im Winter das Lüften von Räumen nur eingeschränkt möglich ist. Wenn der Versuch unternommen werden soll, trotz der schwierigen Bedingungen unter Einfluss von COVID-19 einen weitestgehend normalen Betrieb der Einrichtungen zu ermöglichen, muss die Luft in den geschlossenen Räumen so gut wie möglich gefiltert und zusätzlich aktiv ausgetauscht werden. Ein Tracer-Auswasch-Experiment [4] soll zeigen, ob und wie gut es möglich ist, in geschlossenen Räumen mittels eines mobilen Klimagerätes z.B. der Firma KRONE Kälte+Klima Vertriebs-GmbH in Bielefeld, die Raumluft zu filtern und aktiv zu erneuern. Dazu sind folgende Fragen von Interesse:

1. Ist ein mobiles Klimagerät mit einem zusätzlichen biofunktionalen Kabinenfilter zu betreiben?
2. Lässt sich ein zusätzlicher Schutz gegen Viren ergänzen?
3. Wie schnell lässt sich das gesamte Luftvolumen eines Raumes aktiv austauschen?
4. Wie wirkt sich die Anwendung eines Klimagerätes auf das Raumklima aus?

1.1 Luftwechselrate und Luftfilterrate

In Szabadi [1] wird die **Luftwechselrate** (n) in der Einheit $[n] = 1/h$ als ein Maß für den Luftaustausch im Raum vorgestellt. Der durch ein Gebläse z.B. im Klimagerät nach Außen geblasene und durch Unterdruck im Raum neu zugeführte Lüftungsvolumenstrom (\dot{V}) mit $[\dot{V}] = m^3/h$ wird auf das Raumvolumen (rv) oder (V) in $[V] = m^3$ bezogen. Die Luftwechselrate gibt an, wie oft die Luft eines Raumes innerhalb einer Stunde durch Frischluft erneuert wird. Je nach Leistung der Lüftungsanlage beträgt sie oft ein Vielfaches der Raumgröße und es gibt Richtwerte für n [9]. Die hygienische Mindestluftwechselrate liegt bei etwa $n = 0,3/h$, was das absolut notwendige Minimum darstellt [9].

Bei einem mobilen Klimagerät, siehe in Abbildung 2 und Abbildung 3, gibt es zwei Luftkreisläufe. Ein Kreislauf filtert, kühlt und wälzt die Raumluft um. Der zweite Kreislauf saugt die Raumluft ab und befördert sie nach außen in die Umwelt. Die Frischluft wird mittels Unterdruck aus dem Haus angesaugt.

Daher müssen hier die zwei Kenngrößen, Luftwechselrate und **Luftfilterrate** (f) in der Einheit $[f] = 1/h$ nach [1] betrachtet werden. Bei der Luftfilterrate wird angegeben, wie oft die Luft im Raum umgewälzt und gefiltert wird. Ein aktiver Austausch der Raumluft gegen Frischluft, um z.B. die CO_2 -Konzentration zu senken, findet nicht statt, wenn die Raumluft, wie in Szabadi [1] beschrieben, nur umgewälzt und gefiltert wird. Eine Luftwechselrate muss auch gegeben sein.

2 Lüftungskonzept und Versuchsaufbau

Ein mobiles Klimagerät (1) in Abbildung 1 und 3 soll die Raumluft aktiv umwälzen (2) und erneuern (3). Ein Schwenkventilator (4) unterstützt beim Umwälzen der Luft im Raum, um die Ausbildung von stehenden (Aerosol-)Wolken im Raum zu vermeiden. Der innere Luftkreislauf (5) in Abbildung 2 wälzt die Luft im Raum um, kühlt, entfeuchtet und filtert sie. Der zweite, äußere Kreislauf (6) saugt Raumluft an und befördert diese über einen Schlauch $\varnothing 150$ mm und eine mit Zubehör abgedichtete Fensteröffnung nach außen. Beide Luftkreisläufe des mobilen Klimagerätes sind im Sinne der Aufbereitung der Raumluft wirksam. Durch Einsatz eines hochwertigen 3-lagigen Aktivkohlefilters mit Polyphenol & antibakterieller Wirkung (hier Typ MANN FP3567) ließe sich die Filterwirkung gegenüber einem einfachen Staubfilter (siehe Herstellerangaben [8] der Firma MANN+HUMMEL) deutlich verbessern. Das Klimagerät GREE GPC-12-AL-R290 [6] hat einen Umluft-Volumenstrom (siehe (5) in Abbildung 2) von

$\dot{V} = 360 \text{ m}^3/\text{h} = 100 \text{ l/s}$ und ist für Räume bis $A = 22 \text{ m}^2$ Fläche d.h. bis $V < 80 \text{ m}^3$ Volumen und Luftwechselrate $n = 16/\text{h}$ optimiert. Die durchgeführten Messungen zeigen die Wirksamkeit auch in größeren Räumen.

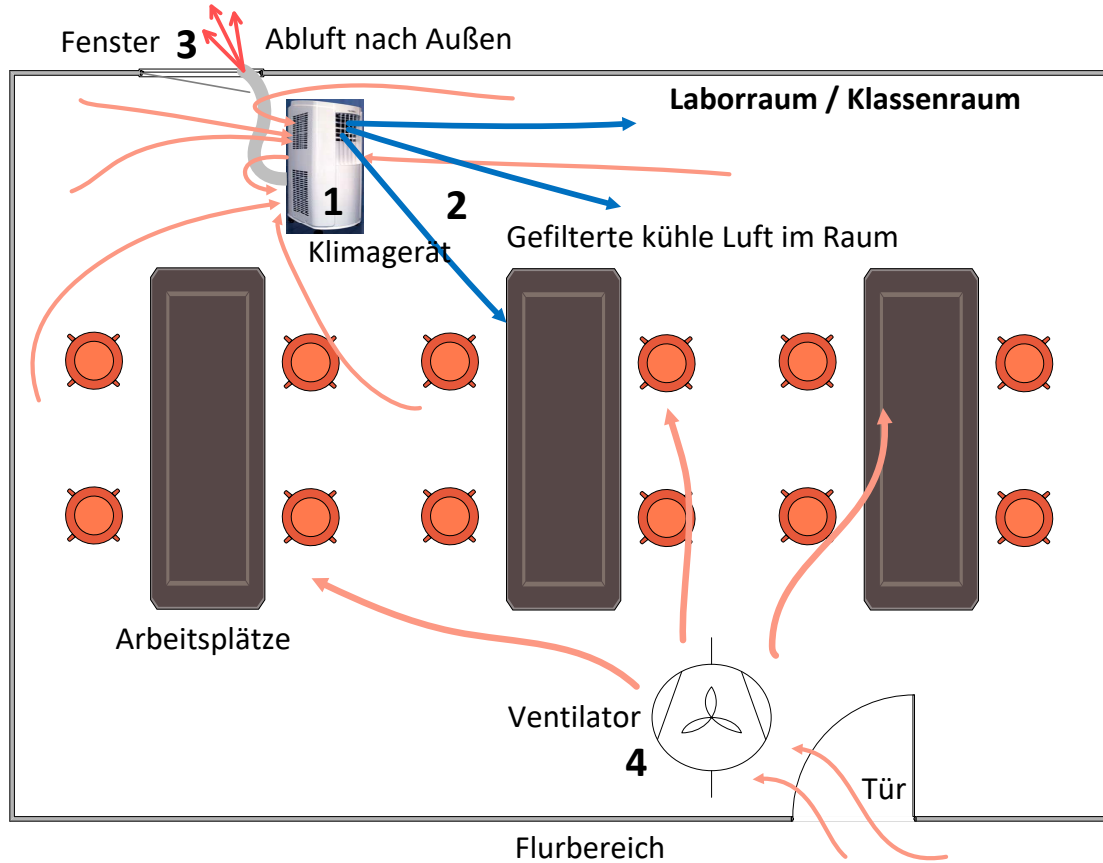


Abbildung 1: Konzept zur aktiven Raumbelüftung mit mobilem Klimagerät.

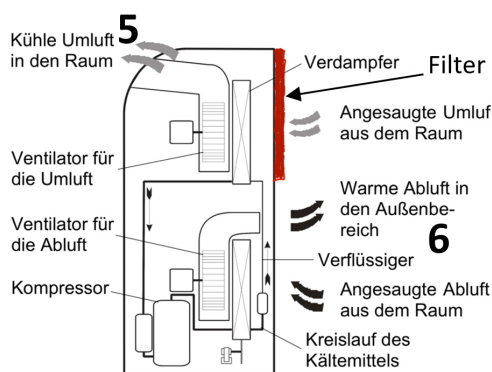


Abbildung 2: Schnitt eines mobilen Klimagerätes Abbildung 3: Ansicht des Klimagerätes GREE GPC12-AL.

Die Öffnung nach außen (siehe (1) in Abbildung 4) kann in einem Klassenraum z.B. mit einer textilen Klimaanlage-Fensterdurchführung oder mit Hilfe einer Fensterabdichtung aus Acrylglas [2] ohne eine bauliche Veränderung des Gebäudes hergestellt werden. (Passendes Zubehör

zum Klimagerät kann über den Hersteller bezogen werden.) Abbildung 4 zeigt den Testraum für die ersten Nebel-Auswaschversuche mit den Maßen (BxTxH: 3,5 m x 2,6 m x 2,2 m). Das Raumvolumen kann mit $V_1 \approx 18 \text{ m}^3$ angegeben werden. Der Mauerkasten (1) in Abbildung 4 (Ausgangsöffnung mit $\varnothing 150 \text{ mm}$) hat eine Frischluftöffnung mit BxH: 160 mm x 40 mm. Beim Auswaschvorgang mit dem Klimagerät (2) wurde als messbares Tracermedium Disco-Nebel (EUROLITE smoke fluid -X EXTREM A2) und eine Nebelmaschine Mc CRYPT X-1200 (6) eingesetzt. Zur Messung der relativen Rauchdichte bzw. Nebeldichte wird die relative Lichttransmission im Wertebereich $T = 0\% \dots 100\%$ bestimmt. Hierzu diente das Messgerät TRDA 2.0 (3) mit einer 1,5 m langen Lichtmessstrecke (4) von der NETZSCH-TAURUS Instruments GmbH in Weimar. Die Lichtmessstrecke wurde etwa in der Raummitte mit Abstand von 2,5 m zum Klimagerät (2) positioniert. Als Simulation eines Aerosol-Spreaders (5) wurde ein Ultraschall-Vernebler mit $P = 25 \text{ Watt}$ (Humidifier A047000 von Babymoov) genutzt.



Abbildung 4: Ansicht des kleinen Modellraumes für erste praktische Auswaschversuche.

3 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Es wurden sieben Versuche an drei Tagen durchgeführt.

Tag 1: Das Klimagerät wurde durchgängig im Kühlmodus (cool) mit Gebläse-Stufe 1 (fan-high) und 2 (fan-low) im Raumvolumen von $V_1 = 18 \text{ m}^3$ in Abbildung 4 betrieben. Beim dritten Referenzversuch wurde der Nebel im Raum belassen und erst nach $t > 15 \text{ min}$ aktiv durch das Klimagerät entfernt. Abbildung 5 zeigt den Verlauf des hier sehr kurzen Einwasch- [4] und des Auswaschvorganges. Nach der Messzeit $t < 10 \text{ s}$ ohne Nebel ($T_0 = 100\%$) wurde der Raum mit zwei Volumeneinheiten des verdampften Nebelfluids homogen gefüllt. Dabei wurde die relative Lichttransmission auf $T = 0\%$ verringert. Die maximale Lichtintensität an der Messstrecke ohne Nebel wurde mit 0,36 angegeben und $n_1 = (360 \text{ m}^3/\text{h}) / 18 \text{ m}^3 = 20/\text{h}$, was schon der Empfehlung für eine Küche entspricht [9]. Die Raumluft in V_1 wird etwa 20 mal in einer Stunde ausgetauscht. Gleichzeitig wirkt die Luftfilterrate mit $f = 20/\text{h}$.

Durch den stark verlängerten Abluftschlauch und den zusätzlich angebrachten MANN-Filter wurde der Luftaustausch unter praktisch nicht zulässigen Worst-Case-Bedingungen getestet. Es gab trotz dieser Bedingungen im praktischen Betrieb keine Funktionseinschränkungen. Der MANN-Filter kann zusätzlich angebracht werden. Der Abluftschlauch sollte aber nicht unzulässig verlängert werden. Wegen des hohen Strömungswiderstandes können HEPA-Filter, die auch Viren filtern können, nicht genutzt werden. Zur direkten Bekämpfung von Viren wäre als alternative Maßnahme ein Kanal mit UV-Licht für die gekühlte Umluft denkbar.

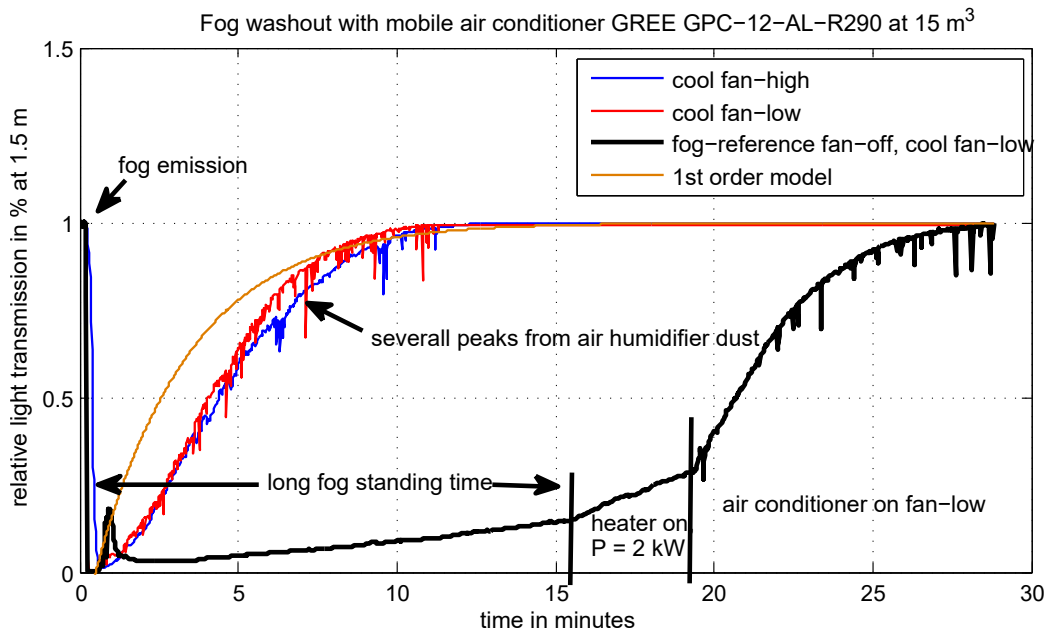


Abbildung 5: Zeitfunktionen der relativen Lichttransmission T beim Auswaschen von Disco-Nebel.

Tag 2: In den Versuchen 4 und 5 wurde ein Raumvolumen von $V_2 = 120 \text{ m}^3$ in gleicher Weise wie in Versuch 1 und 2 vermessen. Die Abbildung 7 zeigt den Verlauf des Auswaschvorganges. Nach 65 Minuten war der Nebel vollständig ausgewaschen und $n_2 = (360 \text{ m}^3/\text{h}) / 120 \text{ m}^3 = 3/\text{h}$, was der Empfehlung für Büroräume entspricht. Mit der gleichzeitig wirksamen Luftfilterrate von $f = 3/\text{h}$ erfolgt eine zusätzliche Durchmischung und Filterung der Raumluft.

Tag 3: Bei den Versuchen 6 und 7 wurde wie in Abbildung 6 ein Seminarraum in der Ernst-Abbe-Hochschule in Jena mit dem Raumvolumen von $V_3 = 220 \text{ m}^3$ in gleicher Weise wie in den Versuchen 1 und 2 vermessen. Beim 7. Versuch wurde ein aktiver Lüftungsbetrieb ohne Kühlung und Entfeuchtung der Raumluft genutzt. Das spart etwas Energie in der kalten Jahreszeit. Die Abbildung 8 zeigt den Verlauf des Auswaschvorganges. Nach 83 Minuten war der Nebel vollständig entfernt und $n_3 = (360 \text{ m}^3/\text{h}) / 220 \text{ m}^3 = 1,6/\text{h}$. Die Mindestempfehlung für Bürogebäude wäre mit 2 Klimageräten zu erreichen. Die wirksame Luftfilterrate von $f_3 = 1,6/\text{h}$ wirkt sich hier positiv aus, so dass selbst ein Klimagerät eine sinnvolle Maßnahme in größeren Räumen darstellt. Die Forderung für Hörsäle mit $n = 8/\text{h} \dots n = 10/\text{h}$ ist auf diesem Wege aber nicht zu erfüllen. Das kann nur eine fest installierte Be- und Entlüftungsanlage leisten.

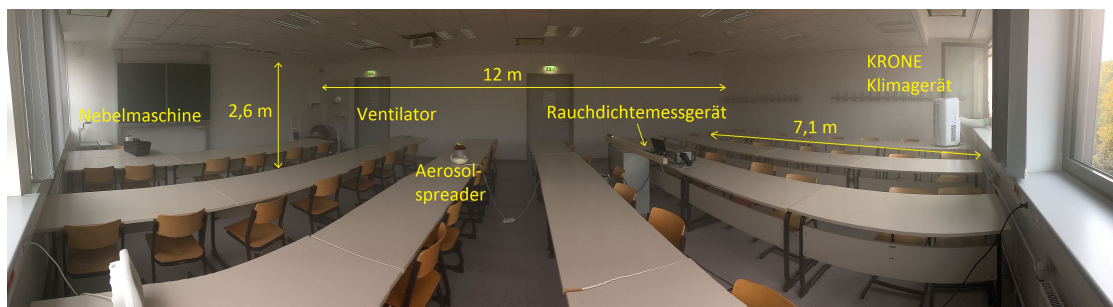


Abbildung 6: Versuchsanordnung Seminarraum der EAH Jena mit Volumen V_3 .

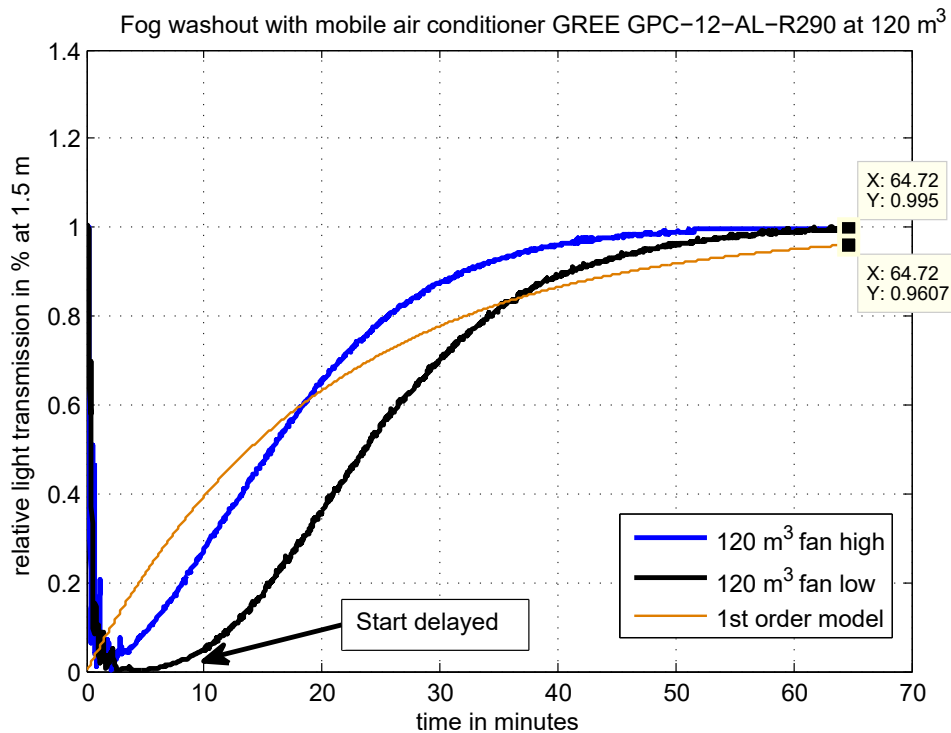


Abbildung 7: Zeitfunktionen der relativen Lichttransmission T im Volumen V_2 .

Diskussion: Das mobile Klimagerät hat den Nebel in den Versuchen 1 und 2 im Volumen V_1 zu $T(t \approx 5\tau) = 99\%$ in weniger als $t = 15 \text{ min}$ ausgewaschen (siehe Abbildung 5). Interessant ist die Feststellung, dass die Gebläse-Stufe (high/mid/low) bei kleinen Räumen keinen Einfluss auf den Zeitverlauf des Auswaschvorgangs hat. In großen Räumen verhält sich das anders. Die **Geräuschemission ist in der Gebläse-Stufe low etwas geringer**. Der zusätzlich angebrachte MANN-Luftfilter hat keinen negativen Einfluss auf die Funktion des Klimagerätes.

Zum Umwälzen der Luft im Raum kann zusätzlich ein geräuscharmer Ventilator unterstützen. Einige negative Ausreißer (peaks) in den Kurven wurden durch den Aerosol-Spreader (5) in Abbildung 4 verursacht. Es kam zu keiner lokalen Ansammlung von Aerosolen im Raum nahe des Aerosol-Spreaders. Der Referenzversuch 3 zeigte, dass der verwendete Disco-Nebel eine hohe Dichte und eine sehr hohe Standzeit im Raum hat (Abbildung 5). Potenziell gefährliche sog. „Tropfen-Aerosole“ würden ohne eine Belüftung, ähnlich lange wie der Nebel, im Raum bleiben (siehe Film [7]). Erst durch die aktive Belüftung bei $t > 18 \text{ min}$ steigt durch aktives Entfernen des Nebels mittels Klimagerät die Lichttransmission T im Raum wieder signifikant an. Nach den drei Versuchen mit ca. 2 Stunden Laufzeit des Klimagerätes wurden 300 ml destilliertes Wasser aus dem Sammelbehälter entnommen, das zuvor vom Aerosol-Spreader ($\geq 200 \text{ ml/h}$) abgegeben wurde. Das Klimagerät sollte möglichst etwas erhöht stehen, um den Kondensat-Sammelbehälter leicht ausleeren zu können. Der Großteil des Kondensates wird mit der Abluft nach außen befördert.

4 Modellierung der Auswaschzeitfunktion

Die Sprungantwort eines einfachen mathematischen Modells nach Formel 1 mit nur einer Zeitkonstante τ und einer normierten Lichttransmission $T_0 = 100\%$ ist in Abbildung 5 orange ein-

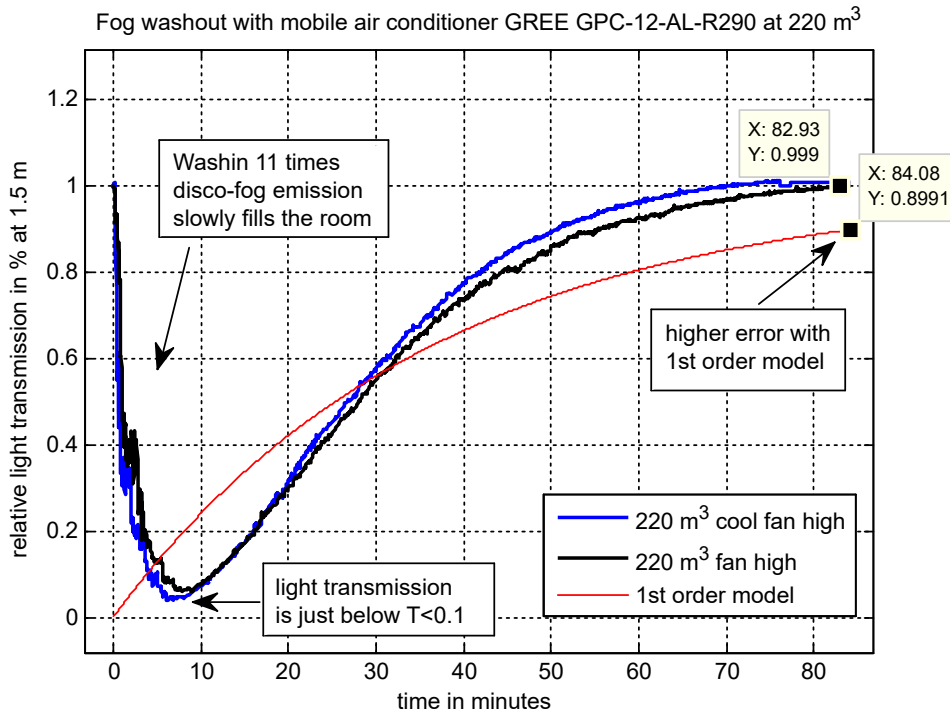


Abbildung 8: Zeitfunktionen der relativen Lichttransmission T im Volumen V_3 .

gezeichnet.

$$T(t) = T_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (1)$$

Hierbei gelten die Einheiten $[t] = \text{min}$, $[\tau] = \text{min}$ und $[T_0] = 100\%$. Die Zeitkonstante τ könnte z.B. aus dem Raumvolumen, hier $V_1 = 18 \text{ m}^3$, und dem Austausch-Volumenstrom $\dot{V} = 360 \text{ m}^3/\text{h} = 100 \text{ l/s}$ zu $\tau \approx 3 \text{ min}$ abgeschätzt werden. Das bedeutet, dass nach 3 Minuten, bei $t \approx 1 \cdot \tau$, schon 63% der Luft aus dem Raum V_1 erneuert wurden. Abbildung 5 zeigt aber anhand der Messwerte (rot und blau), dass 63% erst nach etwa 5 Minuten ausgetauscht wurden. Das ist ein Fehler des einfachen Modells, das für V_1 hauptsächlich den Endzustand ab $T \approx 85\%$ gut berechnet. Die Abbildung 9 zeigt die anhand des Modells berechnete Luftaustauschzeit, z.B. für ein Klassenzimmer mit $V = 150 \text{ m}^3$ (Maße 10 m x 5 m x 3 m). Die geschätzte Zeit würde hier etwa 90 Minuten betragen.

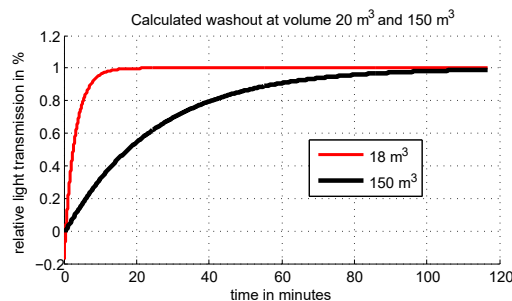


Abbildung 9: Schätzung der Luftaustauschzeit für ein Klassenzimmer.

Die praktische Messung in Abbildung 7 zeigt, dass der Fehler des einfachen Modells bei $V_2 =$

120 m³ bei T=99% kleiner 5% ist. Bei einem Raumvolumen von V₃ = 220 m³ in Abbildung 8 steigt der Fehler des Modells bei T=99% auf 10% an. Der Auswaschvorgang ist praktisch aber deutlich schneller als laut Berechnung angenommen, was positiv ist.

Wegen des Mischprozesses der alten und der frischen Raumluft müsste der Auswaschvorgang des Tracers mit einem mathematischen Modell (Polynom höherer Ordnung mit mehreren Zeitkonstanten) genauer approximiert werden. Die wissenschaftliche Aufgabe besteht dann darin, die physikalischen Zusammenhänge der zusätzlich verwendeten Zeitkonstanten zu bestimmen.

5 Antworten auf die Fragen

1. Das Klimagerät kann problemlos mit einem zusätzlichen biofunktionalen Kabinenfilter betrieben werden. Die Haltbarkeit des Filters muss vom dem Hersteller definiert werden, beträgt bei normalen Bedingungen etwa 6 Monate.
2. Mit einem UV-Licht-Kanal am Ausgang des Kühlkreislaufes könnte die umgewälzte Luft zusätzlich von Viren befreit werden. [4]
3. Der Disco-Nebel in einem kleinen Luftvolumen von V₁ = 18 m³ wurde in t₁ < 15 min zu 99% ausgewaschen. Der Fördervolumenstrom des Klimagerätes nach Außen und der Umwälzvolumenstrom innen betragen jeweils etwa $\dot{V} \approx 360 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Luftwechselrate und Luftfiltrerrate betragen bei kleinen Räumen wie V₁ jeweils n₁ ≈ f₁ ≈ 20/h. Bei V₂ = 120 m³ dauerte der Auswaschvorgang t₂ ≈ 60 min und bei V₃ = 220 m³ betrug t₃ ≈ 80 min. Bei einem Raumvolumen von V₂ = 120 m³ betragen n₂ ≈ f₂ ≈ 3/h. Das heißt, in einer Stunde wird das Raumvolumen 3 mal ausgetauscht und zusätzlich 3 mal vollständig umgewälzt. Bei V₃ = 220 m³ wird das Luftvolumen noch mindestens einmal pro Stunde ausgetauscht.
4. Die Abbildungen 10 und 11 zeigen gemessene Zeitverläufe der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur in einem kleinen Raumvolumen von V₄ = 40 m³. Das mobile Klimagerät trocknet und kühlt die Raumluft signifikant. Der Betrieb im reinen Lüftungsmodus ohne Abkühlung der Luft ist möglich. Es ist festzustellen, dass die schwarze Kurve in Abbildung 8 etwa den gleichen Zeitverlauf wie die blaue Kurve bei eingeschalteter Kühlung hat.

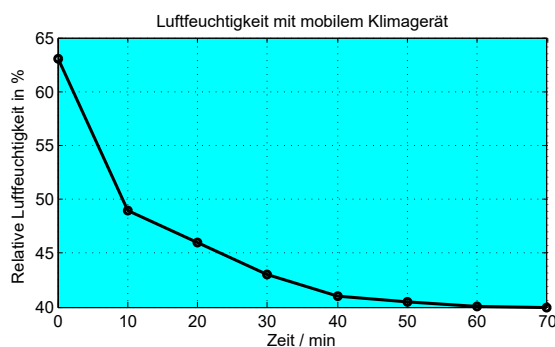


Abbildung 10: Zeitfunktionen der relativen Luftfeuchtigkeit.

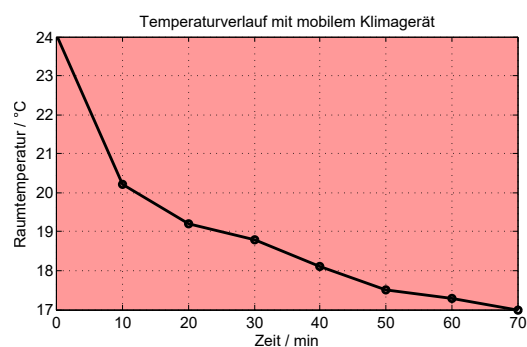


Abbildung 11: Zeitfunktionen der Raumtemperatur.

6 Fazit

In geschlossenen Räumen, wo keine aktive Be- und Entlüftung vorhanden ist, können mobile Klimaanlage eine sinnvolle Maßnahme zur Vermeidung von Aerosol-Wolken und auch von

Infektionen sein. Die Raumluft wird aktiv ausgetauscht, im Raum umgewälzt und gefiltert. Gegen Viren könnte ein Luftschacht mit UV-Licht ergänzt werden, durch den die Umluft strömt. Das Luftvolumen in kleinen Räumen wird in kurzer Zeit mehrfach ausgetauscht und der Inhalt (Disco-Nebel als Modell für Aerosole) wird dabei vollständig ausgewaschen. Gegen im Raum stehende Aerosol-Wolken wird vorgebeugt. Der Betrieb des Klimagerätes im Lüftungsmodus wird im Winter empfohlen, um etwas Energie zu sparen und trotzdem die aktive Belüftung und Filterung der Raumluft zu erreichen. Die örtlichen Gegebenheiten sind immer entscheidend für den Einsatz eines Klimagerätes. Das Klimagerät kann problemlos mit einem zusätzlichen Kabinenfilter (nicht HEPA-Filter) ausgerüstet werden. In den warmen Monaten hat ein mobiles Klimagerät zusätzlich einen positiven kühlenden Einfluss auf das Raumklima in Klassenräumen oder Laboren. Es müssen weitere praktische Versuche in Klassenräumen oder Laboren als Akzeptanztests im laufenden Unterricht durchgeführt werden.

Literatur

- [1] Szabadi, J.; Meyer J.; Dittler, A.: *Untersuchung der Minderung der Partikelkonzentration in geschlossenen Innenräumen durch einen hoch wirksamen Innenraumfilter*. Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, KIT 2020
https://airfiltration.mann-hummel.com/fileadmin/user_upload/Our_Segments/Air_Purification_for_Contamination_Control/Proof_of_effectiveness/KIT-Studie_Vollständiger_Bericht_M_H_Projekt.pdf
- [2] Klimaanlage Fensterdurchführung Fensteradapter für Klimagerät und JEDES Fenster.
<https://www.youtube.com/watch?v=Uu0d6Y-ezgM&app=desktop>
- [3] TRDA – Rauchdichte – Messgerät mit Lichtmesstrecke.
<https://www.taurus-instruments.de/produkt/brandpruefgeraete/rauchdichte/>
- [4] Anti-COVID19-Auswaschversuch-Disko-Nebel mit KRONE Klimagerät 2020.
<https://vimeo.com/465353582>
- [5] IUVA Fact Sheet on UV Disinfection for COVID-19.
<https://www.iuva.org/IUVA-Fact-Sheet-on-UV-Disinfection-for-COVID-19>
- [6] Installations- und Bedienungsanleitung Mobiles Inverter-Raumklimagerät GPC12-AL-R290.
https://www.krone-klima.de/docs/GPC09-AK-R290_GPC12-AL-R290_Anleitung.pdf
- [7] AKTIVER LUFTAUSTAUSCH UND LUFTFILTERUNG IN SCHULRÄUMEN MIT EINEM MOBILEN KLIMAGERÄT. 2020
<https://www.simmi-bleifrei.de/sonstige-dinge/>
- [8] PreciousPlus – der Innenraumfilter gegen Feinstaub, Stickoxide und Allergene. MANN Filter
https://www.precious-plus.com/fileadmin/user_upload/truck-brochure-de.pdf
- [9] Luftwechselrate.
<https://de.wikipedia.org/wiki/Luftwechselrate>

Ansprechpartner :

sebastian.koenig@eah-jena.de, w.schroeder@krone-klima.de