

Kosteneffiziente Ausstattung von Klassenräumen mit mobilen Raumluftfiltern

*Kurzbericht über die Projektergebnisse*¹

Gunther Glenk, Universität Mannheim
Anna Rohlfing-Bastian, Goethe-Universität Frankfurt

April 2021

1 Einleitung

Die Risiken einer Infektion mit dem *SARS-CoV-2*-Virus und die Folgen einer *COVID-19*-Erkrankung stellen eine substantielle Herausforderung für Schulen dar, in deren Räumlichkeiten größere Personengruppen für längere Zeit zusammenkommen. Die Regierung steht vor der Verantwortung, den Schüler/innen und Lehrer/innen ein sicheres Lern- und Arbeitsumfeld zu gewährleisten. Bisher wird dabei auf sogenannte **AHA**-Regeln (**A**bstand halten, **H**ygieneregeln einhalten und im **A**lltag Masken tragen) sowie regelmäßiges Lüften, Wechselunterricht mit Halbierung von Klassen und Home Schooling bzw. Distanzunterricht gesetzt. Bildungsforscher wie der OECD-Direktor Andreas Schleicher, der seit 20 Jahren die Pisa-Studien leitet, warnen jedoch eindringlich vor den langfristigen Konsequenzen dieser Strategie und drängen auf eine schnelle Rückkehr in den regulären Schulbetrieb.

Von besonderer Bedeutung im Rahmen der *SARS-CoV-2*-Pandemie scheint eine Übertragung des Virus durch Aerosole zu sein (van Doremalen et al. 2020; Santarpia et al. 2020). Die Installation mobiler Raumluftfilter in geschlossenen Räumen zur Verringerung eines Ansteckungsrisikos mit dem *SARS-CoV-2*-Virus wird insbesondere in Bezug auf Schulen politisch und wissenschaftlich intensiv diskutiert. Das Umweltbundesamt empfiehlt in einer am 12. August 2020 veröffentlichten Stellungnahme geeignete Lüftungsmaßnahmen für Innenräume zur Reduktion des Infektionsrisikos mit dem *SARS-CoV-2*-Virus sowie eine Flankierung mit raumlufttechnischen Anlagen (Umweltbundesamt 2020a). Die S3-Leitlinie “Maßnahmen zur Prävention und Kontrolle der SARS-CoV-2-Übertragung in Schulen” vom Februar 2021 geht von einer wahrscheinlich positiven Wirkung mobiler Raumluftfilter auf den Infektionsschutz aus (Deutsche Gesellschaft für Epidemiologie et al. 2021). Feldversuche in Klassenräumen zeigen, dass die Aerosolbelastung innerhalb kurzer

¹Das Projekt wird im Rahmen des Goethe-Corona-Fonds von der Friedrich Flick Förderungstiftung finanziert.

Zeit um bis zu 90% gesenkt werden und das Infektionsrisiko damit erheblich reduziert werden kann (Curtius et al. 2021).

Nichtsdestotrotz sind die Verantwortlichen bisher zögerlich in der Anschaffung mobiler Raumlufthfilter für Schulen. Ein zentrales Argument hierbei sind die mit der Installation und dem Betrieb der Raumlufthfilter anfallenden Kosten. Die S3-Leitlinie “Maßnahmen zur Prävention und Kontrolle der SARS-CoV-2-Übertragung in Schulen” beispielsweise unterstellt mobilen Raumlufthfiltern hohe Kosten bei Anschaffung, Unterhalt, Wartung und Entsorgung (Deutsche Gesellschaft für Epidemiologie et al. 2021).

Der vorliegende Beitrag adressiert die Unklarheit über die Kosten von mobilen Raumlufthfiltern. Insbesondere wird ein ökonomisches Bewertungskonzept entwickelt, anhand dessen die Kosten der Anschaffung und Installation mobiler Raumlufthfilter in Abhängigkeit der spezifischen Bedingungen an Schulen abgeschätzt werden können. In Begleitung zu dem vorliegenden Beitrag wird außerdem ein Kalkulationstool bereitgestellt, mit dem Schulen, Schulämter, Kultusministerien und (Landes-)Regierungen nach Eingabe einiger Kerndaten die für den individuellen Bedarf kosteneffiziente Ausstattung eines Raumes mit mobilen Raumlufthfiltern berechnen lassen können. Das Tool ist unter www.airfiltercalculator.com verfügbar.

Im Folgenden wird in Kapitel 2 das ökonomische Bewertungskonzept vorgestellt, das der Kostenberechnung und Optimierung zu Grunde liegt. In Kapitel 3 werden die erhobenen Daten und Berechnungen illustriert, sowie beispielhafte Berechnungen gezeigt. Kapitel 4 fasst die Ergebnisse zusammen.

2 Ökonomisches Bewertungskonzept

2.1 Lebenszykluskosten von Raumlufthfiltern

Verfügbare Raumlufthfilter können sich deutlich in zentralen Eigenschaften, wie beispielsweise dem Kaufpreis, den Betriebskosten, der regulären Betriebsdauer und der maximalen Filterleistung, unterscheiden. Es ist daher sinnvoll, die Kosteneffizienz von alternativen Raumlufthfiltern auf Basis des Konzepts zur Ermittlung von Lebenszykluskosten pro produzierter Einheit zu bewerten.²

Solche Lebenszykluskosten sind definiert als der durchschnittliche Stück-Umsatz, den ein Investor einer Produktionsanlage über die gesamte Lebenszeit der Anlage erzielen muss, damit das Investment gerade kostendeckend ist. Der Umsatz pro Einheit muss

²Das Konzept stammt ursprünglich aus dem Energiesektor, wo hiermit die Wettbewerbsfähigkeit alternativer Stromerzeugungstechnologien (z. B. Gaskraftwerke versus Solaranlagen) bewertet wird; siehe z. B. Glenk und Reichelstein (2020).

folglich die anfänglichen Investitionsausgaben, alle laufenden Betriebsausgaben einer Produktionsperiode und einen angemessenen Gewinn für den Investor erwirtschaften (Reichelstein und Rohlfig-Bastian 2015).

Raumluftfilter erbringen die Dienstleistung, Schadstoffe und Aerosole, die beispielsweise das *SARS-CoV-2*-Virus enthalten, aus der Raumluft zu entfernen. Das relevante Maß für die Betriebsleistung eines Filters im Rahmen der Lebenszykluskosten ist damit das Volumen an gereinigter Luft (in Kubikmetern, m^3). Gereinigt bedeutet in diesem Fall, dass die Aerosolkonzentration der Luft im Raum konstant unterhalb eines Grenzwertes liegt, sodass das relative Infektionsrisiko im Vergleich zu einem Referenzraum³ RR_{inf} gleich einem gewählten Wert ist (Müller et al. 2020, 2021). Zur Budgetierung kann diese Kenngröße auch in die Anzahl an Personen (z. B. Schüler) umgerechnet werden, die mit gereinigter Luft zu versorgen sind. Dabei ist eine Abschätzung über die erwartete Emissionsrate von Aerosolen zu treffen, sodass bei bestimmter installierter Filterkapazität ein festgelegter Grenzwert für die Aerosolkonzentration in der Raumluft zu jedem Zeitpunkt eingehalten wird.⁴

Die Kostenberechnung basiert darauf, dass Raumluftfilter eine effektive Filterleistung, l , in Kubikmetern pro Stunde (m^3/h), aufweisen.⁵ Diese bestimmt das maximale Volumen an Luft, das zu jedem Zeitpunkt eine Aerosolkonzentration unterhalb des Grenzwertes aufweist. Die Effektivität von High Efficiency Particulate Air (HEPA-) Filtern der Klassifizierung H13/H14 haben einen Abscheidegrad von 99,95%/99,995% insgesamt (bzw. von 99,75%/99,975% an der schlechtesten lokalen Stelle). Die effektive Filterleistung, l , ergibt sich somit aus dem Produkt des Abscheidegrads mit der gerätespezifischen Filterleistung laut Herstellerangabe.⁶

Die durchschnittliche Auslastung eines Raumluftfilters über einen Tag hinweg wird mit $u\%$ bezeichnet. Diese ergibt sich aus der Betriebsstufe, mit der ein Raumluftfilter über eine bestimmte Zeit hinweg läuft, und der Anzahl an Stunden, die ein Raum pro Betriebstag genutzt wird.⁷ Somit ergibt $u \cdot 24$ die Anzahl der sogenannten Volllaststunden, die ein Raumluftfilter an einem Tag arbeitet. Wird diese Zahl mit der Anzahl der Betriebstage (z. B. Schultage) pro Jahr multipliziert, ergibt sich die Anzahl an Volllaststunden für das gesamte Jahr. Sei m das Produkt aus 24 und der Anzahl an Betriebstagen pro Jahr und

³Siehe Kapitel 3 zur genauen Definition des Referenzraums.

⁴Siehe Kapitel 3 zur Berechnung der effektiven Filterleistung.

⁵Hierzu wird auf die Angaben der Gerätehersteller vertraut.

⁶Wenn keine HEPA-Filter, sondern alternative Technologien verwendet wurden, wurden die zugehörigen Abscheidegrade berücksichtigt.

⁷Vereinfachend wird zunächst angenommen, dass Raumluftfilter entweder mit voller Leistung arbeiten oder ausgeschaltet bleiben. Dies reduziert auch die Komplexität der Handhabung der Geräte.

vereinfachend angenommen, dass alle Betriebstage eines Jahres sowie die Jahre eines T -Jahre Planungshorizonts gleich sind. Weiterhin sei angenommen, dass keine Abnutzung der maximalen Filterleistung l über die Nutzungsdauer eines Filtergeräts zu erwarten ist. Das jährliche Gesamtvolumen an gereinigter Luft eines Raumlufilters ist damit gegeben durch $m \cdot u \cdot l$.

Auf der Kostenseite bezeichnet v die Anschaffungskosten eines Raumfilters in €. Diese Kosten beinhalten den Kaufpreis, erste Filterkosten sowie Versand- und Installationskosten. Nach Ablauf der Nutzungsdauer kann ein Filtergerät einen Restwert $\lambda \cdot v$ erzielen, wobei $\lambda \in [0, 1]$ dadurch gegeben sein kann, dass ein Filtergerät eine längere Lebensdauer als die Nutzungsdauer besitzt. Betriebskosten werden in fixe und variable Kosten unterschieden. Fixe Betriebskosten, F_i pro Jahr i in €, sind unabhängig von der Nutzung und beinhalten beispielsweise Wartung und Versicherung. Variable Betriebskosten, w_i in €/m³, umfassen dagegen Ausgaben für Ersatzfilter, Filterwechsel, Filterentsorgung und Strom.

Um die Kosteneffizienz von Raumluffiltern vergleichen zu können, müssen die verschiedenen Kostenkomponenten zu einer Kostengröße pro Einheit nivelliert werden. Bezeichne r die anwendbaren Kapitalkosten, die ein Investor für ein Investitionsprojekt ansetzt, wobei $\gamma = \frac{1}{1+r}$ den zugehörigen Diskontierungsfaktor beschreibt. Gemeinnützige Organisationen wie Schulen mögen keine Gewinnabsicht verfolgen. Sie müssen dennoch zwischen alternativen Investitionsprojekten mit unterschiedlicher Rückzahlungszeit entscheiden und bei einer Finanzierung mit Fremdkapital Zinsen zahlen. Der Nivellierungsfaktor hinsichtlich des diskontierten zukünftigen Volumens an gereinigter Luft ist damit definiert als:

$$L = m \cdot u \cdot l \cdot \sum_{i=1}^T \gamma^i.$$

Das Konzept der Lebenszykluskosten berücksichtigt als letzte Kostenkomponente auch den Effekt von Steuern, denen eine Organisation für ihren Gewinn unterliegt. Dieser Effekt kann zusammen mit dem potentiellen Restwert eines Filtergeräts zu einem Faktor Δ aggregiert werden, der die Anschaffungskosten adjustiert. Bei gemeinnützigen Organisation, die keiner Einkommensteuer unterliegen, ist ohne Bestehen eines Restwerts $\Delta = 1$. Die gesamten Lebenszykluskosten eines Raumfilters pro m³ gereinigter Luft sind dann definiert als die Summe von drei Komponenten:

$$LC \equiv w + f + c \cdot \Delta, \tag{1}$$

wobei

$$c \equiv \frac{v}{L}, \quad w \equiv \frac{m \cdot u \cdot l \cdot \sum_{i=1}^T w_i \cdot \gamma^i}{L}, \quad f \equiv \frac{\sum_{i=1}^T F_i \cdot \gamma^i}{L}. \quad (2)$$

Es lässt sich zeigen, dass die Lebenszykluskosten wie in (1) definiert das anfänglich beschriebene Break-Even-Kriterium erfüllen. Das heißt, eine Investition in einen Raumluftfilter erreicht einen Kapitalwert von Null, wenn der durchschnittliche Umsatz pro Kubikmeter gereinigter Luft den Lebenszykluskosten in (1) entspricht.

2.2 Kosteneffiziente Ausstattung von Räumen

Bei gegebener Raumbelugung und Emissionsrate von Aerosolen soll nun ein festgelegter Grenzwert für die Aerosolkonzentration zu jedem Zeitpunkt eingehalten werden. Aus diesem Anforderungsprofil θ ergibt sich eine notwendige Filterleistung, $l_+(\theta)$ in m^3/h , die zu jedem Zeitpunkt über $u_+(\theta) \cdot 24$ Stunden Raumbelugung eines Tages zu erbringen ist. Hierbei wird angenommen, dass die notwendige Filterleistung im Zeitverlauf konstant bleibt, weil zum Beispiel die Raumbelugung und Emissionsrate relativ gleich bleiben oder die Komplexität für den Nutzer der Raumluftfilter gering gehalten werden soll.

Betreiber von (Klassen-)Räumen müssen nun aus einem Set J von alternativen Raumluftfiltern eine Zusammenstellung von Geräten auswählen, um nach Maßgabe der Sparsamkeit die kosteneffiziente Einhaltung der maximalen Aerosolkonzentration in einzelnen Räumen zu gewährleisten. Bezeichne k_j die Anzahl von Raumluftfiltern des Gerätetyps $j \in J$ und sei $\beta_j(\theta)$ der Anteil an der erfordernten Filterleistung pro Tag, den ein Filter des Typs j erbringt. Dieser Anteil ist gegeben durch:

$$\beta_j(\theta) = k_j \cdot \frac{l_j}{l_+(\theta)}. \quad (3)$$

Der Grenzwert für die Aerosolkonzentration wird zu jedem Zeitpunkt eingehalten, wenn gilt, dass $\sum_j \beta_j(\theta) \geq 1$ und $u_j = u_+(\theta)$ für alle $j \in J$. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass mobile Raumluftfilter eine Lärmbelastung im Raum verursachen. Es ist daher notwendig, den durch die Geräte entstehenden Schalldruckpegel db_j in Dezibel unterhalb eines Grenzwertes \bar{db} zu halten.

Damit ergibt sich für die Betreiber bei gegebenem θ eines Raumes und den Entschei-

Optimierungsproblem:

$$\begin{aligned}
&\text{Minimiere} && \sum_j \beta_j(\theta) \cdot LC_j \\
&\text{gegeben} && \sum_j \beta_j(\theta) \geq 1, \\
&&& k_j \geq 0, \text{ für alle } j \in J, \\
&&& 10 \cdot \log \left(\sum_{k_j} 10^{\frac{db_j}{10}} \right) \leq \bar{db}, \text{ für alle } k_j > 0.
\end{aligned} \tag{4}$$

Für die Anwendung im Kontext einer Schule wird das Optimierungsproblem im Rahmen des Online-Rechners insofern vereinfacht, als der Schalldruckpegel nicht als Nebenbedingung berücksichtigt, sondern nur als Information ausgewiesen wird.⁸ Zur Lösung des damit linearen Optimierungsprogramms wird die Software *PuLP* für die Programmiersprache *Python* herangezogen. Die optimierten Entscheidungsvariablen werden mit k_j^* beschrieben und geben entsprechend an, wie viele Geräte vom Typ j in einem Raum installiert werden sollen. Die Lebenszykluskosten, die zur kosteneffizienten Einhaltung der maximalen Aerosolkonzentration in einem Raum anfallen, berechnen sich als die gewichtete Summe über die Lebenszykluskosten der installierten Raumluftfilter. Sie sind durch die optimierte Zielfunktion in (4) gegeben.

Werden die Raumluftfilter in einem Raum fest installiert und wird der Raum konstant von einer Gruppe an Personen (z. B. einer Schulklasse) benutzt, können nun die optimierten Lebenszykluskosten pro Kubikmeter gereinigter Luft leicht in Kosten pro Person oder Personenjahr umgerechnet werden. Mit n Personen in einem Raum bei gegebenem Anforderungsprofil θ ergeben sich die optimierten Lebenszykluskosten pro Personenjahr zu:

$$\frac{m \cdot u_+(\theta)}{n} \sum_j k_j^* \cdot l_j \cdot LC_j. \tag{5}$$

Die optimierten Lebenszykluskosten pro Person ergeben sich umgehend aus der Multiplikation von Gleichung (5) mit dem Faktor $\sum_{i=1}^T \gamma^i$.

3 Datenerhebung und Berechnung

Zur Erhebung der Daten geeigneter mobiler Raumluftfilter wird seit dem 28. Dezember 2020 eine Befragung über *SoSci Survey* an der Goethe-Universität Frankfurt durchgeführt.⁹ Der Link zur Umfrage wurde an insgesamt 33 Hersteller mobiler Raumluftfilter für den Einsatz in Klassenräumen versendet (siehe Tabelle 3 im Anhang). Von den

⁸Sollte ein einzelnes Gerät bereits einen Dezibelwert oberhalb des Grenzwertes aufweisen, wird es in der nachfolgenden Optimierung nicht berücksichtigt.

⁹Ein Ausdruck des Fragebogens ist am Ende des Dokuments zu finden.

angefragten Herstellern haben 22 Hersteller die Fragen beantwortet, zusätzlich hat ein weiterer, im Vorfeld nicht angefragter Hersteller den Fragebogen ausgefüllt. In Summe wurden bisher 39 Luftfilter-Geräte eingetragen (Stand: 30.04.2021). Vereinzelt mussten Daten nachträglich telefonisch oder auf den Webseiten der Hersteller recherchiert werden, weil die Angaben im Fragebogen nicht konsistent waren. Eine Liste der in der Datenbank enthaltenen Geräte findet sich im Anhang. Der Fragebogen ist unter <https://survey.studiumdigitale.uni-frankfurt.de/luftfilter> zugänglich und Hersteller mobiler Raumluftfilter können jederzeit weitere Geräte eintragen.

Die notwendige effektive Filterleistung hängt insbesondere von der Raumgröße (V), der Belegung (n_R), der Aufenthaltsdauer (τ) und der Luftwechselrate (LW) des Raumes ab. Zur Berechnung wird auf den Ansatz von Müller et al. (2020, 2021) zurückgegriffen, in dem das relative Infektionsrisiko RR_{inf} im Vergleich zu einer Referenzumgebung (ref) berechnet wird. Die Referenzumgebung in Müller et al. (2020, 2021) ist ein maschinell belüfteter Klassenraum ($LW^{ref} = 4,4h^{-1}$ mit $V^{ref} = 200m^3$ und $n_R^{ref} = 25$ Personen), in dem eine Person sitzt und spricht (Referenzgruppe g_1 mit Volumenstrom \dot{V}_{A,g_1} und emittierten Aerosolpartikeln ζ_{Aer,g_1}^{ref}) und alle anderen einer sitzenden Tätigkeit nachgehen, bei der sie nur atmen (Referenzgruppe g_2 mit Volumenstrom \dot{V}_{A,g_2} und emittierten Aerosolpartikeln ζ_{Aer,g_2}^{ref}). Die Personen halten sich für eine Stunde ($\tau^{ref} = 1$) im Raum auf und tragen keine Mund-Nasen-Bedeckung. Der Ansatz basiert auf vereinfachenden Annahmen, wie beispielsweise einer idealen Mischlüftung, bei der sich alle Aerosole gleichmäßig im Raum verteilen, und einem linear in der Anzahl eingeatmeter Viren ansteigendem Infektionsrisiko. Unter den gegebenen Parametern besteht in der Referenzumgebung ein absolutes Infektionsrisiko von 1%, sofern sich unter den 25 im Raum anwesenden Personen eine infizierte Person befindet. Dieses Infektionsrisiko kann nun mit dem Risiko, dass sich unter den im Raum anwesenden Personen überhaupt eine infizierte befindet, multipliziert werden, um so die aktuelle Infektionslage zu berücksichtigen. Für die Infektionslage im März 2021 in Deutschland entspräche das absolute Infektionsrisiko in der Referenzumgebung dann beispielsweise einem Wert von 0,03%.

Für das relative Infektionsrisiko ergibt sich nach Müller et al. (2020, 2021) dann:

$$RR_{inf} = \frac{\bar{n}_{Aer}}{\bar{n}_{Aer}^{ref}} \cdot \frac{V^{ref} \cdot LW^{ref}}{V \cdot LW + V_{LR,eff}} \cdot \frac{n_R}{n_R^{ref}} \cdot \frac{\dot{V}_A}{\dot{V}_A^{ref}} \cdot \frac{\tau}{\tau^{ref}}, \quad (6)$$

mit

$$\frac{\bar{n}_{Aer}}{\bar{n}_{Aer}^{ref}} = \frac{\frac{1}{n_R} \left[\dot{V}_{A,g_1} \zeta_{Aer,g_1} n_{g_1} (1 - PR_{g_1}) + \dot{V}_{A,g_2} \zeta_{Aer,g_2} (n_R - n_{g_1}) (1 - PR_{g_2}) \right]}{\frac{1}{n_R^{ref}} \left[\dot{V}_{A,g_1}^{ref} \zeta_{Aer,g_1}^{ref} n_{g_1}^{ref} (1 - PR_{g_1}^{ref}) + \dot{V}_{A,g_2}^{ref} \zeta_{Aer,g_2}^{ref} (n_R^{ref} - n_{g_1}^{ref}) (1 - PR_{g_2}^{ref}) \right]}. \quad (7)$$

Zur Abschätzung des relativen Risikos kann der Referenzsituation die aktuelle Situation in einem Raum gegenübergestellt werden. Dabei ist es möglich, weitere Tätigkeiten für die entsprechend ausgeschiedenen Aerosolmengen zu berücksichtigen, die in Tabelle 1 dargestellt sind.

Körperliche Aktivität	Atemvolumenstrom
	\dot{V}_A in m^3/h
Ausruhen	0,49
Sitzen, leichte Tätigkeit	0,54
Stehen, leichte Tätigkeit	0,78
Gehen, leichte Anstrengung	1,38
Moderate Anstrengung	2,35
Schwere Anstrengung	3,30

Sprechaktivität	Aerosolkonzentration
	ζ_{Aer} in ml/m^3
Atmen	0,0018
Sprechen	0,0096
Lautes Sprechen/Singen	0,0600

Tabelle 1: Übersicht der Volumenströme und Aerosolkonzentrationen (entnommen aus Müller et al. (2020), Tabelle 3, S. 13)

Für die Berechnung des effektiven Filtervolumens wird das relative Infektionsrisiko konstant gehalten (z. B. $RR_{inf} = 1$) und die Gleichung nach $V_{LR,eff}$ aufgelöst, so dass

$$V_{LR,eff} = \frac{1}{RR_{inf}} \left[\frac{\bar{n}_{Aer}}{\bar{n}_{Aer}^{ref}} \cdot V^{ref} \cdot LW^{ref} \cdot \frac{n_R}{n_R^{ref}} \cdot \frac{\dot{V}_A}{\dot{V}_A^{ref}} \cdot \frac{\tau}{\tau^{ref}} \right] - V \cdot LW. \quad (8)$$

In Klassenräumen wird eine natürliche Infiltration in Form einer Luftwechselrate von $LW = 0,5h^{-1}$ unterstellt. In unbelüfteten oder schwierig zu lüftenden Räumen wird daher mit einer Luftwechselrate von $LW = 0,5h^{-1}$ kalkuliert. Ist eine regelmäßige Stoßlüftung möglich (laut Empfehlungen des Umweltbundesamts alle 20 Minuten für 5 Minuten bei weit geöffneten Fenstern und Abführung der verbrauchten Luft sowie Lüftung in den großen Pausen, Umweltbundesamt (2020b)), erhöht sich die Luftwechselrate für den Zeitraum der Lüftung auf $LW = 6h^{-1}$ (Erhart et al. 2015). Dadurch entstehen starke Schwankungen der Aerosolkonzentration. Im Modell werden diese Schwankungen vereinfacht linearisiert abgebildet.

Mithilfe des Ansatzes in Gleichung (8) lässt sich das notwendige Filtervolumen für einen beliebigen Raum berechnen. Der Nutzer hat dabei die Möglichkeit, die Anzahl der Personen im Raum (n_R), die Raumgröße (V), die Aktivitäten (und damit den Volumenstrom \dot{V}_A und die Aerosolemission ζ_{Aer} für verschiedene Gruppen im Raum), die

aktuelle Raumbelüftungssituation (LW) und das relative Infektionsrisiko (RR_{inf}) zu wählen. Das folgende Beispiel zeigt die Berechnung des notwendigen Filtervolumens \dot{V}_{LR} für zwei Beispielsituationen (siehe Tabelle 2). Szenario 1 beschreibt einen Unterrichtstag in einer Grundschulklasse mit den Kernfächern Mathe, Deutsch, Sachunterricht und gegebenenfalls Englisch.¹⁰ Hierbei wird von einer Raumgröße von 66,66 Quadratmetern, einer Raumhöhe von 3 Metern, einer Belegung mit 22 Personen (davon 1 stehend, sprechend und 21 sitzend, atmend) sowie einer Aufenthaltsdauer von 5 Schulstunden ausgegangen. Der Raum ist nach den Vorgaben des Umweltbundesamtes belüftet.¹¹ Szenario 2 beschreibt die gleiche Situation, in der Schüler und Lehrer nun zusätzlich eine Mund-Nasen-Bedeckung tragen.

Parameter	Szenario 1	Szenario 2
Anzahl Personen	$n_R = 22$	$n_R = 22$
davon sitzend, sprechend	$n_{g_1} = 1$	$n_{g_1} = 1$
	$\dot{V}_{A,g_1} = 0,54$	$\dot{V}_{A,g_1} = 0,54$
	$\zeta_{Aer,g_1} = 0,0096$	$\zeta_{Aer,g_1} = 0,0096$
davon sitzend, atmend	$n_{g_2} = 21$	$n_{g_2} = 21$
	$\dot{V}_{A,g_2} = 0,54$	$\dot{V}_{A,g_2} = 0,54$
	$\zeta_{Aer,g_2} = 0,0018$	$\zeta_{Aer,g_2} = 0,0018$
Raumvolumen	$V = 200m^3$	$V = 200m^3$
Luftwechselrate	$LW = 1,85h^{-1}$	$LW = 1,85h^{-1}$
Aufenthaltsdauer	$\tau = 3,92h$	$\tau = 3,92h$
Mund-Nasen-Bedeckung	$PR_{g_1} = 0$	$PR_{g_1} = 0,5$
	$PR_{g_2} = 0$	$PR_{g_2} = 0,5$
Notwendiges Filtervolumen	$2.724,35m^3/h$	$1.177,27m^3/h$

Tabelle 2: Beispielsituationen zur Berechnung des notwendigen Filtervolumens

Für die in Tabelle 2 gezeigten Szenarien lässt sich nun gemäß des ökonomischen Bewertungskonzepts aus Kapitel 2 die kosteneffiziente Ausstattung mit mobilen Raumlufffiltern berechnen. Dazu müssen neben den oben genannten Eingaben zur Berechnung des notwendigen Filtervolumens noch das gewünschte relative Risiko RR_{inf} , der Strompreis in €/kWh, und die gewünschte Nutzungsdauer des Gerätes angegeben werden. Zudem wird nach der maximal erlaubten Dezibelbelastung¹² gefragt und ob der Filterwechsel durch den Nutzer selbst durchgeführt werden kann oder beispielsweise im Rahmen eines Wartungsvertrages mit dem Hersteller erfolgen soll.

¹⁰Musik- und Sportunterricht sind hier ausgenommen, da die dadurch entstehenden Aerosolmengen sehr groß sind, so dass eine Luftfilterung im Rahmen lärmschutzrechtlicher Vorgaben nicht sinnvoll erscheint.

¹¹Es sei darauf hingewiesen, dass aus Gründen der CO_2 -Belastung eine regelmäßige Fensterlüftung in jedem Fall erforderlich ist.

¹²Geräte, die bereits als einzelnes Gerät diesen Wert übersteigen, werden in der Optimierung nicht berücksichtigt.

Beste Option	Alternative 1	Alternative 2
1x TAP-SPC/M von Trox GmbH	1x Virosafe 2500/F100 von Viromed Medical	2x X80-L von Ulmair GmbH & Co. KG
+	+	
1x TAP-SPC/L von Trox GmbH	1x AC2887/10 von Philips GmbH	
Lebenszykluskosten pro m ³ gereinigter Luft	Lebenszykluskosten pro m ³ gereinigter Luft	Lebenszykluskosten pro m ³ gereinigter Luft
0,0005€/m ³	0,0005€/m ³	0,0006€/m ³
Gesamte Installations- und Folgekosten	Gesamte Installations- und Folgekosten	Gesamte Installations- und Folgekosten
4.153,89€	4.168,92€	5.305,47€
Lärmbelastung in Dezibel	Lärmbelastung in Dezibel	Lärmbelastung in Dezibel (höher als 40)
31,79dB	38,20dB	40,26dB
Kosten pro Person pro Jahr	Kosten pro Person pro Jahr	Kosten pro Person pro Jahr
49,59€	49,77€	63,33€

Abbildung 1: Kosteneffiziente Ausstattung Szenario 1, $RR_{inf} = 1$, Strompreis: 0,30€/kWh, 4 Jahre Nutzungsdauer, Filterwechsel durch Nutzer möglich, maximal erlaubte Lärmbelastung: 40db

Auf Basis der bis zum 30.04.2021 von den Herstellern in der Datenbank eingetragenen Geräte sowie der Nutzerangaben bzgl. des relativen Infektionsrisikos, des Strompreises, der Nutzungsdauer und der maximal erwünschten Lärmbelastung ergibt sich die in Abbildung 1 gezeigte kostengünstigste Ausstattung.

Die Berechnung mithilfe des Kalkulationstools gibt dabei nicht nur die kostengünstigste Option, sondern auch zwei weitere Alternativen aus, die dadurch ermittelt werden, dass die in der/n vorherigen Option/en identifizierten Geräte aus der Berechnung für die jeweils nächste Alternative eliminiert werden. Dies berücksichtigt den Umstand, dass die in der/n vorherigen Option/en gezeigten Geräte evtl. nicht kurzfristig lieferbar sind. Es ist zu beachten, dass die so ermittelten Alternativen 1 und 2 in diesem Fall nicht notwendigerweise mit der zweit- bzw. drittbesten Option im Sinne der Kosteneffizienz gleichzusetzen sind, da jeweils alle Geräte der vorherigen Option für die weitere Optimierung eliminiert werden. Würden jedoch einzelne, in den vorherigen Optionen enthaltene Geräte für die weitere Optimierung erlaubt, könnten sich alternative Kombinationen ergeben, die günstiger als die hier gezeigte Alternative 1 oder 2 sind.

Zudem werden die mit der Lösung verbundenen Gesamtkosten, Lebenszykluskosten, Kosten pro Person pro Jahr sowie die Dezibelbelastung ausgegeben. Sofern letztere oberhalb des vom Nutzer eingegebenen Grenzwertes liegt, wird der Nutzer darauf hingewiesen. Für Szenario 2, wenn zusätzlich Mund-Nasen-Bedeckungen getragen werden, ergeben sich die in Abbildung 2 abgebildete optimale Ausstattung sowie zwei weitere Alternativen.

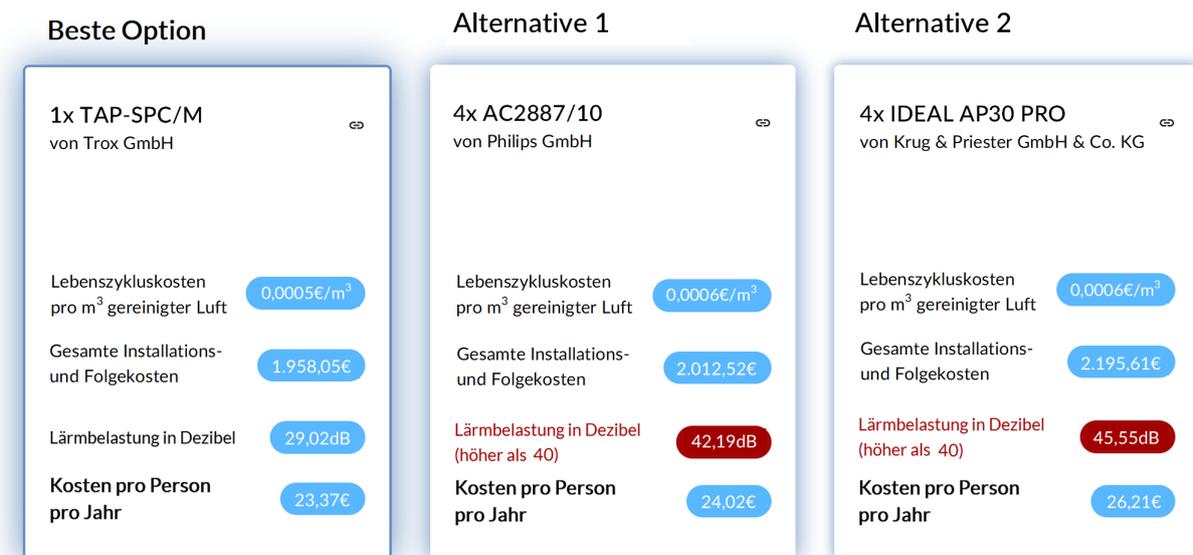


Abbildung 2: Kosteneffiziente Ausstattung Szenario 1, $RR_{inf} = 1$, Strompreis: 0,30€/kWh, 4 Jahre Nutzungsdauer, Filterwechsel durch Nutzer möglich, maximal erlaubte Lärmbelastung: 40db

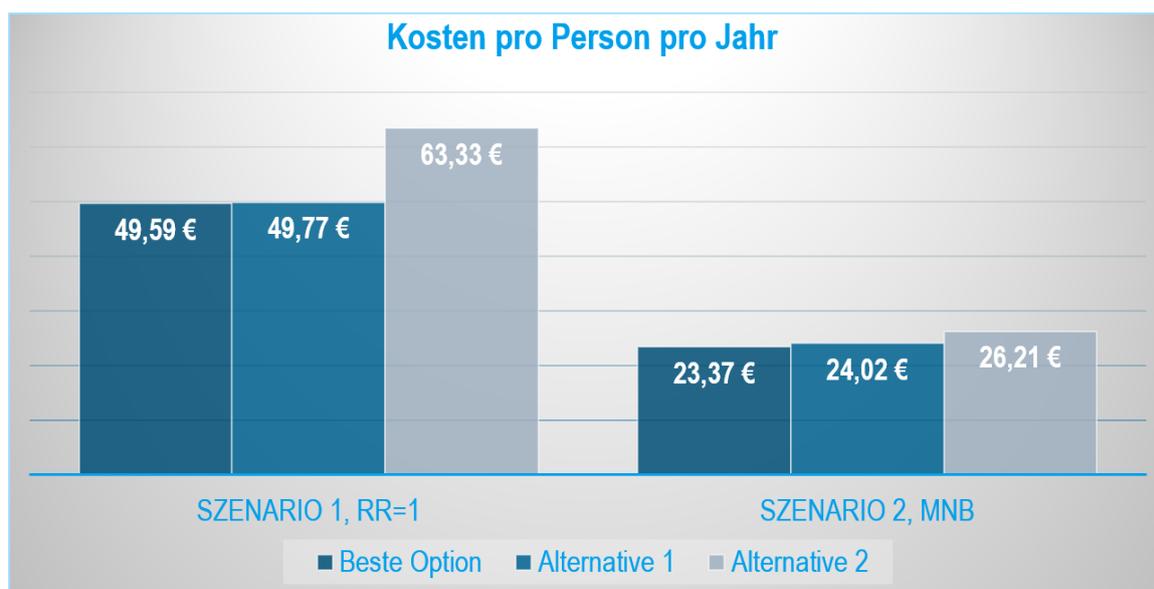


Abbildung 3: Kosten pro Person pro Jahr

Die Ergebnisse dieser beispielhaften Rechnung machen deutlich, dass Szenario 1, das die Rückkehr zu einem nahezu regulären Schulbetrieb in der Grundschule repräsentiert, mit Kosten pro Person pro Jahr von unter 50€ in der kostengünstigsten Variante verbunden wäre. Abbildung 3 zeigt die Kenngröße *Kosten pro Person pro Jahr* für die beiden Szenarien und alle drei Optionen im Vergleich. Tragen alle Personen im Raum Mund-Nasen-Bedeckungen, reduziert dies die Kosten um etwa die Hälfte.

4 Zusammenfassung und Diskussion

Mobile Raumlufilter können in Kombination mit einer regelmäßigen Fensterlüftung dazu eingesetzt werden, das Ansteckungsrisiko mit dem *SARS-CoV-2*-Virus in Schulen erheblich zu senken. Über den Online-Rechner www.airfiltercalculator.com können Nutzer die kosteneffiziente Ausstattung mit mobilen Raumlufiltern berechnen und die zugehörigen Kosten kalkulieren. Neben der kostengünstigsten Variante wird auch eine zweite und dritte alternative Ausstattung gezeigt. Zudem wird ein Grenzwert für die Lärmbelastung in der Berechnung berücksichtigt. Modellberechnungen zeigen, dass die Rückkehr zu einem nahezu regulären Schulbetrieb in der Grundschule mit Kosten von unter 50€ pro Person pro Jahr in der kostengünstigsten Variante möglich ist.¹³

Die Berechnungen unterliegen gewissen Vereinfachungen und Annahmen, die insbesondere bei der Beurteilung des Ansteckungsrisikos zu beachten sind. Unter anderem wird von einer idealen Mischlüftung im Raum ausgegangen, in der sich die Aerosole gleichmäßig verteilen. Erste Simulationsstudien zeigen, dass die Verbreitung der Aerosole erst nach einer gewissen Zeit im Raum gleichmäßig ist (Hochschule Rhein-Main 2020). Damit erhält beispielsweise die Absaugungshöhe der Luft durch den mobilen Raumlufilter eine gewisse Bedeutung für die Filtereffizienz. Zudem wird angenommen, dass das Infektionsrisiko linear in der Anzahl eingeatmeter Viren steigt.

Die Berechnungen sind insgesamt konservativ geschätzt, da für die Berechnung des notwendigen Filtervolumens jeweils die Abscheidegrade an der schlechtesten Stelle sowie die Maximalwerte bei Stromverbrauch und Lärmbelastung berücksichtigt wurden. Es ist daher davon auszugehen, dass die im Rahmen des Kalkulationstools ermittelten Werte eher als Maximalwerte zu interpretieren sind.

Weiterhin basieren die Berechnungen auf Angaben der Hersteller mobiler Raumlufilter in Bezug auf das Filtervolumen, die Kosten, den Stromverbrauch und die Lärmbelastung. Inwieweit die Filter beispielsweise tatsächlich die genannte Leistung im realen Betrieb erbringen und inwieweit die genannten Stromverbräuche und Lärmbelastungen der Realität entsprechen, ist durch weitere Untersuchungen zu klären.

¹³Es sei darauf hingewiesen, dass Experten aktuell eine Kombination von Lüften/Luftfiltern, Masken, und Schnelltests für die effiziente Reduzierung des Infektionsrisikos in Schulen empfehlen.

Literatur

- Curtius, J., M. Granzin, und J. Schrod (2021). Testing mobile air purifiers in a school classroom: Reducing the airborne transmission risk for sars-cov-2. *Aerosol Science and Technology* 55(5), 586–599.
- Deutsche Gesellschaft für Epidemiologie, Deutsche Gesellschaft für Public Health, Deutsche Gesellschaft für Kinder- und Jugendmedizin, und Deutsche Gesellschaft für pädiatrische Infektiologie (Eds.) (2021). *S3-Leitlinie: Maßnahmen zur Prävention und Kontrolle der SARS-CoV-2-Übertragung in Schulen | Lebende Leitlinie*. AWMF Online, https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/027-076k_Praevention_und_Kontrolle_SARS-CoV-2-Uebertragung_in_Schulen_2021-02_01.pdf, letzter Abruf: 22.04.2021.
- Erhart, T., D. Guerlich, T. Schulze, und U. Eicker (2015). Experimental Validation of Basic Natural Ventilation Air Flow Calculations for different Flow Path and Window Configurations. *Energy Procedia* 78, 2838–2843.
- Glenk, G. und S. Reichelstein (2020). Synergistic Value in Vertically Integrated Power-to-Gas Energy Systems. *Production and Operations Management* 29(3), 526–546.
- Hochschule Rhein-Main (2020). Infektionsrisiko COVID-19, <https://www.hs-rm.de/de/fachbereiche/ingenieurwissenschaften/aktuelles/details/artikel/infektionsrisiko-covid-19>, letzter Abruf: 22.04.2021.
- Müller, D., K. Rewitz, D. Derwein, T. M. Burgholz, M. Schweiker, J. Bardey, und P. Tappeler (2020). Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen. *RWTH Aachen*.
- Müller, D., K. Rewitz, D. Derwein, T. M. Burgholz, M. Schweiker, J. Bardey, und P. Tappeler (2021). Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen (2. überarbeitete und korrigierte Auflage). *RWTH Aachen*.
- Reichelstein, S. und A. Rohlfing-Bastian (2015). Levelized product cost: Concept and decision relevance. *The Accounting Review* 90(4), 1653–1682.
- Santarpia, J. L., D. N. Rivera, V. Herrera, M. J. Morwitzer, H. Creager, G. W. Santarpia, K. K. Crown, D. M. Brett-Major, E. Schnaubelt, M. J. Broadhurst, J. V. Lawler, P. St. Reid, und J. J. Lowe (2020). Transmission Potential of SARS-CoV-2 in Viral Shedding Observed at the University of Nebraska Medical Center. *medRxiv preprint*.

Umweltbundesamt (2020a). Das Risiko einer Übertragung von SARS-CoV-2 in Innenräumen lässt sich durch geeignete Lüftungsmaßnahmen reduzieren. *Umweltbundesamt, Kommission Innenraumlufthygiene*.

Umweltbundesamt (2020b). Lüften in Schulen - Empfehlungen des Umweltbundesamtes zu Luftaustausch und effizientem Lüften zur Reduzierung des Infektionsrisikos durch virushaltige Aerosole in Schulen. *Umweltbundesamt*.

van Doremalen, N., T. Bushmaker, D. H. Morris, M. G. Holbrook, A. Gamble, B. N. Williamson, T. Tamin, J. L. Harcourt, N. J. Thornburg, S. I. Gerber, J. O. Lloyd-Smith, E. de Wit, und V. J. Munster (2020). Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. *The New England Journal of Medicine* 328(16).

Anhang

Nr.	Hersteller
1	aeris Professional Air Purifiers
2	AFS Airfilter Systeme GmbH
3	AirMex
4	Airpura
5	AL-KO
6	BlueAir
7	Edringer & Edringer OHG
8	Erwin Junker Maschinenfabrik GmbH
9	Euromate GmbH
10	FLEX Elektrowerkzeuge GmbH
11	Hengst SE
12	HEYLO GmbH
13	HS Solution GmbH
14	HOWATHERM Klimatechnik GmbH
15	IQAir
16	Kampmann GmbH & Co. KG
17	Leitz ACCO Brands GmbH & Co. KG
18	LTA Lufttechnik GmbH
19	Krug & Priester GmbH & Co. KG
20	MANN+HUMMEL International GmbH & Co. KG
21	Miele
22	Philips GmbH
23	QleanAir Scandinavia
24	Roters GmbH
25	SLT Schanze Lufttechnik GmbH & Co. KG
26	STIEBEL ELTRON GmbH & Co. KG
27	Trotec GmbH
28	TROX GmbH
29	UlmAIR GmbH & Co. KG
30	Viromed Medical
31	VKF Renzel GmbH
32	Wenski Gute Raumlufte
33	Wolf GmbH Mainburg

Tabelle 3: Liste der angefragten Hersteller mobiler Raumluftefilter

Nr.	Hersteller	Gerät
1	aeris Professional Air Purifiers	aaair Medical Pro
2	AFS Airfilter Systeme GmbH	AFS 2000 RLC-X
3	Airpura	R615
4	Airpura	UV614
5	Airpura	UV615
6	alfda	ALR550 Comfort
7	Euromate	Pure Air Shield 3300 (PAS)
8	FLEX Elektrowerkzeuge GmbH	VAC 800-EC Air Protect 14
9	Hengst SE	Blue.care+
10	HEYLO GmbH	PF3500
11	HEYLO GmbH	PF1400
12	HEYLO GmbH	HL400
13	HS Solution GmbH	RLF200H
14	Kampmann GmbH & Co. KG	KA-520
15	Krug & Priester GmbH & Co. KG	IDEAL AP30 PRO
16	Krug & Priester GmbH & Co. KG	IDEAL AP40 PRO
17	Krug & Priester GmbH & Co. KG	IDEAL AP60 PRO
18	Krug & Priester GmbH & Co. KG	IDEAL AP80 PRO
19	Krug & Priester GmbH & Co. KG	IDEAL AP25
20	Krug & Priester GmbH & Co. KG	IDEAL AP35
21	LTA Lufttechnik GmbH	VC 60+
22	Miele	PAC 1080
23	Philips GmbH	AC2887/10
24	QleanAir Scandinavia	FS 30
25	Roters GmbH	XG 500 Basic
26	Roters GmbH	XG 270 H14
27	Roters GmbH	XG 800 Profi H14
28	SLT Schanze Lufttechnik GmbH & Co. KG	UV-C AIR CLEANER 15
29	SLT Schanze Lufttechnik GmbH & Co. KG	UV-C AIR CLEANER 30
30	SLT Schanze Lufttechnik GmbH & Co. KG	UV-C AIR CLEANER 45
31	SLT Schanze Lufttechnik GmbH & Co. KG	UV-C AIR CLEANER 75
32	Trotec GmbH	TAC V+
33	TROX GmbH	TAP-SPC/M
34	TROX GmbH	TAP-SPC/L
35	UlmAIR GmbH & Co. KG	X80-L
36	Viomed Medical	Akut 1000/F500
37	Viomed Medical	Virosafe 2500/F1000
38	VKF Renzel GmbH	PLR-Silent
39	Wolf GmbH Mainburg	Airpurifier

Tabelle 4: Liste der in der Datenbank enthaltenen mobilen Raumluftfilter
(Stand: 30.04.2021)

Fragebogen Luftfilter

Sehr geehrte Damen und Herren,

wir freuen uns, dass Sie das Forschungsprojekt "Abschätzung der Folgekosten der Installation mobiler Raumlufffilter in Klassenräumen" an der Goethe-Universität Frankfurt, gefördert durch die Friedrich Flick Förderungstiftung, unterstützen!

Auf den nachfolgenden Seiten können Sie als Hersteller mobiler Raumlufffilter Daten zu den von Ihnen angebotenen Geräten eintragen. Bitte füllen Sie den Fragebogen für jedes Gerät einzeln aus und machen Sie wenn möglich Angaben zu allen Fragen. Nur so können wir Ihre Geräte in unsere Datenbank aufnehmen und in der Berechnung berücksichtigen.

Sollten Sie weitere Informationen zu unserem Forschungsprojekt wünschen, kontaktieren Sie uns bitte unter rohlfing-bastian@econ.uni-frankfurt.de.

Mit freundlichen Grüßen,
Prof. Dr. Anna Rohlfing-Bastian, Goethe-Universität Frankfurt
Dr. Gunther Glenk, Universität Mannheim

1. Bitte geben Sie den Herstellernamen an:

2. Bitte geben Sie die Modellbezeichnung bzw. den Namen des mobilen Raumlufffilters an:

3. Bitte geben Sie die Zertifizierung des Gerätes an: H13 H14**4. Bitte geben Sie die Filterleistung (CADR in Kubikmeter pro Stunde) an:** m³/h**5. Ist die Betriebsleistung des Gerätes einstellbar?** ja, stufenlos ja, in Stufen (bitte spezifizieren): nein**6. Für welche maximale Raumgröße in Quadratmetern ist das Gerät ausgelegt?** m²**7. Bitte machen Sie Angaben zu den Abmessungen des Geräts in Zentimetern:**Höhe cmBreite cmTiefe cm**8. Bitte geben Sie das Gewicht des Gerätes in Gramm an:** g

9. Besitzt das Gerät eine Erhitzungsfunktion zum Abtöten von Viren?

- Ja
 Nein

10. Wie wird das Gerät im Raum aufgestellt?

- fest verbaut in der Wand
 fest verbaut auf dem Boden
 rollbar auf dem Boden stehend
 auf dem Boden stehend (ohne Rollen)
 Sonstiges (bitte spezifizieren): _____

11. Auf welcher Höhe erfolgt die Absaugung der Luft durch das Gerät?

- Deckenhöhe
 Kopfhöhe
 Sonstiges (bitte spezifizieren): _____

12. Bitte geben Sie den Nettopreis des Gerätes in Euro an:

€

13. Ist die Anfangsausstattung mit Filtern im Nettopreis des Gerätes bereits enthalten?

- ja
 nein

14. In welcher Höhe fallen Versandkosten für die Lieferung des Gerätes nach Deutschland an? Bitte geben Sie den Betrag in Euro an:

€

15. In welcher Höhe gewähren Sie Mengenrabatte bei Mehrfachbestellungen des Gerätes?

- Ab Geräten werden Prozent Rabatt gewährt
Ab Geräten werden Prozent Rabatt gewährt
Ab Geräten werden Prozent Rabatt gewährt

16. Bitte geben Sie die jährlichen Wartungskosten für das Gerät in Euro an:

€

17. Welche Filter benötigt das Gerät?

- H13/H14
 Vorfilter
 Aktivkohlefilter
 Sonstige (bitte spezifizieren):

18. Wie hoch ist das Wechselintervall des H13/14-Filters in Jahren oder Betriebsstunden?Wechsel alle JahreWechsel nach Betriebsstunden**19. Bitte geben Sie den Nettopreis des H13/H14-Filters in Euro an:** €**20. Bitte geben Sie die Versandkosten für den H13/H14-Filter in Euro an:** €**21. Kann der Wechsel des H13/H14-Filters durch den Nutzer erfolgen oder ist der Wechsel durch Fachpersonal vorzunehmen?**

- Nutzer
- Fachpersonal

22. Wie hoch sind die beim Wechsel des H13/14-Filters entstehenden Kosten durch den Fachmann (ohne Materialkosten für den Filter) in Euro? €**23. Wie hoch sind die Entsorgungskosten des H13/H14-Filters in Euro?** €

24. Wie hoch ist das Wechselintervall des Vorfilters in Jahren oder Betriebsstunden?Wechsel alle JahreWechsel nach Betriebsstunden**25. Bitte geben Sie den Nettopreis des Vorfilters in Euro an:** €**26. Bitte geben Sie die Versandkosten für den Vorfilter in Euro an:** €**27. Kann der Wechsel des Vorfilters durch den Nutzer erfolgen oder ist der Wechsel durch Fachpersonal vorzunehmen?**

- Nutzer
- Fachpersonal

28. Wie hoch sind die beim Wechsel des Vorfilters entstehenden Kosten durch den Fachmann (ohne Materialkosten für den Filter) in Euro? €**29. Wie hoch sind die Entsorgungskosten des Vorfilters in Euro?** €

30. Wie hoch ist das Wechselintervall des Aktivkohlefilters in Jahren oder Betriebsstunden?Wechsel alle JahreWechsel nach Betriebsstunden**31. Bitte geben Sie den Nettopreis des Aktivkohlefilters in Euro an:**€ **32. Bitte geben Sie die Versandkosten für den Aktivkohlefilter in Euro an:**€ **33. Kann der Wechsel des Aktivkohlefilters durch den Nutzer erfolgen oder ist der Wechsel durch Fachpersonal vorzunehmen?**

- Nutzer
- Fachpersonal

34. Wie hoch sind die beim Wechsel des Aktivkohlefilters entstehenden Kosten durch den Fachmann (ohne Materialkosten für den Filter) in Euro? €**35. Wie hoch sind die Entsorgungskosten des Aktivkohlefilters in Euro?** €

36. Wie hoch ist das Wechselintervall des Filters in Jahren oder Betriebsstunden?Wechsel alle JahreWechsel nach Betriebsstunden**37. Bitte geben Sie den Nettopreis des Filters in Euro an:** €**38. Bitte geben Sie die Versandkosten für den Filter in Euro an:** €**39. Kann der Wechsel des Filters durch den Nutzer erfolgen oder ist der Wechsel durch Fachpersonal vorzunehmen?**

- Nutzer
- Fachpersonal

40. Wie hoch sind die beim Wechsel des Filters entstehenden Kosten durch den Fachmann (ohne Materialkosten für den Filter) in Euro? €**41. Wie hoch sind die Entsorgungskosten des Filters in Euro?** €

42. Bitte geben Sie die elektrische Leistung des Gerätes in kW an:

kW

43. Bitte geben Sie die maximale Betriebsdauer des Gerätes in Stunden pro Tag an:

h/Tag

44. Wie hoch ist die Lärmbelastung durch das Gerät in Dezibel?

dB

45. Wie lang ist auf Basis Ihrer Erfahrungswerte die übliche Nutzungsdauer des Gerätes in Jahren bevor es ersetzt wird?

Jahre

46. Wie lange gewähren Sie Garantie auf das Gerät in Jahren?

Jahre

47. Haben Sie noch zusätzliche Informationen zum Filtergerät, die Sie uns mitteilen möchten?

Vielen Dank!

Vielen Dank für die Eingabe Ihrer Daten!

48. Sie interessieren sich für die Ergebnisse unserer Studie? Dann hinterlassen Sie uns gerne eine E-Mail-Adresse.

Letzte Seite

Vielen Dank für die Eingabe Ihrer Daten und die Unterstützung unseres Forschungsprojekts!

Ihre Eingaben wurden gespeichert - Sie können das Browserfenster nun schließen.

Kontakt:

Prof. Dr. Anna Rohlfing-Bastian
Goethe-Universität Frankfurt
Fachbereich Wirtschaftswissenschaften
Theodor-W.-Adorno-Platz 4
60629 Frankfurt am Main
rohlfing-bastian@econ.uni-frankfurt.de

Prof. Dr. Anna Rohlfing-Bastian
Goethe-Universität Frankfurt
Fachbereich Wirtschaftswissenschaften
Professur für Rechnungswesen, insb. Management Accounting
rohlfing-bastian@econ.uni-frankfurt.de 2020