

# Messung und Bewertung der Keim- und Staubpartikelreduktion in Klassenräumen durch Luftreiniger der Schulz & Berger GmbH

Gutachten Nr. 01020/01

Erstellt im Auftrag der  
Schulz & Berger  
Luft- und Verfahrenstechnik GmbH  
Zschernitscher Straße 74  
D-04600 Altenburg

13. Oktober 2020



---

Labor für Arbeits- und Umwelthygiene  
Dr. rer. nat. Thomas Missel  
Tiefe Trift 6  
D-30916 Isernhagen / Hannover  
Telefon 05139 / 959 9259  
und 0172 / 515 00 42  
Fax 05139 / 982 4506

## INHALTSVERZEICHNIS

1	ANLASS UND AUFGABENSTELLUNG	1
2	GRUNDLAGEN	2
2.1	Hintergrund der Entwicklung	2
2.2	Stand der Technik von Luftreinigern	3
2.3	Wissenschaftliche Aspekte der Prüfungen	4
2.4	Erwartete Ergebnisse des Versuchs	5
3	DURCHFÜHRUNG DER UNTERSUCHUNGEN	6
3.1	Luftkeimmessungen mit dem Impaktor MBASS30	6
3.2	Kultivierung der Mikroorganismen	7
3.3	Korrelierte Partikelzählung	7
3.4	Optische Staubmessung mit Partikelzählgeräten	8
3.4.1	Geräteeigenschaften	8
3.4.2	Messprinzip	8
3.4.3	Grundlegendes zur Kalibration der Staubpartikelzählgeräte	8
3.4.4	Grenzen der Einsetzbarkeit / Luftfeuchtigkeit	9
3.5	Messung der klimatischen Umgebungsparameter	9
3.6	Beschreibung und technische Details der Lüftungsanlage	9
3.7	Referenzparameter Raum-Personen-Last (RPL)	10
3.8	Betriebsbedingungen an den beiden Untersuchungstagen	10
3.9	Untersucher	11
4	BESPRECHUNG DER MESSERGEBNISSE	12
4.1	Ergebnisse der Korrelierten Partikelzählung	12
4.2	Zu den Leistungskennwerten der Luftreiniger im Einzelnen	20
5	ZUSAMMENFASSUNG DER MESSERGEBNISSE	26
6	KURZZUSAMMENFASSUNG	31
7	LITERATUR	34

## **1 Anlass und Aufgabenstellung**

Die Schulz & Berger Luft- und Verfahrenstechnik GmbH hat ein Luftreinigungssystem für Aufenthaltsräume zum Schutz der sich in Innenräumen ständig aufhaltenden Menschen gegen infektiöse luftgetragene Viren entwickelt. Das Labor für Arbeits- und Umwelthygiene wurde von der Schulz & Berger GmbH beauftragt, lufthygienische Untersuchungen in personenfrequentierten Aufenthaltsräumen durchzuführen und das Luftreinhalteverfahren auf die Wirksamkeit hinsichtlich einer Reduzierung des Infektionsdrucks durch CORONA-Viren zu prüfen. Hierzu waren Staubpartikel- und Luftkeimmessungen zur Effizienzbeurteilung zu konzipieren und durchzuführen. Als Referenzgrößen wurden der Feinstaubpartikel- und Mikroorganismengehalt in dem atmosphärischen Milieu, das die technischen Luftreinhaltemaßnahmen unmittelbar umgibt, bestimmt. Als Untersuchungsobjekte wurden Schulklassenräume eines Gymnasiums in Altenburg / Thüringen ausgewählt. Die gutachtenegegenständlichen Prüfungen wurden am 29.09. und 30.09.2020 durchgeführt.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Hintergrund der Entwicklung

Die Schulz & Berger Luft- und Verfahrenstechnik GmbH hat ein Belüftungssystem für ständige Arbeitsplätze zum Schutz der Beschäftigten gegen luftgetragene Viren, Bakterien und Schimmelpilze entwickelt. Das Belüftungssystem basiert auf den bewährten „Luftduschen“ der Schulz & Berger GmbH für Arbeitsplätze, die bekanntermaßen auch bei Vorherrschen komplizierter Luftströmungs-verhältnisse, wie sie z.B. in Arbeitskabinen im Bereich der Abfallwirtschaft gegeben sind, außerordentlich stabile, verwirbelungsarme bis -freie (Laminar-) Luftströmungen generieren können. Zur Vermeidung des Eindringens von Mikroorganismenpartikeln und infektiösen Tröpfchen in die Arbeitsplatzatmosphäre von der Seite her und die unmittelbare Virenübertragung von Mensch zu Mensch am Dauerarbeitsplatz dadurch wurde die „Luftduche“ durch einen Luftschleier, der ein Vordringen luftgetragener Mikroorganismen in den Reinluftstrom im horizontalen Verlagerungsgeschehen unterbindet, erweitert.

Die Schutzmaßnahmenentwicklung erfolgte vor dem Hintergrund der derzeitigen CORONA-Viruspandemie, in der von der Politik zur Verhinderung einer massenhaften Virusverbreitung u.a. das Tragen von Atemschutzmasken bei Zusammenkünften mehrerer Personen im öffentlichen Raum angeordnet wurde. Diese persönliche Schutzmaßnahme zielt weniger auf eine Reduzierung des Infektionsdrucks auf den Maskenträger ab, sondern ist eher als Schutzmaßnahme gegen eine Freisetzung virenkontaminierter Tröpfchen über Mund und Nase durch ggf. mit dem Virus infizierte Trägerpersonen gedacht. Als wirksamer Schutz gegen eine Virusinfektion über den Luftweg und die Aufnahme über die Lunge werden filtrierende Halbmasken mindestens der Filterklasse P2 empfohlen.

In einigen Bundesländern in Deutschland wurde u.a. in Schulen zur Abminderung des Infektionsrisikos durch das Virus und zur Sicherstellung eines angemessenen Schutzes der Schüler durch ggf. infektiöse Tröpfchen das konsequente Tragen von Atemschutzmasken angeordnet. Durch diese Maßnahme soll der Infektionsdruck, der auf der Klassengemeinschaft bei Anwesenheit eines virusinfizierten Mitschülers lastet, entscheidend abgemindert und ein regulärer Schulbetrieb selbst bei einzelnen Infektionsfällen gewährleistet werden. Permanentes Tragen von Atemschutzmasken indes ist physisch stark belastend und erschwert die wichtige Sozialkommunikation in erheblichem Maße. Darüber hinaus sind ständige Maskenbeschaffungen für die gesamte Schülerschaft mit erheblichen Kosten verbunden und stark etatbelastend. Standardisierte Lüftungspläne, wie sie sich derzeit in Diskussion befinden bzw. in Erarbeitung sind, die genau festlegen sollen, wie häufig und wie lange im Laufe einer Unterrichtsstunde zu lüften ist, sind bei Kenntnis innenraumhygienischer Verhältnisse aus mehreren Gründen von vorneherein als abwegig abzuqualifizieren.

Es besteht insofern ein dringender Bedarf an technischen Schutzmaßnahmen gegen Luftschadstoffe im allgemeinen und hoch infektiöse Mikroorganismen wie das CORONA-Virus im Besonderen, die persönliche Atemschutzrüstung in Aufenthaltsräumen wie Schulen oder Büros entbehrlich und körperliche und soziale Arbeiterschwernisse, die durch andauerndes Tragen von Atemschutzmasken entstehen, vermeidbar macht.

## 2.2 Stand der Technik von Luftreinigern

Durch die effektive Filterung der Zuluft mit heute zur Verfügung stehenden engporigen HEPA-Filtern kann ein Eintrag von Keimen über die Belüftung in Aufenthaltsräume schon jetzt weitgehend eliminiert werden. Luftturbulenzen und Verwirbelungen der keimfreien Zuluft mit ggf. mikrobiell belasteter Arbeitsplatzumgebungsluft lassen sich mit den „Luftduschen“-Belüftungssystemen der Schulz & Berger GmbH ebenfalls weitestgehend vermeiden. Allerdings kann mit den derzeit im Einsatz befindlichen Systemen nicht mit ausreichender Sicherheit verhindert werden, dass von virusinfizierten Personen z.B. beim Niesen oder Husten freigesetzte Viruspartikel sich in dem gesamten Raum verteilen und anreichern, irgendwann von anderen Personen eingeatmet und über die Schleimhäute aufgenommen und dadurch eine Infektion auslösen können.

Das Labor für Arbeits- und Umwelthygiene wurde von der Schulz & Berger GmbH beauftragt, lufthygienische Untersuchungen an dem neuen Luftschleier-Zuluftelement durchzuführen und das Luftreinhalteverfahren hinsichtlich seiner Effizienz zu prüfen. Anhand einer Kanalvorrichtung zur Beschleunigung luftgetragener Partikel aus der Umgebung, der in rechtem Winkel zu dem Luftschleier unmittelbar vor diesem positioniert wurde, wurde u.a. das Ausstoßen schwebfähiger Partikel und Tröpfchen durch das Atmen und das Husten / Niesen einer nahe am Mitarbeiter stehenden Person simuliert. Als Referenzgrößen wurden der Partikel- und Keimgehalt in dem atmosphärischen Milieu, das den Versuchsstand unmittelbar umgibt, bestimmt.

Bei diesen Prüfungen zeigte sich ein wichtiger positiver Nebeneffekt, für den die hohen Luftdurchsätze und die großen Effizienzen der Keim- und Staubpartikelabscheidung in den eingebauten HEPA-Filtern verantwortlich ist, und zwar in der schnell ablaufenden allgemeinen Entkeimung der Innenraumluft in einem geschlossenen Raum. In einem etwa 150 m<sup>3</sup> umfassenden Raumvolumen wurden die Gesamtpartikelkonzentrationen (alle Partikel > 0,3 µm aerodynamischer Durchmesser) innerhalb von etwa 15 Minuten auf etwa 1 bis 3 % Restbelastung reduziert.

Nicht nur vor dem Hintergrund des derzeitigen Pandemiegeschehens, sondern in Bezug auf virale Infektionen im Allgemeinen wie z.B. durch „normale“, seit jeher saisonal erscheinende Grippeviren kann dieser Effekt von eminent großer Bedeutung sein, da die Belüftungssysteme dazu beitragen können, den Kontaminations- und Infektionsdruck durch bakterielle Erreger und krankmachende Viren in der Luft in stark personenfrequentierten Betriebsstätten zu senken.

### 2.3 Wissenschaftliche Aspekte der Prüfungen

Festzustellen war die Luftreinigungsleistung der Schulz & Berger-Zuluftelemente gegen sich ausbreitende bakterien- und virenkontaminierte Nies- und Hustenaerosole von infizierten Menschen, die sich gemeinsam mit nicht-infizierten Personen in einem Raum aufhalten. Gesamtpartikelmessungen lassen keine gesicherten Aussagen über die momentane Last der Raumluft an Bakterien, Viren oder Schimmelpilzen zu. Korrelationen zwischen Mikroorganismen und Partikeln in der Luft gibt es zwar, sie betreffen aber immer nur ganz bestimmte Partikelgrößen des gesamten luftgetragenen Partikelkollektivs (5,6,7,8,9,10). Eine direkte Erfassung und Quantifizierung infektiöser Viren in der Innenraumluft im Routineverfahren ist nicht möglich, entsprechende Verfahren sind bisher noch nicht entwickelt worden und stehen auch nicht in Aussicht einer Entwicklung.

Insofern waren mikrobiologische Ersatzparameter in Anschlag zu bringen. Infizierte Personen geben infektiöse Viruspartikel nicht nur beim Husten, Niesen und Sprechen, sondern auch beim Atmen und somit laufend in die Umgebung ab. Auch Bakterien werden von allen Menschen, Infizierten und nicht-Infizierten, ständig an die Umgebungsluft abgegeben. Die meisten der vom Menschen an die Umgebung abgegebenen Bakterien (Kommensalen) sind in der Innenraumluft mit relativ einfachen Verfahren einigermaßen verlässlich quantifizierbar.

Bei dem Versuchsansatz der vorliegenden Expertise mit einer Beprobung von Schulklassenräumen während des laufenden Schulunterrichts wird der Bakterienpool in der Innenraumluft durch anthropogene Emissionen ständig nachgefüllt, so wie das bei der Freisetzung von Viruspartikeln bei Anwesenheit infizierter Personen auch zu erwarten ist. Dieser Ansatz der Nachweisführung der Reinigungseffizienz über die Messung luftgetragener Bakterien (Kommensalen) wird als wesentlich realitätsnaher erachtet als Prüfungen, bei denen zur Simulation einer Viruspartikelfreisetzung einmalig zu Versuchsbeginn feinpartikuläre künstliche Aerosole vernebelt und der Verlauf der Abklingphase nach dem Emissionsereignis aufgezeichnet wird.

Zur Konzeption einer möglichst realitätsnahen Schutzmaßnahmenprüfung werden Informationen zur Größe der vom Menschen ausgestoßenen, viral kontaminierten Tröpfchen und Aerosole benötigt.

Im Internet sind Ergebnisse von Versuchen mit einer Hustenpuppe abrufbar, bei der ein Partikelzähler direkt unter dem Mund der Puppe zeigte, dass die optischen **Durchmesser der Hustenpartikel** weitgehend im Bereich der lungengängigen Größe lagen. Der größte Teil des Virus wurde in der 1–4 µm-Aerosolfraktion (74,6% ± Standardfehler 1,99%) und der < 1 µm-Fraktion (18,5% ± Standardfehler 2,17%) gewonnen. Der Rest wurde in der Fraktion > 4 µm (7,5% ± Standardfehler 0,70%) nachgewiesen (<https://www.condair.de/medizinische-studien/uebertragung-von-grippe-viren-durch-die-luft>). Diese Ergebnisse stimmen mit den Angaben anderer Autoren überein: Nach (1) sollen infektiöse Partikel in Virus-Aerosolen durchschnittliche Durchmesser von 3 µm aufweisen.

In der Literaturquelle (4) findet sich die Angabe, dass es zur Virenübertragung durch Inhalation relativ kleiner infizierter Tröpfchen oder ihrer pathogenhaltigen festen Rückstände mit Größen von  $< 5\text{--}10\ \mu\text{m}$ , die als Tröpfchenkerne bezeichnet werden und sich aus den kleinen Tröpfchen durch Verdunstung bilden, kommen kann. Ein Beispiel für die Tröpfchengrößenverteilung für Husten wird in der betreffenden Studie genannt. Diese zeigt eine maximale Tropfengröße von  $\sim 15\ \mu\text{m}$  an. Die damit verbundene Absetzgeschwindigkeit beträgt  $6,5\ \text{mm/s}$  in der für den Winter in Innenräumen typischen Umgebungsluft. Der Wolkenradius  $r$  nimmt linear mit dem Abstand  $s$  zu.

Im Hinblick auf die Ausbreitung von Husten- und Niesaaerosolen ergab sich aus früheren Untersuchungen die Schlussfolgerung, dass größere Tröpfchen weiter fliegen sollten als kleinere, da sie mehr Masse und damit bei gleicher Geschwindigkeit auch mehr Impuls haben. Es sollte also länger dauern, bis sie abgebremst werden und absinken. Dabei ergaben genauere Prüfungen mit Hochleistungskameras in jüngerer Zeit ein genau umgekehrtes Bild zu bisherigen Forschungsergebnissen: Die gasförmigen Strömungen wirbeln die Tröpfchen strudelförmig umher und halten sie in der Luft. Die schwereren Tröpfchen sinken in diesen Wirbeln schneller nach unten, die kleineren fliegen eine viel weitere Strecke. Erst wenn sich die wirbelnde Wolke so stark mit der Umgebungsluft vermischt hat, dass sie sich auflöst, endet auch der Flug für die aller kleinsten Tröpfchen (<https://www.scinexx.de/news/medizin/niesen-reicht-weiter-als-gedacht/>).

Gezielte Prüfungen in Vorversuchen zu der vorliegenden Studie haben gezeigt, dass Bakterien in personenfrequentierten Aufenthaltsräumen überwiegend mit dem Partikel-Kollektiv im unteren Mikrometerbereich ( $1 - 10\ \mu\text{m}$ ) assoziiert sind, wenn andere relevante Einflussfaktoren auf die partikuläre Luftbelastung (Emissionsquellen für mikrobiologische Inertpartikel) eliminiert sind. Insofern können Bakterienpartikel befugt als aussagekräftige Ersatzparameter bei der Effektivitätsbeurteilung der Lüftungstechnischen Anlagen anerkannt werden.

#### **2.4 Erwartete Ergebnisse des Versuchs**

Die für eine signifikante und im Sinne einer Vermeidung von Unterrichtsausfällen aus Quarantänegründen gewinnbringende Reduzierung des viralen Infektionsdrucks in personenfrequentierten Innenräumen als erforderlich erachteten Leistungskenndaten der Versuchsanlage werden definiert wie folgt:

1. Partikel ab einem aerodynamischen Durchmesser von etwa  $0,3\ \mu\text{m}$  werden im Idealfall auf 1% Restbelastung reduziert
2. Immissionen von außen wie Schimmelpilze und pigmentierte Hefen werden im Idealfall ebenfalls auf 1% Restbelastung reduziert
3. Bakterien, die anthropogenen Emissionen zugeordnet werden können und deren Pool in personenfrequentierten Innenräumen ständig nachgefüllt wird, werden im Idealfall auf 1% bis 10% Restbelastung reduziert

### 3 Durchführung der Untersuchungen

#### 3.1 Luftkeimmessungen mit dem Impaktor MBASS30

Die Konzentrationen an Mikroorganismen in der Luft wurden mit dem Impaktions-Luftkeimsammelgerät MBASS30 (Fa. Holbach) gemessen. Die Sammelluft wird bei diesem Gerät durch einen Lochdeckel mit 500 Bohrungen (Düsen) angesaugt. Direkt unter dem Lochdeckel in das Messgerät eingespannte Kulturmedien (Agar) werden mit den beim Ansaugen stark beschleunigten Mikroorganismen-Partikeln direkt beaufschlagt. Vitale Mikroorganismen wachsen nach Bebrütung der Kulturmedien im Labor zu Kolonien aus, die genauer bestimmt und gezählt werden. Die Luftmessungen wurden bei einem Volumenstrom von 100 l/min durchgeführt. Die Probenahmedauer wurde zwischen 20 Sekunden und einer Minute variiert.

Die großen Vorteile des MBASS30 liegen in der relativ hohen Messgenauigkeit im unteren Konzentrationsbereich ( $10^2$  bis  $10^4$  KBE/m<sup>3</sup>) und in der Möglichkeit zur Durchführung kurz getakteter Einzelmessungen zur Feststellung von Konzentrationsspitzen<sup>1</sup>. Die Wiederfindungsraten von Bakterien in der Luft sind bei der Impaktionsmessung - verglichen z.B. mit dem Filtrationsverfahren - relativ hoch, da Austrocknungseffekte weitestgehend entfallen. Die Höhe einer mikrobiellen Luftbelastung bei kurz andauernden Ereignissen kann mit dem MBASS30 wesentlich gezielter ermittelt werden als bei der zeitintegrierend messenden Filtration.

Die Ansauggeschwindigkeiten direkt an der Sammelöffnung des MBASS30 betragen bei Verwendung des 100-Liter- und des 50-Liter Sammelkopfs 3,4 m/s und 1,0 m/s. Das bedeutet, dass die Staubpartikelsammlung aus der Umgebungsluft bei diesen Windgeschwindigkeiten isokinetisch erfolgt. Da an der Arbeitsplatzprobenahmestelle unter dem Zuluftelement hinter dem Luftschleier Luftströmungsgeschwindigkeiten deutlich unter 1,0 m/s gegeben sind, dürfte eine zumindest einigermaßen quantitative Erfassung der mit der quer strömenden Luft an die Probenahmestelle anströmenden Partikel mit dem zum Einsatz gebrachten Messequipment (100-Liter-Sammelkopf) sichergestellt gewesen und die Partikelzahl im angesaugten Gas nicht wesentlich verfälscht worden sein.

Die Wahrscheinlichkeit, dass durch eine Sammelöffnung mehrere Schimmelpilzsporen und Bakterien angesaugt werden und diese an einer Stelle auf dem Nährmedium darunter abgeschieden werden und die tatsächliche Keimzahl durch Auswachsen nur einer einzelnen Kolonie unterschätzt wird, erhöht sich mit der Konzentration der in der Luft vorhandenen Mikroorganismen. Der Zählwert der auf den Agar-Platten

---

<sup>1</sup> wenn auf einem mit dem Impaktor beaufschlagten Kulturmedium keine Mikroorganismenkolonien angezüchtet werden, ist als Messwert fachlich richtig nicht die Konzentration „0 Koloniebildende Einheit/m<sup>3</sup>“ sondern die Angabe der mit einem „kleiner“ versehenen „Bestimmungsgrenze“, die sich aus dem kleinsten möglichen Koloniezahlwert 1 und dem jeweils gesammelten Luftvolumen ergibt (d.h. 0 Kolonien = < 10 KBE/m<sup>3</sup> bei 100 l Luftsammlervolumen). Zur Berechnung eines Messergebnisses (Mittelwert oder Median einer Messdatenreihe) wird bei Messung von 0 KBE auf einem Kulturmedium ggf. der „Messwert“ 0 KBE/m<sup>3</sup> und zur Ermittlung einer Partikelreduktionsrate in % die untere Bestimmungsgrenze bei dem gewählten Probenahmenvolumen benutzt.



gewachsenen Kolonien kann mit der "positive hole conversion table" korrigiert werden. Von einer statistischen Korrektur der Koloniezählwerte wurde aufgrund der objektiv guten Auszählbarkeit der Kulturmedien in dieser Angelegenheit abgesehen.

Die luftgetragenen Partikel wurden auf folgende Kulturmedien beaufschlagt:

### 3.2 Kultivierung der Mikroorganismen

Nährmedium	Parameter	Bebrütung
Malzextrakt-Agar*	Gesamtkeimzahl: Bakterien, Schimmelpilze und Hefen	25°C
DG18-Agar*	xerophile Schimmelpilze	25°C
TSA-Agar (mit Enthemmer)	Gesamtbakterien	32°C

\* Hersteller: Thermo Fisher Diagnostics, Hennigsdorf

Die Bebrütung der Schimmelpilzkulturmedien und der Kulturmedien für Gesamtkeime erfolgte bei 25°C für bis zu 7 Tage. Nach dieser Bebrütungszeit konnten auf den bebrüteten Nährmedien keine Zunahmen der Koloniezahlen mehr festgestellt werden. Die Bakterienkulturen wurden bei 32°C für bis zu 4 Tage bebrütet.

### 3.3 Korrelierte Partikelzählung

Parallel zu den Impaktormessungen wurden unter dem Zuluftelement über dem Lehrerpult und seitlich in etwa in halber Höhe des Klassenraumes mittig zwischen den beiden Luftreinigern die 1-Minuten-Intervall-Verläufe der Bakterien-, Schimmelpilz- und Hefepilzbelastungen der Innenraumluft mit dem Messverfahren der „Korrelierten Partikelzählung nach Missel“ aufgenommen (5,7). Bei den hierbei durchzuführenden Staubpartikelmessungen werden aufgrund der vergleichsweise hohen Sensitivität direktanzeigende Partikelzählgeräte (Grimm, Ainring) eingesetzt (Kap. 3.4).

Das Verfahren der „Korrelierten Partikelzählung“ basiert auf dem statistischen Verhältnis zwischen den gleichzeitig mit dem Impaktor gemessenen Konzentrationen luftgetragener Mikroorganismen einerseits und von zeit- und ortsparell gemessenen Staubpartikeln keimrelevanter Größenfraktionen andererseits. Das statistische Verhältnis wird durch lineare Regression bestimmt. Erweist sich in der Datenanalyse, dass eine vergleichbare Partikelverteilung im Partikelkollektiv bei aufeinander folgenden Messungen gegeben ist, werden anhand der Steigungsgleichungen der Regressionsgeraden als Umrechnungsfaktor die Bakterien-, Schimmelpilz- und Hefepilz-Konzentrationen aus den 1-minütig gemessenen Partikelkonzentrationen errechnet. Die erhaltenen Messwerte werden in kontinuierlichen Verläufen über die Zeit grafisch dargestellt.

### 3.4 Optische Staubmessung mit Partikelzählgeräten

#### 3.4.1 Geräteeigenschaften

Für die optischen Staubmessungen wurden direktanzeigende Partikelzählgeräte der Firma Grimm (Ainring) benutzt. Die Grimm-Aerosolspektrometer Modell 1.108 sind kompakte tragbare Messgeräte zur kontinuierlichen Messung von Stäuben in der Luft und von Partikel-Größenverteilungen. Die Messung erfolgt nach dem Streulichtprinzip. Die Geräte erfassen luftgetragene Partikel in 15 Größenkanälen zwischen 0,3 und größer 20 µm Teilchendurchmesser und speichern die Messdaten in 1-minütigen Intervallen ab. Die erhaltenen Staubkonzentrationen können anschließend in Verlaufsform grafisch dargestellt werden (Echtzeitmessung).

Die Messwerte können als Partikelkonzentration in der Einheit Partikel/Liter oder als Massenkonzentration mit der Einheit µg/m<sup>3</sup> erfasst werden. Verschiedene normierte Staubmassenfraktionen werden separat ausgegeben.

#### 3.4.2 Messprinzip

Das Messprinzip der Geräte ist die Streulichtmessung von Einzelpartikeln, wobei ein Halbleiterlaser als Lichtquelle dient. Es werden auch sehr kleine Partikel im Bereich von 0,25 µm bzw. 0,3 µm erfasst. Die Probenluft wird mit Hilfe einer internen, volumenstromgeregelten Pumpe durch die Messzelle und einen Gravimetriefilter gesaugt. Dieser Filter dient als Staubsammler und kann zu einer gravimetrischen Kontrolle der optisch gewonnenen Messergebnisse verwendet werden.

Die Partikelgröße ist proportional zur Intensität des detektierten Streulichtsignals, wobei die Streulichtintensität neben der Partikelgröße auch vom Brechungsindex, der Partikelform und der Orientierung des Partikels im Messvolumen beeinflusst wird. Die Positionierung des Detektors in 90° Richtung minimiert den Einfluss des Brechungsindex der Aerosolpartikel auf die Bestimmung der Partikelgröße. Der gewählte Öffnungswinkel der Detektoroptik kompensiert Mehrdeutigkeiten der Streulichtintensität, was eine eindeutige Zuordnung der Partikelgröße in hinreichend engen Größenklassen ermöglicht. Durch Erfassung der Partikelkonzentration und -größe kann die Größenverteilung der Aerosolpartikel bestimmt werden, die wiederum Grundlage für die Berechnung der Partikelmasse ist.

#### 3.4.3 Grundlegendes zur Kalibration der Staubpartikelzählgeräte

Der Kalibrier-Standard des Herstellers basiert auf einem Vergleich zwischen einem mit Polystyrene Latex (PSL) kalibrierten "Muttergerät" und dem zu kalibrierenden "Kandidaten". Das erste Grimm Muttergerät wurde mit einem Referenzgerät, dem Laser Aerosol Spektrometer Modell LAS-X von PMS, Boulder Colorado, verglichen. Durch dieses Vorgehen sind korrekte Partikelgrößenmessungen in den vorgegebenen Kanälen sichergestellt. Die Kalibrierung der Staubmessgeräte erfolgt unter Verwendung von Dolomitstaub als Standardaerosol. Dolomitstaub ist nicht hygroskopisch, poly-dispers und deckt den kompletten Größenbereich von ca. 0.2 µm bis zu >30 µm ab.

### 3.4.4 Grenzen der Einsetzbarkeit / Luftfeuchtigkeit

Eine hohe relative Luftfeuchtigkeit führt bei optisch arbeitenden Staubmessgeräten normalerweise zu Fehlmessungen, da die Wassermoleküle als Teilchen erkannt werden und die Staubmesswerte verfälschen. Zusätzliche Ungenauigkeiten über den Fehler bei der Partikelzählung resultieren daraus, dass sich Wassermoleküle an Partikel anlagern und diese bei der optischen Streulichtmessung größer erscheinen lassen, als sie tatsächlich sind. Ab ca. 60% relative Luftfeuchte werden die Partikeldurchmesser und damit die Staubmassen in der Luft mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit zunehmend überschätzt.

### 3.5 Messung der klimatischen Umgebungsparameter

Die Messung der klimatischen Umgebungsparameter erfolgte mit direktanzeigenden Feuchtigkeits- und Temperatureinheitsheiten des Typs HygroLog-D mit dem Fühler HygroClip-S der Rotronic AG (Bassersdorf, Schweiz). Die Kohlendioxidbelastung der Luft am Arbeitsplatz wurde mit dem kombinierten Luftklima- und CO<sub>2</sub>-Handmessgerät CP11 der Firma Rotronic aufgezeichnet.

### 3.6 Beschreibung und technische Details der Lüftungsanlage

Der primäre Luftstrom tritt durch seitlich und oben angeordnete Lufteintrittsöffnungen in das Gehäuse ein. Im Eintrittsbereich ist ein Vorfilter (Grobstaubfilter der Filterklasse ISO Coarse nach ISO 16890) angeordnet, der Staub und Fasern, sowie größere Partikel, die sich in der Luft schweben, herausfiltert.

Nach dem Vorfilter ist in Strömungsrichtung ein Heizregister angeordnet, mit dem die angesaugte Luft im vorliegenden Ausführungsbeispiel bei Bedarf erwärmt werden kann. Innerhalb des Gehäuses ist eine Trennwand angeordnet, die eine Trennung zwischen der vorbehandelten Primärluft und der nachbehandelten Sekundärluft bildet. Die Luftströmung wird durch einen Ventilator erzeugt und in den Sekundärraum eingeblasen. Infolge der eingeblasenen Luftströmung in den Sekundärraum wird hier ein gleichmäßiger Überdruck aufgebaut.

Anschließend wird die Luft über einen Schwebstofffilter der Filterklasse H14 gemäß EN 1822 (HEPA-Filter) geführt, der dazu dient, Partikel bis zu 0,1 µm, wie beispielsweise Schimmelpilze, einzelne Viruspartikel oder solitäre Bakterien oder nicht-biologische lungenschädigende Stäube, wie z. Bsp. Asbeststäube und Aerosole aus der Luft auszufiltern. Diese Art von Schwebstofffiltern wird überwiegend in Reinräumen mit höchsten Anforderungen der ISO Klasse 5 und besser verwendet. Der eingesetzte HEPA-Filter arbeitet mit einem Wirkungsgrad gem. EN 1822 @ MPPS von mindestens 99,995 %.

Unter dem Schwebstofffilter befindet sich eine kleinere Druckkammer, deren Abschluss ein Laminarisor bildet. Durch diesen wird eine gleichmäßige, laminare Luftströmung mit einstellbaren Luftgeschwindigkeiten zwischen 0,2 bis 0,4 m/s gewährleistet, die auf den zu schützenden Arbeitsplatz gerichtet ist.

Im Randbereich dieser Luftaustrittsöffnung ist eine Luftdüse angeordnet, durch die am vorderen Teil des Belüftungselementes durch eine höhere Luftaustrittsgeschwindigkeit von ca. 6-7 m/s (ebenfalls einregulierbar) ein Sperrluftschleier gebildet wird, der das seitliche Eindringen von Schadstoffen in den Arbeitsraum verhindert. Die für den Betrieb der Luftdüse erforderliche Luftmenge wird als Sekundärluft mittels eines zweiten Ventilators der oberen Druckkammer entnommen und vor dem Austreten ebenfalls über den Schwebstofffilter geführt. Dadurch wird erreicht, dass auch der Luftschleier mit der gleiche Luftqualität wie der Arbeitsplatz betrieben werden kann und somit keinerlei Verunreinigungen aufweist.

### 3.7 Referenzparameter Raum-Personen-Last (RPL)

Der Mensch stellt in Aufenthaltsräumen eine verhältnismäßig starke Bakterienquelle dar. Bei den vom Menschen emittierten Bakterien handelt es sich hauptsächlich um harmlose, kommensalisch und symbiontisch auf der Haut und auf Schleimhäuten lebende Spezies (z.B. Staphylococcen, Streptokokken, Mikrokokken), die beim Atmen und Sprechen sowie mit Hautpartikeln laufend an die Umgebungsluft abgegeben werden. Die Quelldichte der anthropogenen Bakterienquellen wird als Personen/m<sup>3</sup> Raumluft angegeben. Dieser Wert wird als Raum-Personen-Last (RPL) bezeichnet und im vorliegenden Fall mit den Attributen „stehend / sitzend, wenig sprechend“ versehen und dient bei anstehenden Überprüfungen dieser Art als grundlegender Referenzparameter für die Raumluftbelastungen durch anthropogene Bakterien.

### 3.8 Betriebsbedingungen an den beiden Untersuchungstagen

#### Dienstag 29.09.2020 Hauptgebäude Klassenraum 10

Raummaße:	Länge: 7,46 m, Breite: 5,47 m, Höhe: 3,73 m
Raumvolumen:	152,207 m <sup>3</sup>
Personen im Raum:	25
RPL:	0,16
Messeinstellung 1:	Lüftungsgerät Lehrertisch: 1.576 m <sup>3</sup> /h
	Lüftungsgerät hinten: 1.323 m <sup>3</sup> /h
	Luftwechsel: 19,05-fach

#### Mittwoch 30.09.2020 Nebengebäude Musikkabinett

Raummaße:	Länge: 8,30 m, Breite: 5,90 m, Höhe: 3,62 m
Raumvolumen:	177,271 m <sup>3</sup>
Personen im Raum:	21
RPL:	0,12 Person/m <sup>3</sup>
Messeinstellung 1:	Lüftungsgerät Lehrertisch: 2.085 m <sup>3</sup> /h
	Lüftungsgerät hinten: 2.500 m <sup>3</sup> /h
	Luftwechsel: 25,86-fach
Messeinstellung 2:	Lüftungsgerät Lehrertisch: 1.563 m <sup>3</sup> /h
	Lüftungsgerät hinten: 1.919 m <sup>3</sup> /h
	Luftwechsel: 19,64-fach

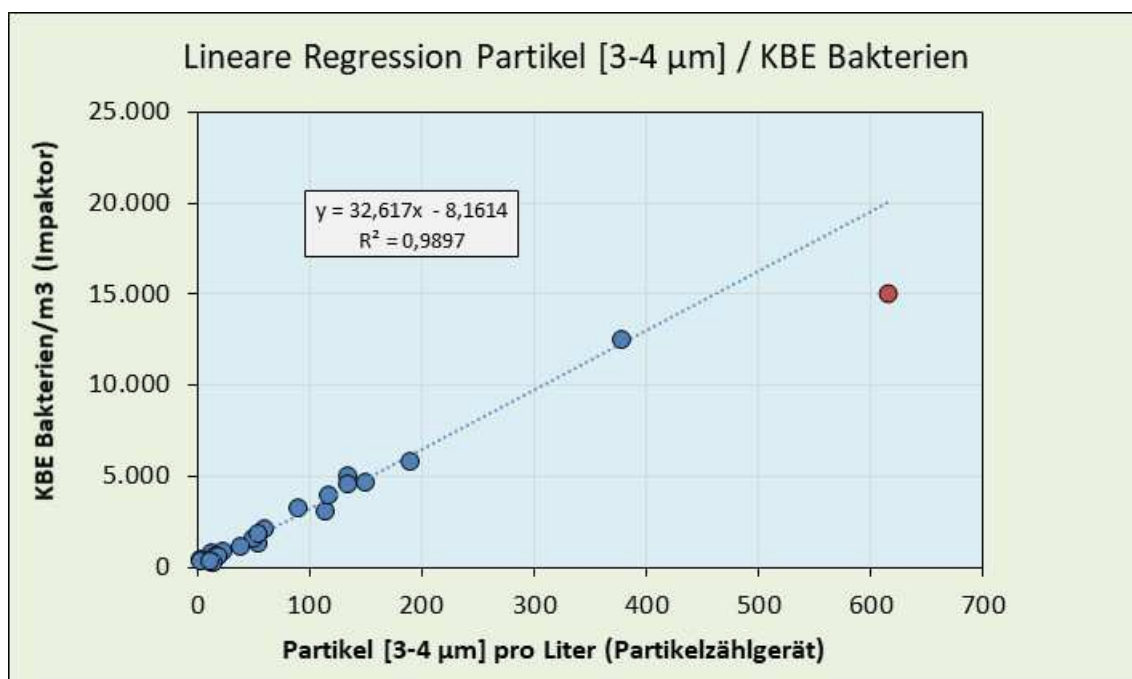
### **3.9 Untersucher**

Die mikrobiologischen und physikalischen Messungen wurden am 29.09. und 30.09.2020 jeweils von ca. 07:30 bis etwa 13:30 Uhr durch den Unterzeichner vorgenommen. Die mikrobiologischen Analysen der Kulturen auf Schimmelpilze, Bakterien und Gesamtkeime wurden im Labor für Arbeits- und Umwelthygiene (Isernhagen / Hannover) durchgeführt.

## 4 Besprechung der Messergebnisse

### 4.1 Ergebnisse der Korrelierten Partikelzählung

In der vorliegenden Studie konnten Korrelationen der Zahl der in der Klassenraumluft enthaltenen Bakterien und der gleichzeitig ermittelten Zahl an Aerosolpartikeln eindeutig belegt werden. Diese Korrelationen betreffen aber nicht die Gesamtpartikelzahl sondern nur ganz bestimmte „Indikator“-Partikelfraktionen im gesamten luftgetragenen Partikelkollektiv zwischen 0,3 und größer 15 µm. Das Verfahren zur Bestimmung der Korrelationen zwischen Mikroorganismen und Partikeln bestimmter Größen in der Luft wird seit Mitte der 90er Jahre vom Labor für Arbeits- und Umwelthygiene im Bereich Abfallwirtschaft als Routineverfahren zur Überprüfung technischer Schutzmaßnahmen eingesetzt und lässt sich offensichtlich auch bei dem gemeinhin als besonders empfindlich und relativ stör anfällig angesehenen Gesamtbakterienparameter erfolgreich anwenden (**Abb. 1**).

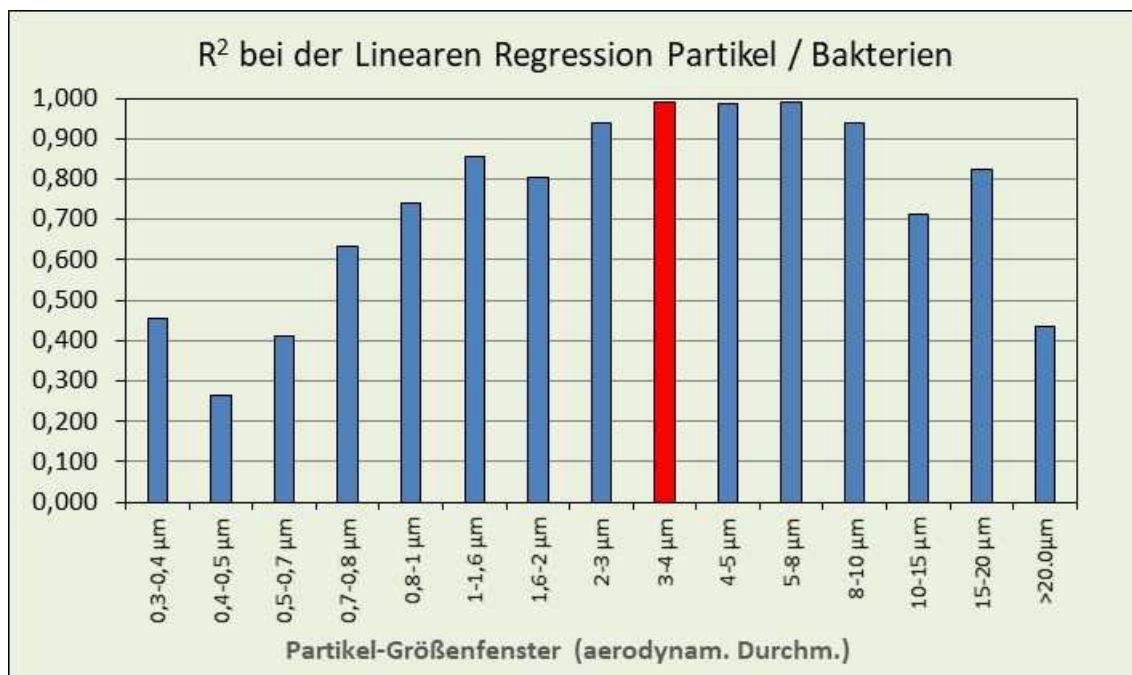


**Abb. 1:** Lineare Regression der mit dem Impaktor gemessenen und im Labor kultivierten Bakterienzahlen und der mit einem Streulichtphotometer exakt zeitgleich aufgenommenen Partikelmesswerte im Partikel-Größenfenster 3-4 µm (n = 24). Knapp 99% der Varianz der mit dem Impaktor gemessenen Bakterienbelastung in KBE werden dieser Korrelationsanalyse zufolge durch die Varianz der Konzentrationen der Partikel 3-4 µm erklärt. Es handelt sich um die Ergebnisse der Messungen vom 1. Versuchstag im Gymnasium Altenburg (29.09.2020). Der orange markierte Ausreißerwert ergibt sich durch die Überbelegung der mit dem Impaktor beaufschlagten Kulturschale mit Bakterienkolonien, aufgrund derer die „wahren“ Bakterienkoloniezahlen nicht mehr ausreichend genau zählbar waren und höchstwahrscheinlich unterschätzt wurden.

Vegetative Bakterienzellen werden beim Übergang in den luftgetragenen Zustand rasch durch Strahlung und Trockenheit abgetötet und sind dann im Labor nicht mehr

anzüchtbar. Von sehr hohen Wiederfindungsraten der Bakterien in der Luft kann aufgrund der bemerkenswert hohen „Partikel-Keim-Korrelationen“ ausgegangen werden. Hohe Wiederfindungsraten werden durch die Art der Bakterienquelle in den Klassenräumen erklärt. Vom Menschen abgegebene Bakterien sind verglichen z.B. mit Enterobacteriaceen wenig empfindlich gegen Austrocknung und Strahlung und können mit dem direktbeaufschlagenden Impaktor anscheinend ohne größere Verluste bzw. mit voll reproduzierbaren Verlustraten gesammelt werden.

Den Ergebnissen der statistischen Datenauswertung der zeit- und ortskombinierten Partikel- und Luftkeimmessungen zufolge sind Bakterien in der Klassenraumluft überwiegend mit dem Partikel-Kollektiv im unteren Mikrometerbereich, genauer im Bereich 1 – 10  $\mu\text{m}$  assoziiert. Dies belegen die Befunde der Korrelationsanalysen in dieser Studie eindeutig (**Abb.2**). Die höchsten Bestimmtheitsmaße bei der Linearen Regression wurden mit Partikeln in dieser Größenfraktion ermittelt.



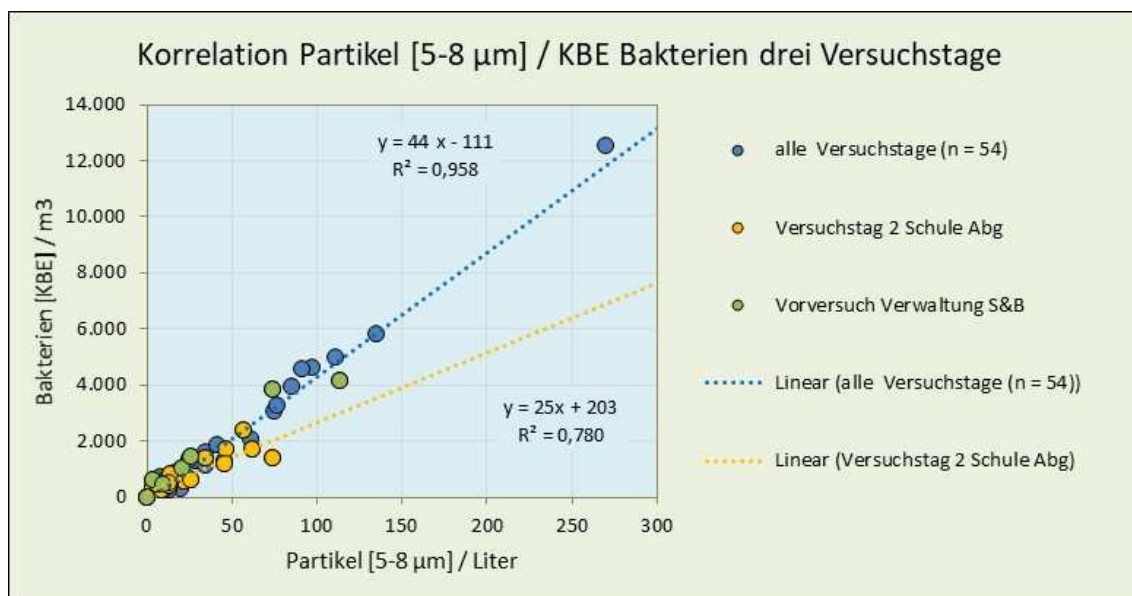
**Abb. 2:** Bei der Linearen Regression der mit dem Impaktor gemessenen Bakterienzahlen (KBE) und der Partikel-Messwerte in 15 Partikel-Größenfraktionen erhaltene Bestimmtheitsmaße. Die eindeutigsten Korrelationen wurden mit Partikeln im Größenbereich 1-10  $\mu\text{m}$  gemessen

Den Angaben in der Literatur zufolge sind auch wesentliche Teile des infektiösen luftgetragenen Viruspartikelkollektivs in Aufenthaltsräumen in diesem Partikel-Größenfenster enthalten. Vom Menschen beim Atmen, Husten oder Niesen ausgestoßene Viren liegen nicht als ultrafeine Nanopartikel in der Luft vor sondern sind größtenteils in Tröpfchen ( $> 5 \mu\text{m}$ ) und Aerosolen im Mikrometerbereich enthalten. Verdunstet die Feuchtigkeit der Feuchtigkeitströpfchen und Aerosolpartikel bleiben die so genannten „Tröpfchenkerne“ zurück, in denen sich alles Feste mitsamt den Viren vereint. Sobald Corona-Viren ihre Feuchtigkeitshülle verloren haben, was in der relativ

trockenen Innenraumluft einigermaßen schnell der Fall sein wird, sinkt ihre Infektiosität rasch ab. Es kann befugt davon ausgegangen werden, dass Viruspartikel in „Tröpfchenkernen“, die ihre Feuchtigkeitshülle verloren haben und aufgrund ihrer dadurch viel geringeren Größe theoretisch die engmaschigen H14-HEPA-Filter durchdringen könnten, auch ihre Infektiosität voll eingebüßt haben.

Insofern können Bakterienpartikel im Größenfenster 1-10 µm befugt als aussagekräftige Ersatzparameter bei der qualifizierten Effektivitätsbeurteilung der Lüftungstechnischen Anlagen im Hinblick auf die Reduzierung des Infektionsdrucks, der durch ständige Ausstöße von Coronaviren durch infizierte Personen auf nicht infizierten Personen lastet, anerkannt werden. Bakterien in der Luft sind wesentlich zuverlässiger und mit höherer Sensitivität und vor allem deutlich schneller in Luft zu erfassen und nachzuweisen als Viren.

Die statistische Beziehung zwischen den gemessenen Bakterienkonzentrationen und den Konzentrationen an Partikeln in bestimmten Partikel-Größenfenstern in der Klassenraumluft – ermittelt durch Korrelationsanalysen und mathematisch ausgedrückt als Steigung der Regressionsgeraden – war nicht nur über den gesamten 1. Prüftag im Gymnasium Altenburg hinweg beständig. Sie ließ sich auch ziemlich genau auf den folgenden Prüftag übertragen und scheint demnach reproduzierbar zu sein. Das an zwei Messtagen im Schulunterricht gemessene statistische Verhältnis (Steigung der Regressionsgeraden) stimmt auch mit den Ergebnissen eines entsprechenden Vorversuch in einem stark personenfrequentierten Konferenzraum im Hause der Schulz & Berger GmbH überein (**Abb.3**).



**Abb. 3:** Lineare Regression der an drei Versuchstagen (2 x Gymnasium ABG, 1 x Verwaltung Fa. S&B) mit dem Impaktor gemessenen **Bakterienzahlen** und der Partikel-Messwerte in der Partikel-Größenfraktion 5-8 µm. Die blaue Regressionsgerade ergibt sich bei Zusammenstellung aller Einzelmesswerte von insgesamt drei Messtagen in Innenräumen im September 2020 (n = 54). Die flachere orangefarbene Regressionsgerade wurde anhand der Messdatenkorrelation vom 2. Messtag im Gymnasium Altenburg (29.09.2020) ermittelt.



Diese Beständigkeit der statistischen Beziehungen zwischen KBE-Zahlen und Partikel bestimmter Größe birgt ernstzunehmendes Potenzial, aufwändige, zeitfordernde und teure kulturelle Nachweisverfahren bei Reihemessungen zur Luftqualitätssicherung bei Schutzmaßnahmenüberprüfungen in Aufenthaltsräumen entbehrlich zu machen.

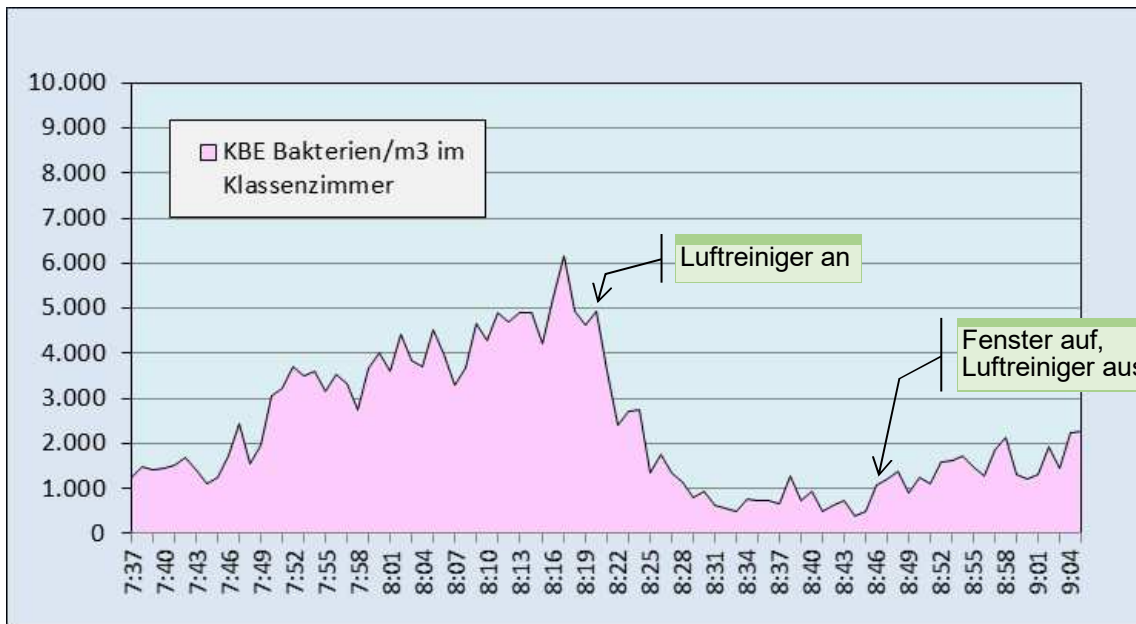
Die Steigung der Regressionsgerade am 2. Messtag in der Schule fällt etwas flacher aus als am 1. Versuchstag. Dies kann mit den wesentlich höheren partikulären Hintergrundbelastungen durch Immissionen atmosphärischer Partikel von außen am 2. Messtag erklärt werden (etwa 15.000 bis 20.000 Gesamtpartikel / Liter außen am 1. Tag ↔ etwa 80.000 bis 90.000 Gesamtpartikel / Liter außen am 2. Tag).

Der Mensch stellt in Aufenthaltsräumen eine verhältnismäßig starke Bakterienquelle dar. Bakterien werden beim Atmen und Sprechen sowie mit Hautschuppen laufend an die Umgebungsluft abgegeben. Die als Raum-Personen-Last (RPL) bezeichnete Quelldichte der vorhandenen Bakterienquellen (anwesende Menschen) betrug bei den in Abb. 3 zusammengefassten drei Messtagen:

Datum	Messort	Personen	Raum	RPL
16.09.2020	Fa. Schulz & Berger, ABG	9	95 m <sup>3</sup>	<b>0,10</b>
29.09.2020	Gymnasium ABG	25	152 m <sup>3</sup>	<b>0,16</b>
30.09.2020	Gymnasium ABG	21	177 m <sup>3</sup>	<b>0,12</b>

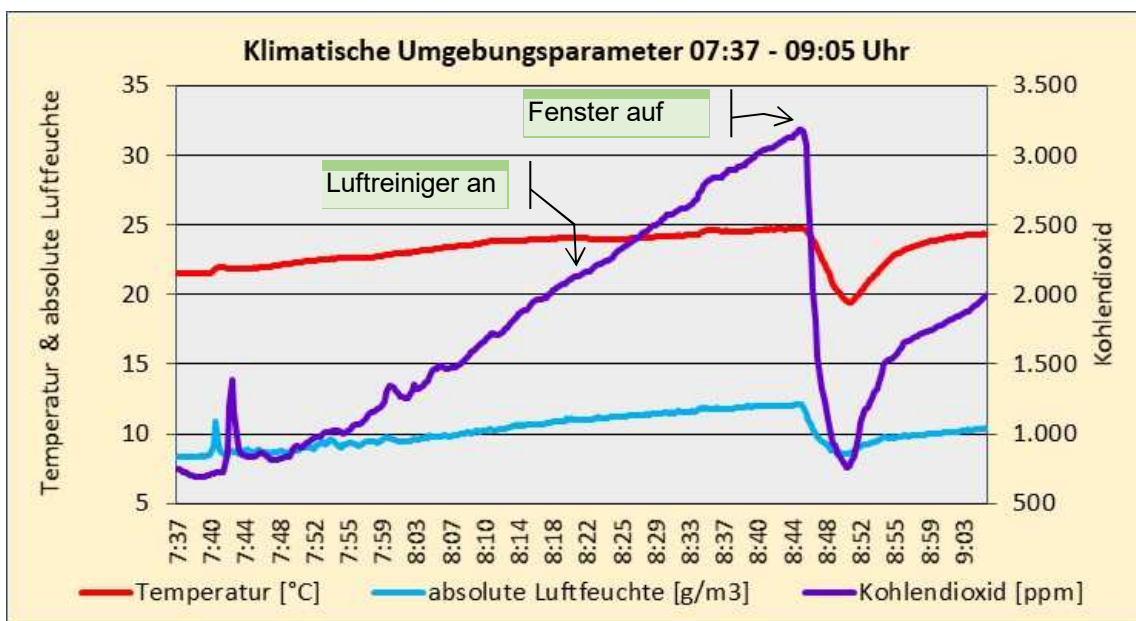
In Sachen Quelldichte waren somit vergleichbare Bedingungen bei den zusammengefassten Untersuchungen in Aufenthaltsräumen gegeben.

Bei der Korrelierten Partikelzählung des Labors Dr. Missel werden anhand der Steigungsgleichung der Regressionsgeraden als Umrechnungsfaktor die Bakterienkonzentrationen aus den 1-minütig gemessenen Partikelkonzentrationen errechnet. Die erhaltenen Messwerte werden in Echtzeit-Verlaufskurven über die Zeit grafisch dargestellt (**Abb.4** auf der folgenden Seite).



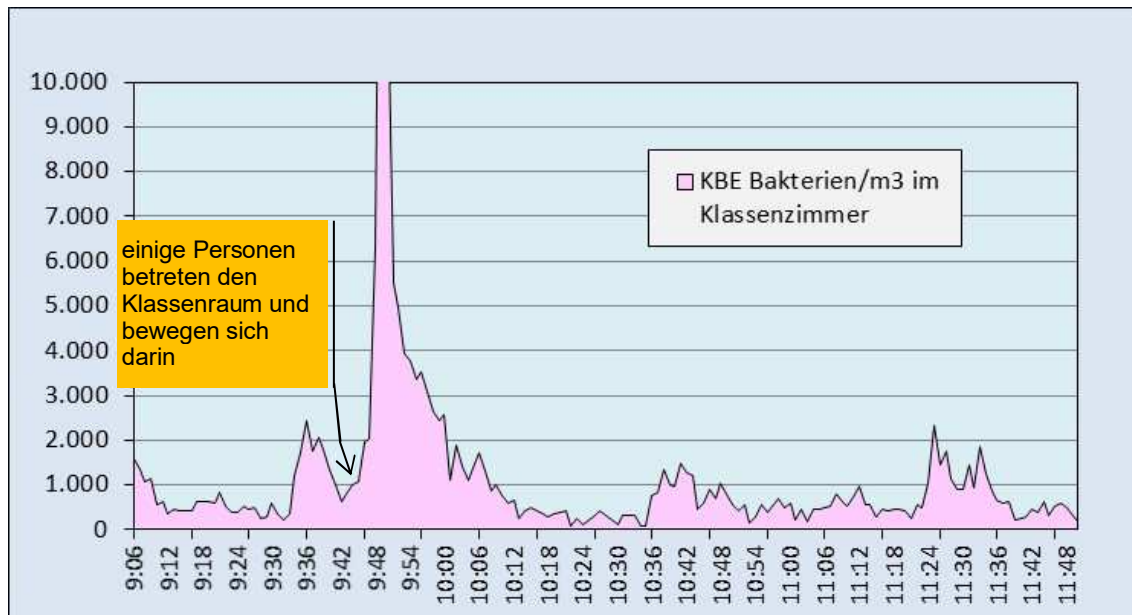
**Abb. 4:** Anhand der Steigungsgeraden bei der Lineare Regression aus den Zahlen der Partikel-Größenfraktionen 3-4 µm errechnete Bakterien-Verlaufskurve in der Klassenraumlufte. Hauptsächlich werden Bakterien von den anwesenden Menschen freigesetzt. Lüften über voll geöffnete Fenster führt zu Immissionen vor allem feiner atmosphärischer Stäube, hat aber nur einen geringen Anstieg der Bakterienbelastungen zur Folge.

In der **Abbildung 5** sind die klimatischen Raumluftparameter relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur sowie Kohlendioxid im selben Zeitintervall wie in Abb. 4 zusammengefasst. Es zeigt sich deutlich, dass Kohlendioxidmessungen zur Abschätzung der mikrobiellen Belastungen zumindest im Zusammenhang mit Effektivitätsüberprüfungen von Luftreinigern ohne Aussagekraft sind.



**Abb. 5:** Klimatische Raumluftparameter im Klassenraum im selben Zeitraum wie in Abb. 4

In der vorliegenden Studie ließen sich anthropogene Emissionen von Bakterien in die Innenraumluft anhand der Korrelierten Partikelzählung direkt aufzeigen (**Abb.6**).

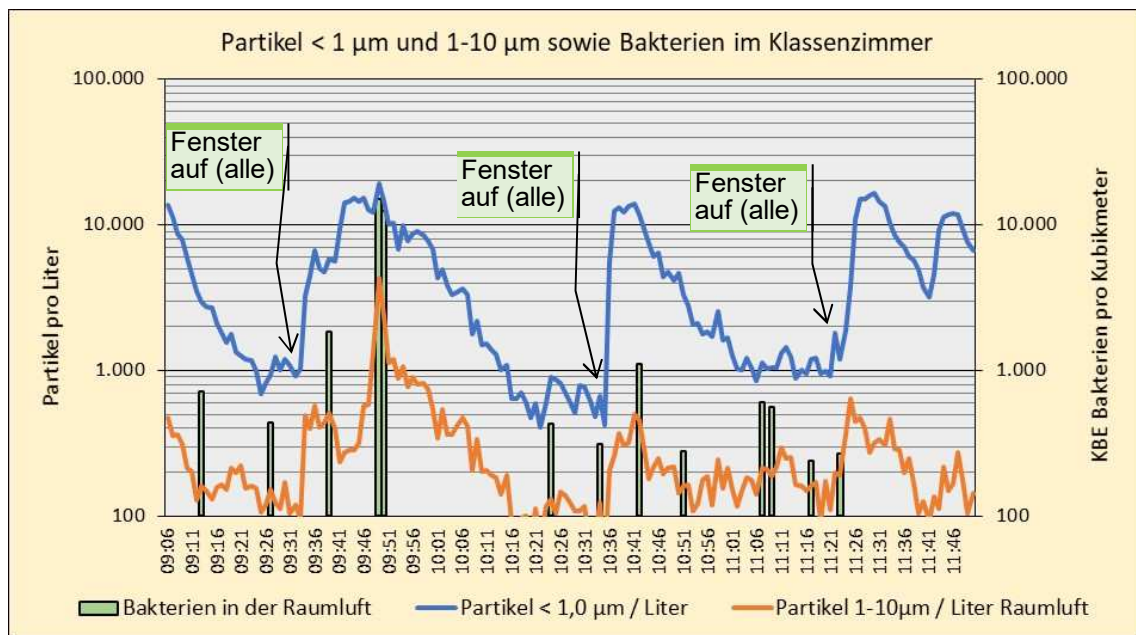


**Abb. 6:** Anhand der Steigungsgeraden bei der Lineare Regression aus den Zahlen der Partikel-Größenfraktionen 3-4  $\mu$ m errechnete Bakterien-Verlaufskurve in der Klassenraumluft. Die beiden Luftreiniger der Schulz & Berger GmbH waren im gezeigten Zeitfenster ständig in Betrieb (Luftwechsel: 19-fach). Um 09:45 Uhr betreten mehrere Mitarbeiter von Presse und TV den Klassenraum und bewegten sich darin herum.

Feinstäube in der Klassenraumluft kleiner 1  $\mu$ m Partikeldurchmesser stammen im Wesentlichen aus der Atmosphäre und damit von außen. Sie gelangen beim Lüften über die geöffneten Fenster in die Klassenräume (**Abb.7**, folgende Seite).

Bei den Partikelmessungen mit den Partikelzählgeräten sind Bakterienfreisetzungen durch anwesende Personen im Raum belegt, wenn spontane Konzentrationsanstiege im Bakterienpartikel-relevanten Partikel-Größenfenster 1-10  $\mu$ m im Zeitverlauf nicht mit entsprechend starken Anstiegen der Feinstaubpartikel-Konzentrationen im Größenfenster 0,3 bis 1,0  $\mu$ m zusammenfallen

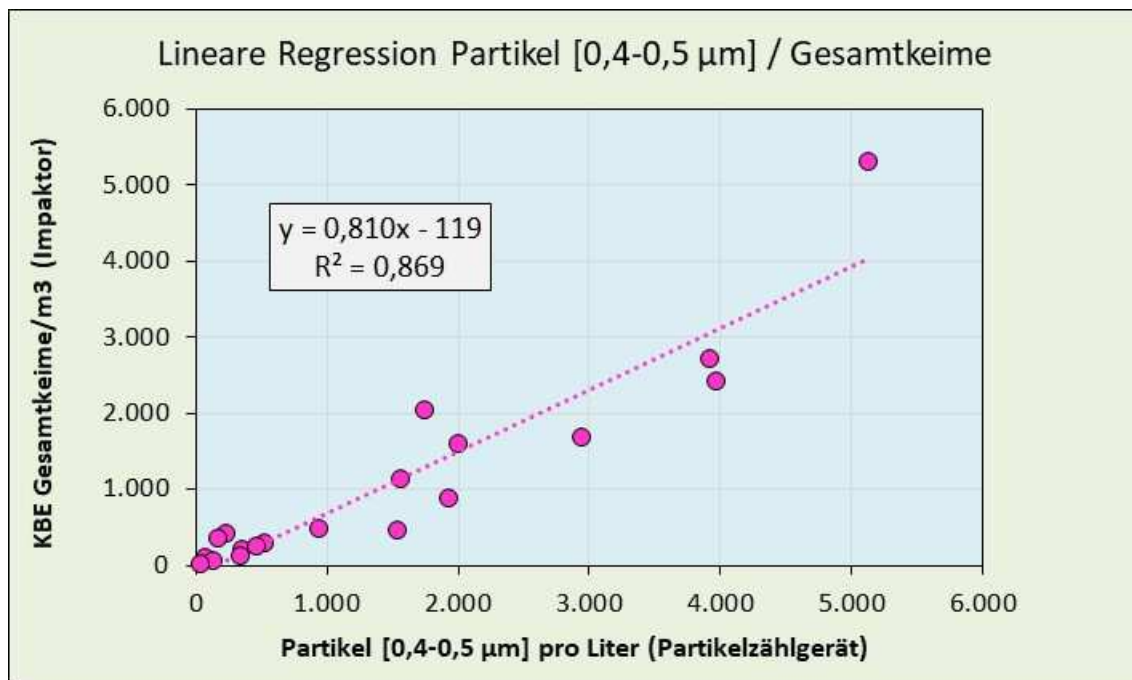
Ein zeitgleicher Anstieg der Partikelzahlen in allen Feinstaub-Größenklassen indes dürfte Luftverwirbelungen (Totraumluft  $\leftrightarrow$  gereinigte Luft) im Klassenraum zuzuordnen sein. Starke Anstiege der Gesamtbelastungsniveaus korrespondieren mit Lüftungsvorgängen (Immissionen atmosphärischer Partikel).



**Abb. 7:** Verlaufskurve der Partikelbelastungen im Klassenraum am ersten Versuchstag (29.9.). Das Zeitfenster entspricht dem in Abb. 6 auf der vorangegangenen Seite. Als grüne Säulen dargestellt sind die mit dem Impaktor real gemessenen Bakterienkonzentrationen dargestellt. Peaks der Bakterienbelastungen finden sich entsprechend ausgeprägt vorzugsweise bei den Partikeln im Partikel-Größenfenster 1-10 µm und nicht bei den Feinpartikeln < 1 µm wieder.

Wichtiger allgemeiner umwelthygienischer Parameter ist die Summe aller Keime in der Luft. Dies sind alle Schimmelpilze, andere kultivierbare Pilze, Hefen und Bakterien. Dieser Summenparameter wurde in der vorliegenden Studie ebenfalls bestimmt (so genannte „Gesamtkeimzahl“). Wesentliche Teile der auf dem verwendeten Kulturmedien anzüchtbaren Mikroorganismen („Gesamtkeime“) wurden von Pilzen, Schimmelpilzen und pigmentierten Hefen gestellt.

Auch bei dem Summenparameter „Gesamtkeime“ konnten aussagekräftige Korrelationen zu Partikelmesswerten bestimmter Partikelfraktionen nachgewiesen werden (**Abb.8**). Diese Mikroorganismen sind überwiegend Immissionen atmosphärischer Partikel zuzuordnen. Diese Partikel gelangen beim Lüften in die Innenräume. Die luftgetragenen atmosphärischen Mikroorganismen sind – anders als die vom Menschen abgegebenen Bakterien – mit der Zahl feiner Partikel kleiner 1 µm in der Luft statistisch am deutlichsten assoziiert.

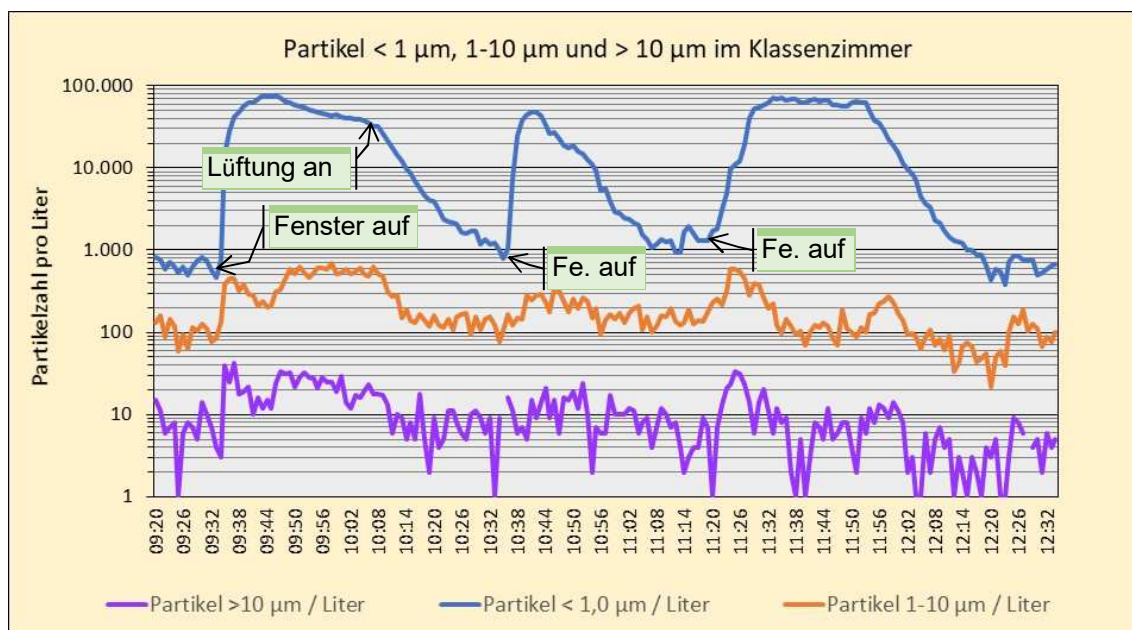


**Abb. 8:** Lineare Regression der mit dem Impaktor gemessenen und im Labor kultivierten **Gesamtkeimzahlen** und der mit einem Streulichtphotometer exakt zeitgleich aufgenommenen Partikelmesswerte im Partikel-Größenfenster 0,4-0,5 µm (n = 18). Zusammengefasst sind die Ergebnisse der Messungen von beiden Versuchstagen im Gymnasium Altenburg (28. + 29.09.).

Die hohen Korrelationen der Messparameter Bakterien und Partikel ( $R^2$  bis 0,990, Scheinkorrelationen sind nicht gegeben) belegen den Erfolg des großen Qualitätssicherungsaufwandes des Labors für Arbeits- und Umwelthygiene beim physikalischen und mikrobiologischen Sampling und bei der mikrobiologischen Probenauswertung im Labor sowie bei der Sicherstellung einer angemessenen Qualität des eingesetzten Messequipments.

#### 4.2 Zu den Leistungskennwerten der Luftreiniger im Einzelnen

Beim Querlüften der Klassenräume während des laufenden Betriebs der Luftreiniger waren binnen Minutenfrist Konzentrationsanstiege der Feinpartikel mit Durchmessern kleiner  $1\ \mu\text{m}$  um Faktoren von 10 bis 100 zu verzeichnen. Die Konzentrationen der Feinpartikel kleiner  $1\ \mu\text{m}$  werden durch die Luftreiniger der Schulz & Berger GmbH nach derartigen Immissionsereignissen bei 19-fachem Luftwechsel  $\text{h}^{-1}$  binnen etwa 30 Minuten auf durchschnittlich etwa 3% der Ausgangswerte reduziert. Die Halbwertszeit bei Partikeln  $< 1\ \mu\text{m}$  (Zeit für die Abnahmen auf 50% einer Ausgangskonzentration, idealerweise eines Ausgangs-Plateauwerts) betrug bei laufenden Luftreinigern und einer Luftwechselrate von 18-fach/h nur 5 Minuten (**Abb. 9**).

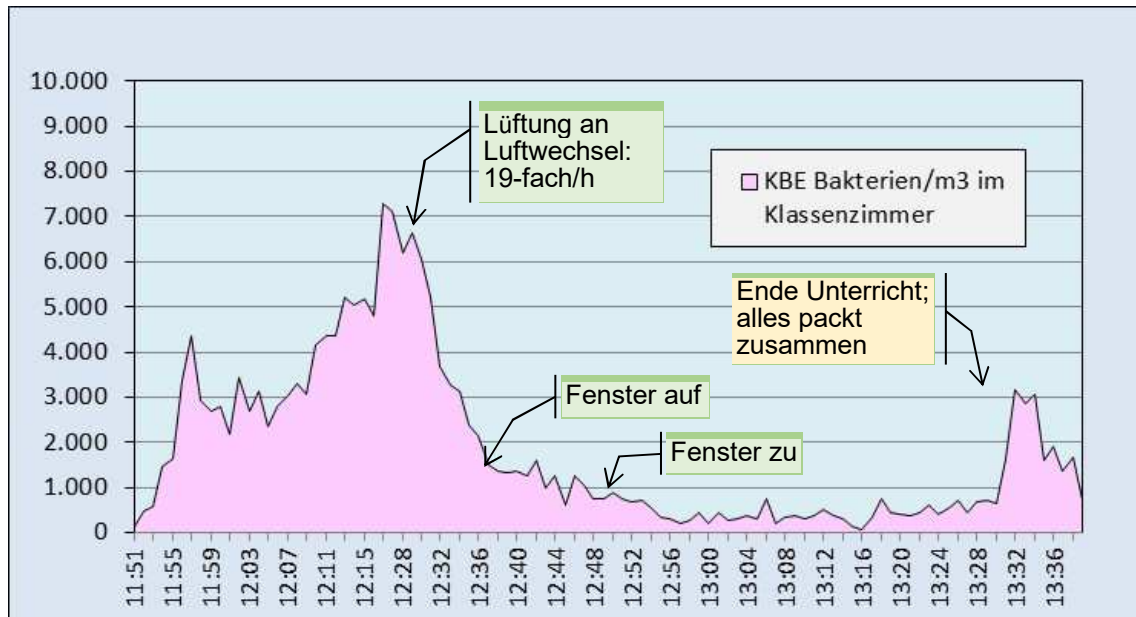


**Abb. 9:** Verlaufskurve der Partikelbelastungen im Klassenraum am zweiten Versuchstag (30.9.). Die Partikelimmissionen von außen beim Querlüften fallen nahezu 10-fach höher aus als am 1. Tag (vgl. Abb. 7). Die Partikelbelastung im Partikel-Größenbereich  $< 1\ \mu\text{m}$  wird bei 19-fachem Luftwechsel / h innerhalb von 30 Minuten auf Werte zwischen 1% und 10% Restbelastung reduziert. Die Reduktionsleistung bei Aerosolpartikeln 1-10  $\mu\text{m}$  fällt geringer als am 1. Tag aus, was allerdings auf die geringe Ausgangslast an Partikeln dieser Größe an diesem Versuchstag zurückgeführt wird.

In den Klassenräumen sind keine relevanten Quellen für Feinpartikel der Größe kleiner  $1\ \mu\text{m}$  vorhanden bzw. aktiv. Aerosolpartikel der Größe 1-10  $\mu\text{m}$  indes werden anscheinend von den anwesenden Personen in messbarer und gesamthygienisch relevanter Zahl freigesetzt. Diese laufenden Partikelemissionen im realpraktizierten Schulunterrichtsbetrieb wirken der ständigen Luftentstaubung durch die Luftreiniger permanent entgegen. Aus diesem Grunde fallen die Reduktionsraten bei den Partikeln 1 bis 10  $\mu\text{m}$  signifikant geringer aus als bei den Partikeln kleiner  $1\ \mu\text{m}$ . Partikel im Größenbereich 1 bis 10  $\mu\text{m}$  wurden bei einem 19-fachen Luftwechsel  $\text{h}^{-1}$  im Durchschnitt auf etwa 10% Restbelastung reduziert.

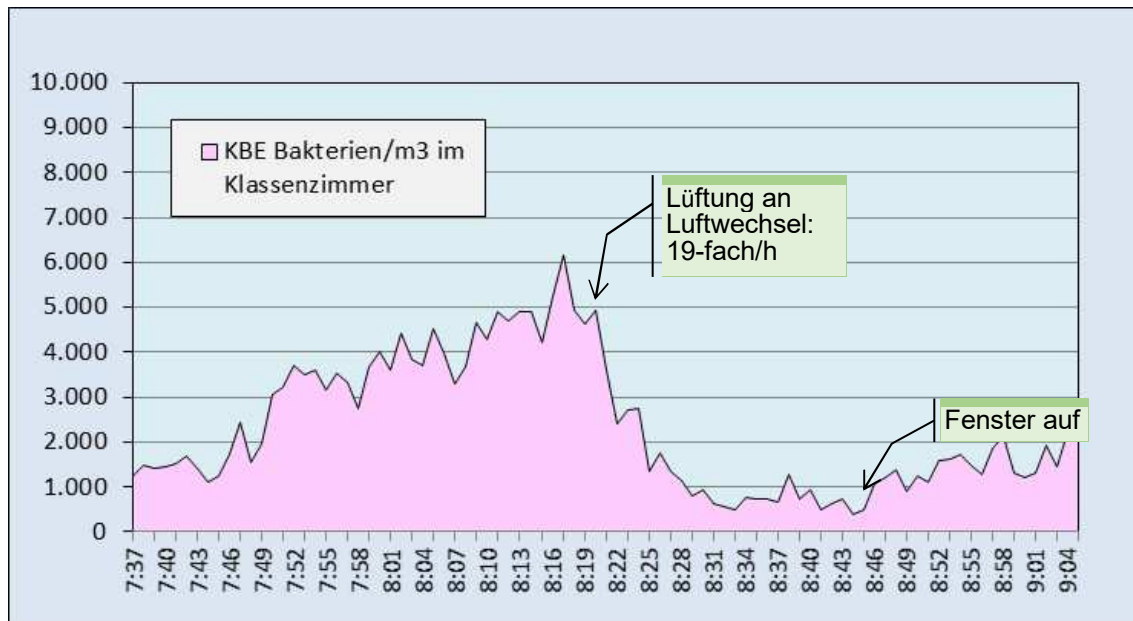


Den laufenden Emissionen bakterienhaltiger Partikel zum Trotz limitieren die Luftreiniger die Bakterien-Konzentration bemerkenswert zuverlässig auf 10% oder weniger der Bakterienbelastung, die ohne technische Luftreinhaltungsmaßnahme messbar wäre. Die Halbwertszeit der Bakterien in der Luft (hier die Zeit für die Abnahme der vor Inbetriebnahme der Luftreinhaltungsmaßnahme gemessenen Ausgangskonzentration auf 50%) betrug nach Inbetriebnahme der beiden Luftreiniger und einer Luftwechselrate von 18-fach/h lediglich 5 Minuten (**Abb. 10**).



**Abb. 10:** Verlaufskurve der Bakterienkonzentrationen im Klassenraum am ersten Versuchstag. Die Halbwertszeit der Bakterien in der Raumluft nach Inbetriebnahme der Luftreiniger ( $6.000 \text{ KBE/m}^3 \rightarrow 3.000 \text{ KBE/m}^3$ ) beträgt etwa 5 Minuten.

Die durch die Luftreiniger induzierten Abklingphasen der Bakterienbelastung im Laufe des Unterrichts an einem Schultag wurde immer wieder durch Emissionsereignisse (Mensch) und Immissionsereignisse (Lüften) in den Unterrichtspausen unterbrochen, so dass die „Endwerte“ der Verminderungsdynamik nur in Einzelfällen ermittelt werden konnten. In einem Unterrichtszeitfenster mit einigermaßen gleichbleibenden Umgebungsbedingungen (Emission / Mensch + Immission / Lüften) konnte bei einem Luftwechsel von 19/h eine Reduzierung der Bakterienbelastungen auf 1/10 der Ausgangswerte innerhalb von etwa 10 Minuten gemessen werden (**Abb. 11**, folgende Seite).



**Abb. 11:** Verlaufskurve der Bakterienkonzentrationen im Klassenraum am ersten Versuchstag. Die Bakterienbelastung in der Raumluft wurde nach Inbetriebnahme der Luftreiniger innerhalb von etwa 10 Minuten auf 1/10 reduziert (5.000 KBE/m<sup>3</sup> → 500 KBE/m<sup>3</sup>)

Bakterienpartikel, die von anwesenden Schülern und anderen Personen in die Klassenraumluft freigesetzt werden, verteilen sich mehr oder weniger gleichmäßig im Raum. Mit anthropogen entstandenen Bakterienpartikeln beladene Luftpakete müssen zunächst an der zentral im Raum aufgestellten Probenahmestelle mit den Luftansaugvorrichtungen vorbei, bevor sie von den deckennahen Ansaugungen der Luftreinigungsgeräte erfasst und in Filtern abgeschieden werden können.

Bei den Versuchsbedingungen dieser Raumluftprüfungen (RPL, vgl. Kap. 2) wird das unvermeidbare bakterielle Hintergrundrauschen auf  $2,0 \times 10^2$  bis  $3,0 \times 10^2$  KBE Bakterien/m<sup>3</sup> beziffert. Dieser Wertebereich wurde aus den drei niedrigsten überhaupt messbaren Werten bei der kulturellen (Bakterien-) Keimzahlbestimmung eines Probenahmetages abgeschätzt (n = 25 am 1. Messtag; n = 21 am 2. Messtag). Folgende Minimumwerte wurden bei den Bakterien mit dem Impaktor an den beiden Versuchstagen gemessen.

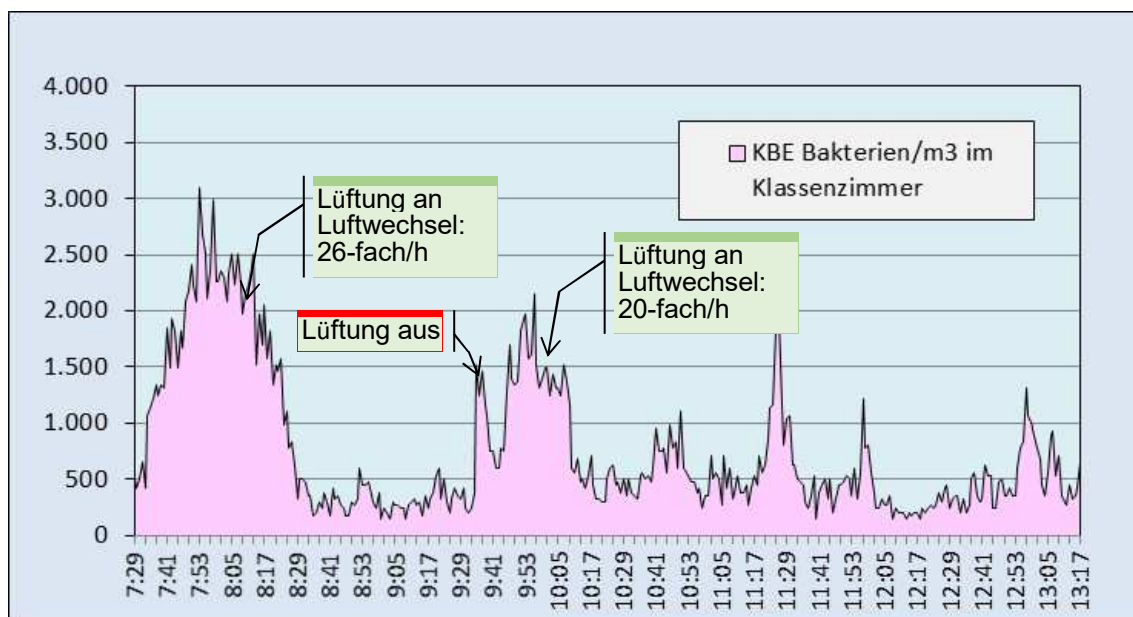
**Tab. 1:** Kleinste messbare Bakterienkonzentrationen an zwei Messtagen

Datum	kleinster Wert	zweitkleinster Wert	drittkleinster Wert
29.09.2020	240 KBE /m <sup>3</sup>	270 KBE /m <sup>3</sup>	280 KBE /m <sup>3</sup>
30.09.2020	220 KBE /m <sup>3</sup>	290 KBE /m <sup>3</sup>	330 KBE /m <sup>3</sup>



Der Versuchsansatz der vorliegenden Expertise wird als realitätsnaher erachtet als Prüfungen, bei denen zur Simulation der Viruspartikelfreisetzung zu Versuchsbeginn feinpartikuläre künstliche Aerosole vernebelt und der Verlauf der Abklingphase nach dem Emissionsereignis aufgezeichnet werden. Infektiöse Viruspartikel werden von infizierten Personen laufend in die Umgebung abgegeben wie Bakterien. Bei Versuchsansätzen wie dem Vorliegenden war deshalb von vorneherein mit geringeren Reinigungseffizienzquoten von Luftreinigern zu rechnen als bei Versuchen mit punktuell zum Zeitpunkt  $t = 0$  einmalig eingebrachten Aerosolwolken.

Anhand dieser grundsätzlichen Überlegungen lässt sich erklären, weshalb die Reduktionsraten am 1. Versuchstag in den Klassenräumen am 2. Tag trotz höherer Luftwechselraten (19-fach  $\leftrightarrow$  26-fach) nicht erreicht wurden. Die Bakterienfreisetzung fiel am 2. Prüftag schlicht deutlich geringer aus als am 1. Tag. Erklärt wird das geringere bakterielle Grundrauschen mit der niedrigeren RPL am 2. Tag und der Gegebenheit, dass sich die Schüler nicht gleichmäßig an den Tischen im Klassenraum verteilt sondern bevorzugt im hinteren Bereich in der Nähe eines der beiden Luftreinigungsgeräte positionierten.



**Abb. 12:** Verlaufskurve der Bakterienkonzentrationen im Klassenraum am zweiten Versuchstag. Die anthropogenen Bakterienbelastungsspitzen in der Raumluft fallen wesentlich geringer aus als am 1. Versuchstag. Die Reduktionsleistung der Luftreinigungsanlage ist aufgrund des gegenüber dem 1. Messtag aber unverminderten Hintergrundrauschens ( $2 \times 10^2$  bis  $3 \times 10^2$  KBE Bakterien/m<sup>3</sup>, vgl. Tab. 1) entsprechend geringer.

Von Bedeutung ist, dass höhere Luftwechselraten am 2. Versuchstag (26-fach  $\leftrightarrow$  20-fach) bei den Gesamtbakterien nicht zu signifikant niedrigeren asymptotischen Punkten, die dem bakteriellen Grundrauschen entsprechen, führten (Abb. 12). Bei einer RPL wie hier (ca. 0,1 Personen/m<sup>3</sup>) und einer Luftwechselrate von 20-fach scheinen die durch die Luftreiniger in Klassenräumen maximal erzielbaren Reduktionsraten bei den Gesamtbakterien bereits im Wesentlichen erreicht zu sein.

Demgegenüber und erwartungsgemäß wurde der Parameter „Gesamtkeime“, bei dem Pilze und pigmentierte Hefen durchweg die maßgebliche Komponente stellten und die deshalb im Wesentlichen Immissionen von außen beim Lüften zugeordnet werden können, durch die Luftreinigungsgeräte auf Werte deutlich unter  $2 \times 10^2$  bis  $3 \times 10^2$  KBE/m<sup>3</sup> reduziert (**Tab. 2**).

Bei den Versuchsbedingungen dieser Raumlufprüfungen (RPL, vgl. Kap. 2) wird das unvermeidbare Hintergrundrauschen beim Parameter Gesamtkeime auf  $10^1$  bis  $10^2$  KBE/m<sup>3</sup> beziffert. Dieser Wertebereich wurde aus den zwei niedrigsten überhaupt messbaren Werten bei der kulturellen Keimzahlbestimmung eines Probenahmetages abgeschätzt (n = 12 am 1. Messtag; n = 13 am 2. Messtag). Folgende Minimumwerte wurden bei den Gesamtkeimen mit dem Impaktor gemessen.

**Tab. 2:** Kleinste messbare Gesamtkeim-Konzentrationen an zwei Messtagen

Datum	kleinster Wert	zweitkleinster Wert	drittkleinster Wert
29.09.2020	10 KBE /m <sup>3</sup>	60 KBE /m <sup>3</sup>	entfällt, n = 12
30.09.2020	90 KBE /m <sup>3</sup>	110 KBE /m <sup>3</sup>	entfällt, n = 13

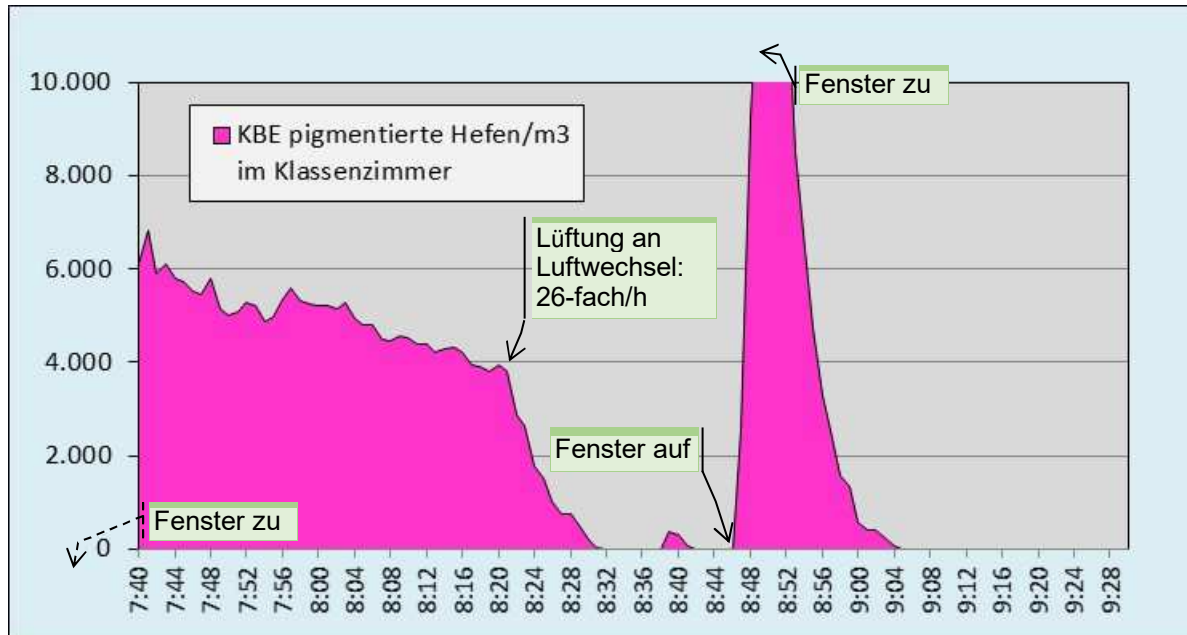
Am zweiten Versuchstag waren beim frühmorgendlichen Lüften vor Unterrichtsbeginn außerordentlich hohe Immissionen an pigmentierten Hefen in den Klassenraum festzustellen. Die Gesamtheit der pigmentierten Hefen in dem Klassenraum stammte von außen, während bei dem Parameter „Gesamtkeime“ (Tab. 2) neben Mikrobiellem von außen (Pilze, Hefen) immer auch noch Bakterien, die von den anwesenden Personen im Raum stammten, erfasst wurden. Pigmentierte Hefen, die in ihrer Gesamtheit Immissionen von außen beim Lüften zugeordnet werden können, wurden durch die Luftreinigungsgeräte quasi auf „Nullbelastung“ ( $< 1 \times 10^1$  KBE/m<sup>3</sup>) reduziert (**Tab. 3**).

Bei den Versuchsbedingungen dieser Raumlufprüfungen (RPL, vgl. Kap. 2) wurden die immittierten pigmentierten Hefen der Außenluft durch die Luftreiniger quasi vollständig eliminiert. Folgende Maximum- und Minimumwerte wurden bei den Gesamtkeimen am 30.09.2020 mit dem Impaktor gemessen.

**Tab. 2:** Kleinste und größte Konzentration rosa pigmentierter Hefen (n = 12)

Datum	kleinster Wert	zweitkleinster Wert	höchster Wert
30.09.2020	< 10 KBE /m <sup>3</sup>	< 10 KBE /m <sup>3</sup>	~ 6.000 KBE /m <sup>3</sup>

Die sehr hohe Luftreinigungseffizienz bei stationären Bedingungen (keine weitere Immission nach 1-maligem Mikroorganismen-Immissionsereignis) wird anhand der Verlaufskurve der Konzentrationen pigmentierter Hefen am zweiten Untersuchungstag deutlich aufgezeigt (**Abb. 13**).



**Abb. 13:** Verlaufskurve der Konzentrationen pigmentierter Hefen im Klassenraum am zweiten Versuchstag. Die Reduktionsleistung der Luftreinigungsanlage ist aufgrund des gegenüber den Bakterien deutlich geringeren Hintergrundsrauschens entsprechend größer.

Die Luftreiniger reduzieren die Belastung der Klassenraumluft mit pigmentierten Hefen von außen reproduzierbar innerhalb von 10 Minuten (08:21 – 08:31 Uhr) quasi auf „Nullbelastung“ (Luftwechsel: 26-fach/h). Die Halbwertszeit der pigmentierten Hefen in der Luft (hier die Zeit für die Abnahme der vor Inbetriebnahme der Luftreinigungsmaßnahme gemessenen Ausgangskonzentration auf 50%) betrug nach Inbetriebnahme der beiden Luftreiniger und einer Luftwechselrate von 26-fach/h lediglich 3 Minuten (**Abb. 13**).

Durch die Luftreiniger wurde der Gehalt pigmentierter Hefen in dem Klassenraum innerhalb von 10 Minuten auf unter 0,25% der Ausgangsbelastung vor Inbetriebnahme der Geräte reduziert.

## 5 Zusammenfassung der Messergebnisse

Die Ergebnisse der Überprüfung der Luftreinigungseffizienz der Luftreinigungsgeräte der Schulz & Berger Luft- und Verfahrenstechnik in Klassenräumen eines Gymnasiums in Altenburg können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Bei der Beurteilung der Leistungsdaten der Luftreiniger in Sachen Reduktion der Luftkeimzahlen war hinsichtlich des Eingabewerts und des Beurteilungsparameters zunächst zu unterscheiden zwischen Mikroorganismen-Emissionen und Mikroorganismen-Immissionen in den Klassenräumen. Mikroorganismen -Emissionen in Klassenräumen sind im Vordergrund Bakterienfreisetzungen vom menschlichen Körper. Hierbei handelt es sich vor allem um Kommensalen, also Bakterien der Hautflora (z.B. diverse Kokken-Typen). Mikroorganismen-Immissionen sind Einträge von außen, zu denen es bei jedem Lüften der Klassenräume kommt. Diese Immissionen fielen zur Zeit der Prüfungen verglichen mit den Emissionen erheblich aus. Bei den Immissionen handelt es sich weit überwiegend um Pilze und pigmentierte Hefen.
2. Bei der Festlegung von „Erwartungswerten“ an die Leistungsdaten der Luftreiniger in Sachen Reduktion der Luftkeimzahlen ist folgendes zu berücksichtigen. Bakterienpartikel, die von Menschen in die Luft eines geschlossenen Raumes abgegeben werden, müssen sich erst im Raum verteilen und gewissermaßen zunächst an der zentral im Raum aufgestellten Probenahmestelle mit den Luftansaugvorrichtungen vorbei, bevor sie von den deckennahen Ansaugungen der Luftreinigungsgeräte erfasst und in Filtern abgeschieden werden können. Bei dem mikrobiologischen Parameter Gesamtbakterien in Aufenthaltsräumen waren „Nullbelastungen“ durch Luftreinigungsgeräte aufgrund der ständig stattfindenden Bakterienemissionen durch den Menschen deshalb generell *unmöglich* erreichbar.
3. Demgegenüber unterliegen die Belastungen der maßgeblich von außen in die Klassenräume eingetragenen Pilze und Hefen nach dem Schließen der Fenster erwartungsgemäß einer grundlegend anderen Abklingkinetik im zeitlichen Verlauf einer Unterrichtsstunde.
4. Bei den Versuchsbedingungen dieser Raumlufprüfungen können in Sachen (unvermeidbares) bakterielles Hintergrundrauschen (Emission durch sitzende und wenig bewegungsaktive Menschen)  $2 \times 10^2$  bis  $3 \times 10^2$  KBE Bakterien/m<sup>3</sup> angegeben werden. Eine weitere, dauerhaft beständige Reduktion der bakteriellen Luftbelastungen durch Luftreiniger dürfte bei einer RPL von etwa 0,10 bis 0,20 selbst bei Steigerung der Luftwechselraten von 19/h auf 26/h nicht möglich sein.

5. Infizierte Personen geben infektiöse Viruspartikel laufend in die Umgebung ab. Bakterien werden von allen Menschen, Infizierten und nicht-Infizierten, ständig und unvermeidbar in die Luft abgegeben. Bei dem Versuchsansatz der vorliegenden Expertise wird der Bakterienpool in der Innenraumluft ständig nachgefüllt, wie das bei der Freisetzung von Viruspartikeln bei Anwesenheit infizierter Personen zu erwarten ist. Dieser Ansatz der Nachweisführung bei der Reinigungseffizienzbeurteilung wird als wesentlich realitätsnaher erachtet als Prüfungen, bei denen zur Simulation einer Viruspartikelfreisetzung einmalig zu Versuchsbeginn feinputikuläre künstliche Aerosole vernebelt und der Verlauf der Abklingphase nach dem Emissionsereignis aufgezeichnet wird.
6. Bei Versuchsansätzen wie dem Vorliegenden war deshalb von vorneherein mit geringeren Reinigungseffizienzquoten von Luftreinigern zu rechnen als bei vorgenannten Versuchen mit einmalig eingebrachten Aerosolwolken bestimmter Qualität.
7. So lässt sich auch erklären, weshalb die am 1. Versuchstag in den Klassenräumen gemessenen Reduktionsraten bei den Bakterien am 2. Tag trotz höherer Luftwechselraten (26-fach/h ↔ 19-fach/h) nicht erreicht wurden. Die Spitzen in der Bakterienfreisetzung fielen am 2. Prüftag schlicht deutlich geringer aus als am 1. Tag, während das unvermeidbare bakterielle „Hintergrundrauschen“ (siehe 4.) an beiden Tagen anscheinend vergleichbar ausfiel (siehe Tab. 1).
8. Erwartungsgemäß wurden die „Gesamtkeime“, die zwar durch Bakterien vom Menschen beeinflusst, aber deutlich überwiegend von Pilzen und pigmentierten Hefen von außen gestellt wurden, durch die Luftreinigungsgeräte auf Werte deutlich unter  $2 \times 10^2$  bis  $3 \times 10^2$  KBE/m<sup>3</sup> reduziert. Bei den Randbedingungen der vorliegenden Expertise wird das unvermeidbare Hintergrundrauschen beim Parameter Gesamtkeime auf  $10^1$  bis  $10^2$  KBE/m<sup>3</sup> beziffert. Die Luftreiniger reduzieren die Gesamtkeimbelastung der Klassenraumluft ausgehend von  $10^3$  KBE/m<sup>3</sup> reproduzierbar innerhalb von 15 Minuten auf  $10^1$  bis  $10^2$  KBE/m<sup>3</sup>. Dies entspricht einer Verminderungsrate von zwei Zehnerpotenzen bzw. einer Reduktion auf 1% der Ausgangswerte. Die Halbwertszeit der Gesamtkeime in der Luft (hier die Zeit für die Abnahme der vor Inbetriebnahme der Luftreinigungsmaßnahme gemessenen Ausgangskonzentration auf 50%) ausgehend von  $10^3$  KBE/m<sup>3</sup> betrug nach Inbetriebnahme der beiden Luftreiniger und einer Luftwechselrate von 26-fach/h lediglich 3 Minuten.
9. Beim frühmorgendlichen Lüften vor Unterrichtsbeginn am 30.09. konnten hohe Immissionen an pigmentierten Hefen von außen in den Klassenraum gemessen werden. Hefen, die in ihrer Gesamtheit Immissionen von außen beim Lüften zugeordnet werden können und für die es keine Quellen im Klassenzimmer gab, wurden durch die Luftreinigungsgeräte innerhalb von 10 Minuten auf Werte unter 0,25% und quasi auf „Nullbelastung“ reduziert. Die Halbwertszeit der

pigmentierten Hefen in der Luft betrug nach Inbetriebnahme der beiden Luftreiniger und einer Luftwechselrate von 26-fach/h ebenfalls nur 3 Minuten.

10. Anhand der Ergebnisse dieser Prüfungen kann prognostiziert werden, dass die Keimreduktionsleistung der Luftreiniger - bis zu einem gewissen Punkt, der noch ermittelt werden muss - umso höher ausfallen wird, je höher die Ausgangsbelastung direkt vor Inbetriebnahme der Luftreinigungsmaßnahme ausfällt. Die Bakterienbelastungen überschritten im Versuchszeitraum Werte von etwa  $6 \times 10^3$  KBE/m<sup>3</sup> allenfalls sporadisch und dann auch nur kurzzeitig. Die maximale Bakterienreduktionsleistung der Luftreiniger der Schulz & Berger GmbH konnten angesichts der (erfahrungsbasiert) nur „mäßig hoch“ ausfallenden Innenraumlufbelastungen nicht ermittelt werden.
11. Der Einfluss der „natürlichen“ Keimreduktion durch Partikelsedimentation und diffusen Luftaustausch nach einem Freisetzungereignis muss immer bestimmt und bei der Einschätzung der Gesamtreduktionsrate berücksichtigt werden.
12. Den laufenden Emissionen bakterienhaltiger Partikel zum Trotz limitieren die Luftreiniger die Bakterien-Konzentration bemerkenswert zuverlässig auf 10% oder weniger der Bakterienbelastung, die ohne technische Luftreinigungsmassnahme messbar wäre. Die Halbwertszeit der Bakterien in der Luft betrug nach Inbetriebnahme der beiden Luftreiniger und einer Luftwechselrate von 19-fach/h lediglich 5 Minuten.
13. Im Reinfluftstrom zentral unter dem Zuluftelement (Atemhöhe sitzender Mensch) war binnen Minutenfrist nach Inbetriebnahme der Luftreinigungsmassnahme quasi „Nullbelastung“ gegeben. Diese „Nullbelastung“ betraf alle aufgezeichneten partikulären / feststofflichen Parameter als da waren:
  - optisch gemessene Gesamtpartikel-Konzentration > 0,3 µm
  - Gesamt-Schimmelpilze auf DG18-Agar
  - Gesamtkeime auf Malz-Agar
  - Gesamt-Bakterien auf TSA-Agar

Die „Nullbelastung“ in Atemhöhe eines sitzenden Menschen war während des Unterrichts stabil. Lediglich beim Lüften der Klassenräume wurden durch die dabei auftretenden Raumluftturbulenzen Feinpartikel von außen in nennenswerter Zahl in den gereinigten Frischluftstrom eingemischt.

14. Eine Ansteckung direkt von Mensch zu Mensch z.B. durch Einatmen von Hustenaerosolen von einem infizierten Mitschüler in der Nähe kann mit den Luftreinigern der Schulz & Berger GmbH zwar nicht verhindert werden. Es ist anhand der Leistungskenndaten, die in dieser Studie ermittelt wurden, aber mit Sicherheit davon auszugehen, dass Luftreiniger der Schulz & Berger GmbH das Infektionsrisiko für die gesamte Klassengemeinschaft in Klassenräumen in erheblichem Maße senken können, da der Infektionsdruck durch laufende Entnahme potenziell infektiöser Aerosolpartikel niedrig gehalten wird.

15. Den Ergebnissen der statistischen Datenauswertung der zeit- und ortskombinierten Partikel- und Luftkeimmessungen zufolge sind Bakterien in der Klassenraumlufte überwiegend mit dem Partikel-Kollektiv im unteren Mikrometerbereich, genauer im Bereich 1 – 10 µm assoziiert. Den Angaben in der Literatur zufolge sind auch wesentliche Teile des infektiösen luftgetragenen Viruspartikelkollektivs in Aufenthaltsräumen in diesem Partikel-Größenfenster zu finden. Insofern können Bakterienpartikel im Größenfenster 1-10 µm befugt als aussagekräftige Ersatzparameter bei der qualifizierten Effektivitätsbeurteilung der Lüftungstechnischen Anlagen im Hinblick auf die Reduzierung des Infektionsdrucks, der durch ständige Ausstöße von Coronaviren durch infizierte Personen auf nicht infizierte Personen lastet, anerkannt werden. Bakterien in der Luft sind wesentlich zuverlässiger und mit höherer Sensitivität und vor allem deutlich schneller und kosteneffizienter in Luft zu erfassen und nachzuweisen als Viren.
16. Die Vorteile liegen auf der Hand, weil Effektivitätsüberprüfungen von Luftreinigern dadurch schnell und kosteneffizient möglich gemacht werden können.
17. Kohlendioxid ist kein geeigneter Parameter zur Überprüfung der mikrobiologischen Innenraumluftequalität zumindest bei gleichzeitigem Betrieb von technischen Luftreinhaltungsmaßnahmen. Korrelationen zwischen Kohlendioxidkonzentrationen und Aerosolpartikel- bzw. Bakterienkonzentrationen waren bei Betrieb der Luftreiniger nicht darstellbar und auch von vorneherein nicht zu erwarten.
18. So genannte *Schutzfaktoren* für Atemschutzmasken geben das von einer bestimmten Atemschutzgeräteklasse erwartete Maß an Schutz gegen schwebfähige Partikel an. Zum Vergleich der Prüfergebnisse der vorliegenden Expertise im Hinblick auf die prozentuale Bakterienreduktion werden die Schutzfaktoren von partikelfiltrierenden Halbmasken gegen schwebfähige Partikel in der Luft, wie z.B. Schimmelpilze, aufgerufen wie folgt:

<b>Typ Maske</b>	<b>Schutzfaktor</b>	<b>Reduktion</b>
FFP1	4	100% → 25%
FFP2	10	100% → 10%
FFP3	30	100% → 3%

Quelle: Beschluss 45/2011 des Ausschusses für Biologische Arbeitsstoffe (ABAS) vom 05.12.2011: Stellungnahme „Kriterien zur Auswahl der PSA bei Gefährdungen durch biologische Arbeitsstoffe“

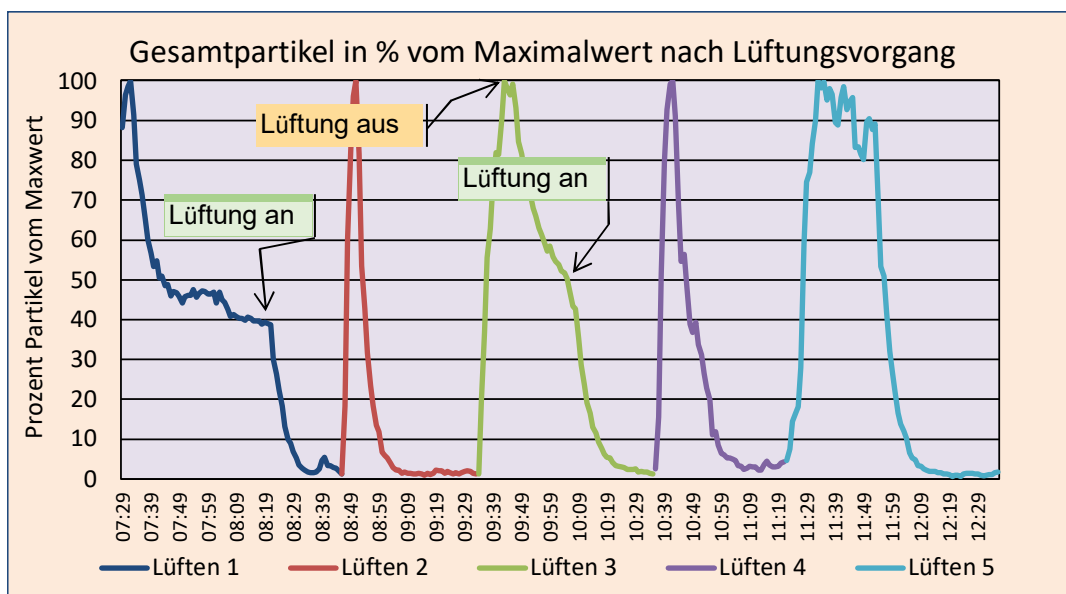
Den Prüfergebnissen zufolge haben die Luftreiniger der Schulz & Berger GmbH bei ständigem Betrieb gegen anthropogene Bakterien in der Klassenraumluft einen Schutzfaktor mindestens analog partikelfiltrierenden FFP2-Atmenschutzmasken gegen schwebpartikuläre Gefahrstoffe anzubieten. Gegen die hier gemessenen Gesamtpartikel - und damit mit großer Wahrscheinlichkeit auch gegen infektiöse Coronaviren - können Schutzfaktoren *mindestens* zwischen FFP2- und FFP3- Atmenschutzmasken erwartet werden.



## 6 Kurzzusammenfassung

Zur Quantifizierung der allgemeinen Innenraumluftentkeimung durch Zuluftelemente der Schulz & Berger Luft- und Verfahrenstechnik GmbH wurden im Wesentlichen mit Ubiquitärem von außen mikrobiell grundbelastete, ab einem bestimmten Zeitpunkt personenfrequentierte und vermehrt mit Bakterien vom menschlichen Körper belastete Klassenräume einer Luftreinigung unterzogen. Die Kinetik der Raumluftentkeimung und Raumluftentstaubung ab Inbetriebnahme der Luftreinigungsmaßnahme wurde anhand kontinuierlicher Staupartikelmessungen und wiederholter Kurzzeit-Impaktions-Luftkeimmessungen aufgezeichnet bzw. nachverfolgt. Die wichtigsten Ergebnisse der Messungen im Gymnasium Altenburg sind wie folgt:

- Beim Querlüften der Klassenräume während des laufenden Betriebs der Luftreinerer waren binnen Minutenfrist starke Anstiege der Partikelkonzentrationen, vor allem dabei der Feinpartikel mit Durchmessern kleiner  $1 \mu\text{m}$  zu verzeichnen. Die Konzentrationen der Gesamtpartikel ( $> 0,3 \mu\text{m}$ ) werden durch die Luftreinerer der Schulz & Berger GmbH nach derartigen Immissionsereignissen unabhängig vom momentanen Luftwechsel ( $20\text{-fach} \leftrightarrow 26\text{-fach h}^{-1}$ ) binnen etwa 30 Minuten wieder auf etwa **1% bis 3%** reduziert. Die Halbwertszeit bei Partikeln  $< 1 \mu\text{m}$  betrug bei laufenden Luftreinerern und vorgeannten Luftwechselraten lediglich etwa **5 Minuten**.



**Abb. 14:** Verlaufskurve der Gesamtpartikelbelastung im Klassenraum am zweiten Versuchstag. Bei den Lüftungsvorgängen 1-4 wurde der Klassenraum für jeweils etwa 5 Minuten gelüftet. Beim 5. Lüftungsvorgang wurden alle Fenster über 20 Minuten lang offen gehalten. Die Luftreinigungsgeräte waren dabei laufend in Betrieb. Die Luftwechselrate lag in der Zeit bis 09:45 Uhr bei  $26\text{-fach h}^{-1}$  und wurde anschließend auf etwas unter  $20\text{-fach h}^{-1}$  herunterreguliert.

- Bei der Beurteilung der Leistungskenndaten der Luftreiniger in Sachen Reduktion der Luftkeimzahlen war hinsichtlich des Eingabewerts und des Beurteilungsparameters zunächst zu unterscheiden zwischen Mikroorganismen-Emissionen und Mikroorganismen-Immissionen in den Klassenräumen. Mikroorganismen -Emissionen in Klassenräumen sind im Vordergrund ständig und unvermeidbar stattfindende Bakterienfreisetzungen vom menschlichen Körper. Mikroorganismen-Immissionen sind Einträge von außen, zu denen es bei jedem Lüften der Klassenräume kommt. Diese Immissionen fielen zur Zeit der Prüfungen verglichen mit den Emissionen erheblich aus. Bei den Immissionen handelt es sich weit überwiegend um Pilze und Hefen.
- Bei den Versuchsbedingungen dieser Raumlufprüfungen können in Sachen (unvermeidbares) bakterielles Hintergrundrauschen (Emission durch sitzende und wenig bewegungsaktive Menschen)  $2 \times 10^2$  bis  $3 \times 10^2$  KBE Bakterien/m<sup>3</sup> angegeben werden. Den laufenden Emissionen bakterienhaltiger Partikel zum Trotz limitieren die Luftreiniger die Bakterien-Konzentration bemerkenswert zuverlässig auf 10% oder weniger der Bakterienbelastung, die ohne technische Luftreinhaltungsmaßnahme messbar wäre. Die Halbwertszeit der Bakterien in der Luft betrug nach Inbetriebnahme der beiden Luftreiniger und einer Luftwechselrate von 19-fach/h lediglich **5 Minuten**.
- Erwartungsgemäß wurden die „Gesamtkeime“, die zwar durch Bakterien vom Menschen beeinflusst, aber deutlich überwiegend von Pilzen und pigmentierten Hefen von außen gestellt wurden, durch die Luftreinigungsgeräte auf Werte deutlich unter die der Bakterien reduziert. Die Reduktion näherte sich 1% der Ausgangswerte an. Die Halbwertszeit der Gesamtkeime in der Luft betrug nach Inbetriebnahme der beiden Luftreiniger und einer Luftwechselrate von 26-fach/h lediglich **3 Minuten**.
- Hefen, die in ihrer Gesamtheit Immissionen von außen beim Lüften zugeordnet werden können und für die es keine Quellen im Klassenzimmer gab, wurden durch die Luftreinigungsgeräte innerhalb von **10 Minuten** auf Werte unter 0,25% und quantitativ quasi auf „**Nullbelastung**“ reduziert.
- Es ist anhand der Leistungskenndaten, die in dieser Studie ermittelt wurden, mit Sicherheit davon auszugehen, dass Luftreiniger der Schulz & Berger GmbH das Infektionsrisiko für die gesamte Klassengemeinschaft in Klassenräumen in erheblichem Maße senken können, da der Infektionsdruck durch laufende Entnahme wesentlicher Anteile potenziell infektiöser Aerosolpartikel niedrig gehalten wird.
- Im Reinluftstrom zentral unter dem Zuluftelement (Atemhöhe sitzender Mensch) war binnen Minutenfrist nach Inbetriebnahme der Luftreinhaltungsmaßnahme quasi „**Nullbelastung**“ gegeben. Diese „Nullbelastung“ betraf alle aufgezeichneten partikulären / feststofflichen Parameter

- Den Prüfergebnissen zufolge haben die Luftreiniger der Schulz & Berger GmbH bei ständigem Betrieb gegen anthropogene Bakterien in der Klassenraumlufte einen Schutzfaktor mindestens analog partikelfiltrierenden FFP2- Atemschutzmasken gegen schwebpartikuläre Gefahrstoffe aufzubieten. Gegen die hier gemessenen Gesamtpartikel - und damit mit großer Wahrscheinlichkeit auch gegen infektiöse Coronaviren - können Schutzfaktoren *mindestens* zwischen FFP2- und FFP3- Atemschutzmasken erwartet werden.
- Bakterien in der Klassenraumlufte sind überwiegend mit dem Partikel-Kollektiv im unteren Mikrometerbereich (1 – 10 µm) assoziiert. Der Literatur zufolge sind auch wesentliche Teile des infektiösen luftgetragenen Viruspartikelkollektivs in Aufenthaltsräumen in diesem Partikel-Größenfenster zu finden. Insofern können Bakterienpartikel befugt als aussagekräftige Ersatzparameter bei der qualifizierten Effektivitätsbeurteilung der Lüftungstechnischen Anlagen im Hinblick auf die Reduzierung des Infektionsdrucks, der durch ständige Ausstöße von Coronaviren durch infizierte Personen auf nicht infizierte Personen lastet, anerkannt werden. Die Vorteile liegen auf der Hand, weil Effektivitätsüberprüfungen von Luftreinigern dadurch schnell und kosteneffizient möglich gemacht werden können.

Isernhagen, 13.10.2020



Dr. Thomas Missel

Öffentlich bestellt und vereidigt als Sachverständiger für Schimmelpilze und Feuchtigkeit in Innenräumen

## 7 Literatur

- (1) ANALYSE DER VERBREITUNG AEROGENER VIREN ÜBER RAUMLUFTTECHNISCHE ANLAGEN UND ENTWICKLUNG VON DESINFEKTIONSMAßNAHME. Forschungsvorhaben S 770. Gefördert durch die Stiftung Industrieforschung (2009). Hrsg.: Institut für Laboratoriums- und Transfusionsmedizin, Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen an der Universitätsklinik der Ruhr-Universität Bochum, Georgstraße 11, 32545 Bad Oeynhausen
- (2) JULIAN W. TANG, ANDRE D. NICOLLE, CHRISTIAN A. KLETTNER, JOVAN PANTELIC, LIANGDE WANG, AMIN BIN SUHAIMI, ASHLYNN Y. L. TAN, GARRETT W. X. ONG, RUIKUN SU, CHANDRA SEKHAR, DAVID D. W. CHEONG, KWOK WAI THAM (2013). Airflow Dynamics of Human Jets: Sneezing and Breathing - Potential Sources of Infectious Aerosols. In: PLOS ONE, [www.plosone.org](http://www.plosone.org), 1 April 2013, Volume 8 Issue 4 e59970
- (3) J. P. DUGUID, M.B. THE SIZE AND THE DURATION OF AIR-CARRIAGE OF RESPIRATORY DROPLETS AND DROPLET-NUCLEI. Downloaded from <https://www.cambridge.org/core>. IP address: 46.83.148.101, on 01 May 2020 at 11:31:35, subject to the Cambridge Core terms of use, available at <https://www.cambridge.org/core/terms>. <https://doi.org/10.1017/S0022172400019288>
- (4) LYDIA BOUROUIBA, ELINE DEHANDSCHOEWERCKER AND JOHN W. M. BUSH (2014). Violent expiratory events: on coughing and sneezing. J. Fluid Mech. (2014), vol. 745, pp. 537–563. !c Cambridge University Press 2014 doi:10.1017/jfm.2014.88
- (5) MISSEL, T. UND FELTEN, C. (2006). Wirksamkeitsüberprüfung Technischer Schutzmaßnahmen in der Abfallwirtschaft mit der Korrelierten Partikelzählung. Ergo-Med Nr. 3 06/2006, S. 84-89
- (6) SCHAPPLER-SCHEELE, B., HARTUNG, J., SCHÜRMAN, W., MISSEL, T., BENNING, C. UND WEBER, J. (1998). Untersuchung der gesundheitlichen Gefährdung von Arbeitnehmern der Abfallwirtschaft in Kompostieranlagen (Projekt 04.006). Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin - Forschung, 1998.
- (7) MISSEL, T. UND HARTUNG (2005). Partikelzählung zur Erfassung von Schimmelpilzen in der Arbeitsplatzatmosphäre. (Projekt Fb 1043). Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin – Forschung 2005, ISSN 1433-2086, ISBN 3-86509-298-5
- (8) MISSEL, T. (1997). Beurteilung der Wirksamkeit keimemissionsmindernder Maßnahmen in Wertstoffsartieranlagen. BIA - Handbuch 29. Lfg. VII / 97
- (9) MISSEL, T. (1997). Messung von Luftkeimen in Wertstoffsartieranlagen. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 57, Springer - VDI Verlag 1997: S. 311 - 118
- (10) FELTEN, CF., ALBRECHT, A., MISSEL, T. UND WILLER, E. (2006). Schimmelpilzkonzentrationen an Arbeitsplätzen in Kompostieranlagen im Vergleich zum technischen Kontrollwert der TRBA 211. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, FB 1081, 2007, ISBN-10: 3-86509-593-3, ISSN 1433-2086