

Dezentrale Luftfilteranlagen – zu laut für den Unterricht

Carsten Ruhe

Schon relativ früh wurde mit Aufkommen des Coronavirus durch Untersuchungen bestätigt, dass mit dezentralen Umluftanlagen die Viruslast in einem geschlossenen Raum merklich gesenkt werden kann. Das setzt allerdings eine 4- bis 6-fache Umwälzung der Raumluft in einer Stunde voraus. Das Problem der damit verbundenen Geräuschentwicklung wurde leider weniger beachtet und untersucht. Besonders bei dem Einsatz in Schulen sollte die Geräuschbelastung konsequent in Grenzen gehalten werden, ist doch die Sprachkommunikation und deshalb die Sprachverständlichkeit von essenzieller Bedeutung. Der Beitrag geht darauf ein, wie die Vorgaben zur Reinigung der Raumluft und die akustischen Anforderungen konkurrieren. Eigene Messungen in Schulräumen dokumentieren die Notwendigkeit, diese Problematik bei der Auswahl und dem Betrieb einer Anlage zu berücksichtigen.

Einleitung

Im Frühjahr 2020 griff die Corona-Pandemie auch auf Deutschland über. Lange Zeit war kein Präsenz-Unterricht möglich, im Sommer 2020 begann er wieder, mit den bekannten Schutzmaßnahmen. Auf der Suche nach weiteren Schutzmaßnahmen wurden die Erwartungen geäußert und entsprechende Forderungen vorgetragen, dass mittels mobilen Umluftanlagen mit Virenfiltern und / oder UV-Behandlung die Viruslast in Klassenräumen deutlich gesenkt werden könnte. Zum Nachweis der Wirksamkeit von Umluftfilteranlagen beauftragten die Hersteller solcher Geräte Untersuchungen der entsprechenden Filterleistung. Die Ergebnisse einer Untersuchung an der Universität der Bundeswehr München wurde im August 2020 veröffentlicht [1], die einer anderen am Karlsruher Institut für Technologie im Oktober [2]. Demnach sollen solche Anlagen geeignet sein, die Virenbelastung der Innenraumluft erheblich zu reduzieren. Wesentlich für den Erfolg ist der von den Geräten erzeugte Volumenstrom. In [1] wurde mit Volumenströmen von 600 m³/h bis 1.500 m³/h gearbeitet, in [2] mit einem von 850 m³/h. Daneben spielen die eingesetzten Filter und Rahmenbedingungen wie Raumgröße, Raumgeometrie, Raumausstattung, Unterstützung durch eine raumluftechnische Anlage etc. eine gewichtige Rolle. Daraus wurde in [1]

Decentralized air filtration systems – too loud for the classroom

With the emergence of the coronavirus, studies confirmed relatively early on that the virus load in a closed room can be noticeably reduced with decentralized recirculation systems. However, this requires a 4 to 6-fold circulation of the room air in one hour. On the other side, the problem of the associated noise generation has been less considered and investigated. Especially when used in schools, noise pollution should be consistently kept within limits, since speech communication and therefore speech intelligibility are of essential importance. The article discusses how the specifications for cleaning the room air and the acoustic requirements compete. The own measurements in classrooms document the necessity of taking this problem into account when selecting and operating a system.

der Schluss gezogen, dass aus Vorsorge von einem 4- bis 8-fachen Umwälzen der Raumluft pro Stunde ausgegangen werden sollte.

In der Folge wurden Forderungen erhoben, die Schulen mit solchen Umluftfilteranlagen auszustatten. Das veranlasste wiederum zahlreiche Firmen, ohne lange vorangehende Entwicklungen und weitere sorgfältige Untersuchungen, solche Geräte zu produzieren und anzubieten. Insbesondere die akustischen Eigenschaften der Geräte wurden vielfach weniger kritisch in den Fokus genommen. Wenn diese Geräte in den Klassenräumen dann im Soll-Betriebszustand betrieben wurden, beklagten sich Lehrer und Schüler häufig über die zu lauten Geräusche mit der Folge, dass die geförderte Luftmenge reduziert wurde.

Der Verfasser erhielt zunächst eine Anfrage aus einer süddeutschen Kreisstadt, welche sich schon vor der Bestellung der Geräte mit dem Geräuschproblem befasste. Zum damaligen Zeitpunkt lagen nur Ergebnisse von in-situ-Kurzmessungen mit geringer Aussagekraft vor. Deshalb basierte die erste Stellungnahme [3] ausschließlich auf wenigen Schallmessungen in Prüfständen. Doch schon die rein rechnerische Verwertung dieser Prüfstandsdaten ließen eine deutliche Auswirkung dieser Geräusche auf die Verständlichkeit von Sprache im Unterricht und damit auf den Lernerfolg erwarten. Dieser Bericht führte zu Anfra-

gen direkt von einigen Schulen (nicht den Schulträgern) und daraus ergaben sich dann, verstreut über das Bundesgebiet, etliche Schallmessungen an verschiedenen Anlagen, über die hier anhand einzelner Beispiele berichtet wird.

Das UBA hat im September 2021 eine Empfehlung veröffentlicht [4]. Eine offizielle Empfehlung (VDI-EE 4300-14) zum Einsatz von Lüftungsanlagen [5] wurde ebenfalls im September 2021 vom UBA in Zusammenarbeit mit dem VDI (Kommission Reinhaltung der Luft) herausgegeben. Auszüge sind in [6,7] nachzulesen. Zwar werden dort folgende Vorgaben gemacht,

- Aufstellpositionen im Raum entsprechend der Anweisungen der Hersteller
- Filterklassen wie HEPA H13
- Sicherheit und Schutz vor Vandalismus
- Luftvolumenstrom für mobile Luftreinigungsgeräte, der mindestens dem 4-fachen Luftwechsel pro Stunde entspricht
- Geräusentwicklung bei dem geforderten Luftvolumenstrom nach ASR A3.7 (z. B. für Schulen Schalldruckpegel kleiner/gleich 35 dB(A))
- Behaglichkeitsaspekte (Vermeiden von Zugluft)
- Reinigungsleistung bei Filtergeräten (Effizienz der Filterung > 90 %, Prüfung im Labor unter realraumähnlichen Bedingungen),

aber dadurch wird ein wirksamer und kompetenter Einsatz der Geräte auch nicht gesichert. Dabei steht immer wieder die lufthygienische Wirkung mit einer nur moderaten Geräusentwicklung in Konkurrenz. Die bisweilen leichte Verfahrbarkeit der Geräte führt

oft dazu, dass sie sich deshalb nicht (mehr) am vorgegebenen Standort befinden, sondern nach einiger Zeit offenbar nach Bedarf umgestellt werden.

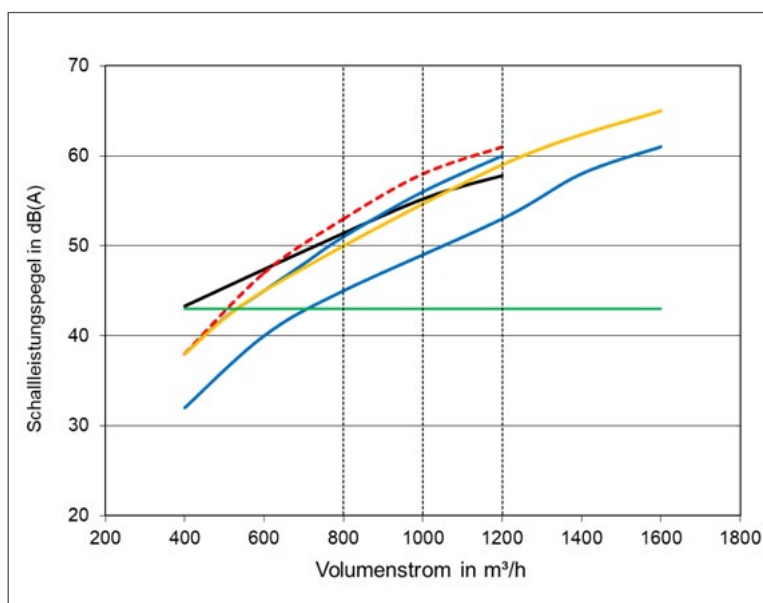
Geräuscherzeugung und Wirkungsmechanismen

Für eine geeignete Auswahl sowie einen informierten Einsatz und Umgang mit den Geräten wären zunächst einige technisch-physikalische sowie messtechnische Grundlagen zu beleuchten.

Klassenräume haben typischerweise ein Raumvolumen von ca. 200 m³. Lüftungsanlagen mit Zu- und Abluft, Frisch- und Fortluft müssen für hygienische Verhältnisse die Raumluft in jeder Stunde zweimal austauschen, um die CO₂-Konzentration ausreichend niedrig zu halten. Das sind bei den typischen Klassenraumgrößen etwa 400 m³/h. Demgegenüber wird bei dezentralen Raumluftfilteranlagen im Umluftbetrieb eine 4- bis 6-fache Umwälzung (mittlere Empfehlung in [1]) angestrebt, woraus ein erforderlicher Volumenfluss von 800 m³/h bis 1.200 m³/h resultiert. Die Luft muss ferner mit einem hohen Druck durch die sehr feinen HEPA-Filter gepresst werden. Beides führt gegenüber normalen Lüftungsanlagen zu einer deutlich erhöhten Geräusentwicklung. Der Schall wird auch nicht nur aus den Ansaug- und Ausblasöffnungen abgestrahlt, sondern zum Teil auch vom Gerätegehäuse. Normale Lüftungsanlagen stehen meist in einer Technikzentrale, also weit weg von den Klassenräumen, und in die Kanäle sind zusätzliche Schalldämpfer eingebaut. Alles das fehlt bei den dezentralen Raumluftfilteranlagen. Dass der hohe Volumenstrom nicht geräuschlos umgesetzt werden kann, ist kaum zu überhören. Möglicherweise ist das einer der Gründe, warum inzwischen die notwendigen Luftwechselzahlen von 6 über 5 auf derzeit 4 reduziert worden sind.

Kenngröße für die Geräuschabgabe (Emission) von Lüftungsgeräten ist der Schalleistungspegel L_w . Er ist nur vom Betriebszustand, insbesondere vom Volumenstrom und der Pressung (= aufgebaute Druckdifferenz) abhängig. Der Schalleistungspegel wird aus Messwerten im reflexionsarmen Schallmessraum errechnet. Typischerweise werden die Schalleistungspegel in Prüfberichten für verschiedene Leistungsstufen getrennt aufgeführt. Nur dadurch kann man die Gerätedaten auch leistungsbezogen vergleichen. Aus einigen wenigen erhältlichen Messberichten über die Messung von Schalleistungspegeln sind die Daten in der Abbildung 1 in Abhängigkeit vom Volumenstrom dargestellt. Bei der rot gestrichelten Kurve musste die Zuordnung geschätzt werden, weil die Schalleistungspegel dort nur in Relation zur Drehzahl angegeben sind, nicht jedoch zu den Luftvolumenströmen.

Abb. 1: Schalleistungspegel von verschiedenen Luftfilteranlagen relativ zum Luftvolumenstrom. Grüne horizontale Linie: maximal zulässiger Schalleistungspegel für Klassenräume. Zwischen den vertikalen Linien befindet sich der zunächst angestrebte Sollbereich für den Volumenstrom.



Die beiden blauen Linien kennzeichnen die Messwerte an Geräten von zwei verschiedenen Baugrößen desselben Herstellers. Deutlich ist zu erkennen, dass das größere Gerät bei gleichem Volumenstrom um etwa 7 dB leiser ist. Trotzdem hält es weder bei einem Volumenstrom von 800 m³/h und erst recht nicht bei einem von 1.200 m³/h die grüne Soll-Linie von maximal $L_w = 42$ dB(A) ein. Dieser Wert ergibt sich, wie nachfolgend gezeigt wird, aus dem maximal akzeptablen Schalldruckpegel von 35 dB(A). Dennoch spricht für das größere Gerät nicht nur, dass es leiser ist, sondern auch, dass es weniger als 50 % der elektrischen Leistung des kleinen benötigt. Es ist allerdings in der Anschaffung teurer.

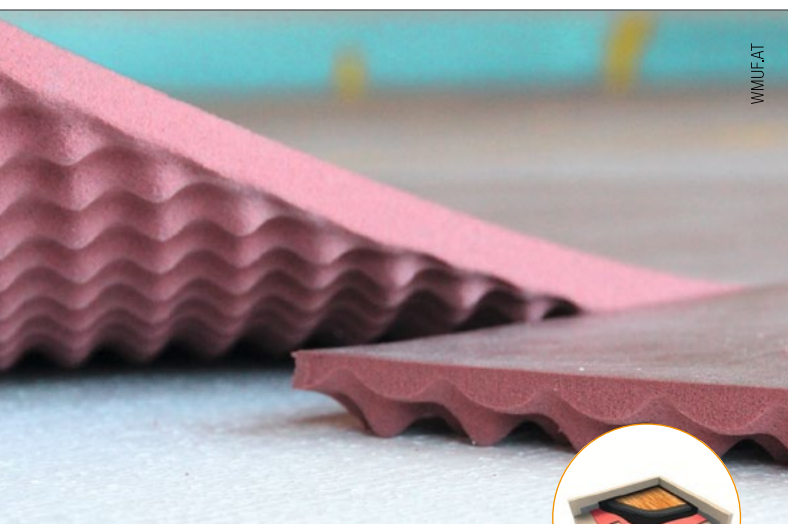
In den untersuchten Geräten einiger Hersteller sind zusätzlich auch Grob- und Feinstaub- sowie Aktivkohle-Filter eingebaut. Die Überwindung jeder Filterstufe benötigt zusätzlichen Luftdruck, erhöht also bei gleichem Volumenstrom die Pressung. Bezogen auf eine bestimmte Filterkombination ist die Angabe des Volumenstromes zum Schalleistungspegel ausreichend. Beim Volumenstrom besteht ein linearer Zusammenhang zum Schalleistungspegel, bei der Pressung jedoch ein quadratischer: jede Verdoppelung des Volumenstromes erhöht also den Schalleistungspegel um 3 dB, jede Verdoppelung der Pressung erhöht ihn

aber um 6 dB. Weil die Pressung mit zunehmendem Volumenstrom auch größer wird, erhöht sich der Schalleistungspegel bei Volumenstromverdoppelung also zwischen 6 und 10 dB, je nach Filtern. Deshalb werden bei einigen Herstellern augenscheinlich nur HEPA-Filter eingebaut, aber weder Staub- noch Aktivkohle-Filter. Der Verzicht auf Staubfilter dürfte aber auf Dauer wegen der Luft-Ansaugung direkt über dem Fußboden ungünstig sein, weil dadurch die HEPA-Filter verschmutzen und somit die erforderliche Pressung weiter ansteigt oder der Luftvolumenstrom abnimmt.

Zusammenhang zwischen Schalleistungspegel und Schalldruckpegel

Direkt messbar ist mit einem Schallpegelmessgerät nicht der Schalleistungspegel, sondern der Schalldruckpegel L_p an einem bestimmten Punkt im Raum (Immissionsort). Der Schalldruckpegel ist neben der Frequenz die wesentliche Größe, die die empfundene Lautstärke bestimmt. (Anm.: Die Frequenzabhängigkeit wird durch die A-Bewertung näherungsweise berücksichtigt. Durch die Angabe des Schalleistungspegels dB(A) ist dies beim Schalleistungspegel berücksichtigt.)

Der Schalldruckpegel hängt direkt vom Schalleis-



WMUFAT

Effektiver Schallschutz speziell für tiefe Frequenzen Acoustic Floor Mat 35

- Minimale dynamische Steifigkeit von nur 5 MN/m³ nach EN 29052-1
- Bewertete Trittschallminderung von 35 dB nach EN 10140-3
- Geringe Einbauhöhe von lediglich 16 mm
- Schnelle Verlegung und einfaches Handling
- Hervorragende Alterungsbeständigkeit über Jahrzehnte



www.getzner.com

getzner
engineering a quiet future

Heiz-/Kühldecken neu gedacht

ARBEITEN WIE DRAUSSEN.

Gesundes Innenraumklima durch ein neues, einzigartiges Deckensystem: kühlt, heizt und absorbiert auf höchstem Niveau. Orientiert an der Natur: effiziente und leichteste Konstruktion auf dem Markt.

Alle Details
zu Ecophon
Solo™ Matrix Celsius
finden Sie hier
www.ecophon.de



 Lindab

Ecophon
SAINT-GOBAIN

tungspegel der Quelle ab, darüber hinaus aber auch vom Raum-Volumen, der Nachhallzeit und dem Abstand zwischen dem Lüftungsgerät und dem Immissionsort. Fehlen eine oder mehrere der vier Angaben, so sind die Messergebnisse von Schalldruckpegeln nicht eindeutig einzuordnen. Dagegen kann man bei bekanntem Schalleistungspegel für einen Raum mit bekanntem Volumen und bekannter Nachhallzeit den in einem bestimmten Abstand vom Gerät zu erwartenden Schalldruckpegel errechnen.

Die Differenz zwischen Schalleistungspegel und Schalldruckpegel wird für punktförmige Schallquellen wie folgt errechnet:

$$L_w - L_p = 10 \cdot \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right)^{-1} \quad \text{Gl. 1}$$

Q: Richtungsfaktor (Quelle frei im Raum = 1, vor Wand = 2, vor Kante = 4, in Ecke = 8),
r: Abstand in m zwischen Quelle und Immissionsort,
A: äquivalente Absorptionsfläche in m²

Der totale Schalldruckpegel ergibt sich aus der Überlagerung der Schallwelle, die auf direktem Wege von der Schallquelle den Immissionsort erreicht (Direktschall), und den vielen Schallwellen, die durch Reflexionen an Raumbegrenzungen entstehen. Da Letztere gleich stark alle möglichen Richtungen einnehmen können, wird hier von diffusem Schall gesprochen, wahrgenommen als Hall. Nahe an der Quelle dominiert der Direktschall. Er wird durch den linken Term in der Klammer von Gleichung 1 berücksichtigt und fällt mit $1/r^2$ ab. Mit zunehmendem Abstand verliert er also an Einfluss und der dif-

fuse Schall wird dominant, der durch den rechten Term im Klammersausdruck berücksichtigt wird. Die Grenze liegt vor, wenn beide Terme gleich groß sind. Der damit verbundene Abstand wird als Hallradius bezeichnet. Wird er überschritten, befindet man sich im sogenannten Diffusfeld und der Abstand zur Quelle spielt für die Lautstärke keine Rolle mehr.

Tabelle 1 zeigt das Verhalten von Gleichung 1 bei zunehmendem Abstand unter folgenden Annahmen:

- $Q = 4$ wegen Aufstellung des Gerätes vor zwei schallharten Flächen (auf dem Fußboden, vor einer Wand)
- $A = 50 \text{ m}^2$

Gut zu erkennen ist, dass bei 2 m Abstand beide Summanden gleich groß sind und ab 3 m Abstand der zweite Klammer-Term dominiert. Entsprechend wäre der Hallradius 2 m. Ab einem Abstand von ca. 4 m ändert sich der Pegel kaum noch (siehe rote Markierung).

Einem Blick auf Gleichung 1 ist zu entnehmen, dass der Schalldruckpegel im Diffusfeld nur von der äquivalenten Absorptionsfläche *A* abhängt. Das ist die Fläche, die den auftreffenden Schall zu 100 % absorbieren würde. Zusammen mit dem Volumen kann daraus über die Formel von W. C. Sabine [8] die Nachhallzeit berechnet werden. Das ist die Zeit, die nach dem plötzlichen Abschalten der Quelle vergeht, bis der Diffusfeldpegel um 60 dB abgesunken ist. Umgekehrt kann über die gemessene Nachhallzeit und Raumabmessungen die äquivalente Absorptionsfläche bestimmt werden. Das wurde im Folgenden für Klassenräume durchgeführt, in denen weitere Untersuchungen stattfanden. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 2. Auf einige wird später noch einmal zugegriffen.

Tab. 1: Rechnerisch zu erwartende Differenzen $L_w - L_p$ im Klassenraum S3 K1 in verschiedenen Abständen *r*

Abstand <i>r</i>	$Q / 4 \pi r^2$	$4 / A$	Summe	$L_w - L_p$
1 m	1 / 3,1	1 / 12,5	0,398	4,0 dB
2 m	1 / 12,5	1 / 12,5	0,160	8,0 dB
3 m	1 / 28,3	1 / 12,5	0,115	9,4 dB
4 m	1 / 50,3	1 / 12,5	0,098	10,0 dB
5 m	1 / 78,5	1 / 12,5	0,093	10,3 dB
6 m	1 / 113,1	1 / 12,5	0,088	10,4 dB
7 m	1 / 153,9	1 / 12,5	0,086	10,6 dB
8 m	1 / 201,1	1 / 12,5	0,085	10,7 dB
9 m	1 / 254,5	1 / 12,5	0,084	10,8 dB
10 m	1 / 314,1	1 / 12,5	0,083	10,8 dB

Tab. 2: Akustisch wichtige Daten der untersuchten Räume

Raum	Volumen V in m ³	Nachhallzeit T _m in s	Absorptionsfläche A _m in m ²	Hallradius r _H in m
S1 K1	175	0,39	73	1,19
S1 K2	188	0,38	84	1,25
S2 K1	210	0,50	70	1,15
S2 K2	210	0,45	75	1,21
S2 P1	375	0,81	71	1,20
S2 P2	375	1,25	55	0,97
S3 K1	200	0,65	52	0,98
S4 K1	189	0,50	61	1,09
S5 K1	212	0,77	63	0,93
S5 K2	180	0,72	47	0,89
S6 K1	242	0,91	43	0,91

Anhand der farbig markierten Zeilen ist zu erkennen, dass bei den etwa 200 m³ großen Räumen auch für sehr unterschiedliche Nachhallzeiten (0,38 / 0,72 s) die Hallradien nur wenig variieren (1,25 / 0,89 m).

Einzuhaltende Schallpegel

Wie schon angesprochen ist eine Balance zwischen erforderlicher Filterleistung und einer akzeptablen Geräuschbelastung zu finden. Im Juni 2021 veröffentlichte die DGUV eine sogenannte „Gefährdungsbeurteilung“ für Luftfilteranlagen in öffentlichen Gebäuden. Enthalten ist auch ein Absatz zum Thema „Lärmschutzanforderungen“. *„Bereits bei der Anschaffung von Geräten muss darauf geachtet werden, dass die angegebenen Schalleistungen auch bei der angestrebten Leistungsstufe eingehalten werden“*, heißt es dort als Empfehlung. Und: *„Viele Hersteller geben die Schalleistung nicht bei der maximalen Einstellung an.“* Eine Vorgabe, welcher Schalleistungspegel in der Soll-Betriebsstufe einzuhalten ist, fehlt aber. Diese Hinweise bieten den Nutzern/Käufern deshalb nur wenig Hilfestellung.

In der Richtlinie des BMWi (heute: BMWK) [9] werden allerlei Förder-Voraussetzungen aufgeführt. Zahlenwerte zu den einzuhaltenden Schalleistungs- oder Schalldruckpegeln sind aber auch dort nicht zu finden. Die Schalldruckpegel, welche in Klassenräumen während des Unterrichts auf die Schüler:innen einwirken dürfen, sind in verschiedenen Regelwerken aufgeführt. In DIN 4109-1 [10] und in DIN 18041 [11] sind die Anforderungen bzgl. maximal zuläs-

siger Geräusche von gebäudetechnischen Anlagen in Unterrichtsräumen mit $L_{AF,max,n} \leq 35$ dB(A) bzw. $L_{NA,Bau} \leq 35$ dB(A) vorgegeben. Während nach DIN 4109 „etwa in Raummitte“ gemessen werden soll, ist in DIN 18041 [11] ausdrücklich festgelegt, dass der Schalldruckpegel an dem der Schallquelle nächstbenachbarten Zuhörerplatz zu erfassen ist. VDI 2081 [12] benennt diesen Schallpegel für die Lüftungsanlagen-Geräusche, und in der ASR A3.7 [13] ist er als zulässiger „Hintergrund-Schallpegel“ angegeben. Dieser Wert ist auch in der Experten-Empfehlung VDI-EE 4300-14 [5] aufgeführt.

Die Behörde für Schule und Berufsbildung, Hamburg (BSB) benennt als „idealen Schallpegel“ einen Wert von 40 dB(A) und gibt als „Toleranzgrenze“ sogar 45 dB(A) an [14]. Der Freistaat Bayern hat seine Förderrichtlinie novelliert [15]. Waren dort zunächst ebenfalls bis zu 40 dB(A) zulässig, heißt es jetzt: *Der Schalldruckpegel muss im Normalbetrieb mit den Anforderungen an einen geordneten Unterrichts- und Kitabetrieb vereinbar sein. Die Geräte dürfen im Dauerbetrieb einen Schalldruckpegel möglichst von 35 dB(A), jedenfalls aber von 40 dB(A) nicht überschreiten.* Ob mit „Dauerbetrieb“ der Soll-Betriebszustand gemeint ist, bleibt offen.

In der BSB-Handreichung heißt es eher beschwichtigend: *Die Geräte senden ein sonores Brummen / Rauschen zwischen 35 Dezibel und 45 Dezibel und sind wie Tischventilatoren mehrstufig oder stufenlos einstellbar.* Ein Hersteller schreibt auf seiner Webseite: *Der Geräuschpegel im Dauerbetrieb bei 1.150 m³/h Nenn-*

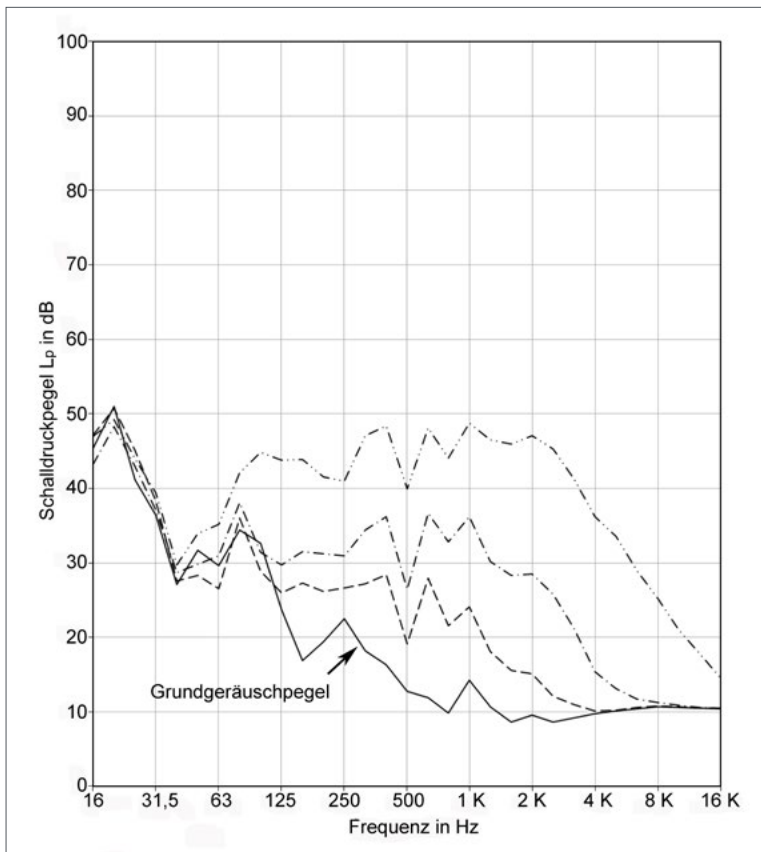


Abb. 2: Schallpegel eines Gerätes in 1 m Abstand mit drei Schaltstufen, bei hohem Volumenstrom zunehmend Zischgeräusche durch scharfe Kanten und ungünstige Luftführung.

volumenstrom liegt bei angenehmen 50 dB(A). In der zugehörigen Betriebsanleitung sind dagegen sogar 55 dB(A) aufgeführt.

Weil die Schallpegel-Sollwerte bei sachgerechtem Luftvolumenstrom nicht einzuhalten sind, wird vielfach die Luftmenge so weit reduziert, bis die Lautstärke erträglich ist. Dann fördern die Geräte aber zu wenig Luft, um die angestrebte Virenarmut sicherzustellen. Hier wiegen sich alle Nutzer in falscher Sicherheit. Die Geräte laufen ohne den erwarteten Nutzen, kosten aber Strom. Dazu schätzt BSB in der Handreichung einen Jahresstromverbrauch von 2.860 MWh allein für Hamburg. Nach mündlicher Aussage eines an der Berechnung beteiligten Mitarbeiters bezieht sich dieser Wert nicht auf den Volllast-, sondern nur den empfohlenen Teillastbetrieb. Während die Anschaffung der Geräte vielerorts bezuschusst wird, müssen die Schulen sämtliche Betriebskosten (Strom, Filtertausch, Wartung) selbst bezahlen.

Einige Hersteller haben ihre Geräte bereits werksseitig gedrosselt. So könnte das Gerät eines Herstellers eigentlich 1.600 m³/h leisten, ist aber auf 750 m³/h begrenzt. Einige Bundesländer sind inzwischen von der Forderung eines sechsfachen Luftwechsels abgerückt und fordern nur noch einen fünffachen, UBA und VDI wie bereits zitiert inzwischen sogar nur

noch den vierfachen [6]. In der BSB-Handreichung [14] heißt es zu dem Thema: *Für leisen Unterricht (z. B. Klassenarbeit) sollten 45 Dezibel nicht überschritten werden, viele Geräte sollten daher nicht auf der höchsten Stufe, sondern im mittleren Lastbereich eingestellt werden.*

Gemessene Schallpegel in Klassenräumen

Bei den im Folgenden beschriebenen eigenen Schallpegelmessungen in den Klassenräumen handelt es sich ausschließlich um Schalldruckpegel an den Immissionsorten. Sofern Schalleistungspegel als Emissionswert der Geräte gemeint sind, wird das ausdrücklich erwähnt.

Die Messergebnisse aus den verschiedenen Schulen sind zwar relativ ähnlich, aber doch immer wieder unterschiedlich. Das ist durch folgende Umstände begründet:

- Die Besetzungsdichte mit Tischen und Stühlen reicht von 7 bis zu 28 Plätzen.
- Dadurch sind nicht überall freie Messpfade vorhanden.
- Die Möblierung variiert von „Halbkreis“ über „in-Reih-und-Glied“ bis zur „freien Aufstellung“.
- Dadurch gibt es nur in wenigen Fällen geordnete Messpunkte.
- Die Aufstellung der Raumluftfilteranlagen in den Klassenräumen ist sehr unterschiedlich nach dem Motto „wo ist denn noch Platz“?
- Sie stehen deshalb in Raumecken, mittig vor der Rückwand oder der Flurwand, in einem Fall sogar am Fenster.
- Auch die Aufstellung zwischen Schränken und Regalen ist nicht selten (mit entsprechender Beeinträchtigung der Luftströmung auf der Ansaugseite).

Die Klassenräume der Schallmessungen hatten durchgängig ein Volumen von etwa 200 m³, zwei Pausenhallen jeweils etwa 350 m³. In 1,0 m Abstand von der Gerätevorderseite wurden die Schallpegel in 1,2 m Höhe (entspricht der Ohrhöhe sitzender Personen) gemessen. Soweit möglich erfolgten die Messungen auch bei verschiedenen Luftvolumenströmen. Beispielhaft sind in Abbildung 2 die Messergebnisse eines Gerätes mit drei Schaltstufen und ungünstiger Luftführung aufgrund scharfer Kanten dargestellt. Der maximale Volumenstrom beträgt nach Herstellerangabe ca. 600 m³/h. Gegenüber dem Grundgeräuschpegel im Raum von 24 dB(A) ergeben sich in den drei Schaltstufen 32 dB(A), 42 dB(A) und 56 dB(A). Das Spektrum wird immer breiter; die Zisch-Geräusche an den scharfen Kanten nehmen deutlich zu. Die damit verbundene Auswirkung auf die Sprachverständlichkeit wird weiter un-

ten beschrieben.

Deutlich günstiger ist die Situation bei dem Gerät (mit nachträglich aufgesetztem Schalldämpfer) eines anderen Herstellers mit sechs Stufen nach Abbildung 3. Durch eine günstigere Luftführung tritt das Zischen nicht auf. Dennoch werden auch hier 57 dB(A) erreicht, allerdings in der höchsten Stufe bei ca. 1.100 m³/h. Für die beiden Geräte in Abbildung 2 und 3 sind keine Herstellerangaben zu den Volumenströmen der verschiedenen Schaltstufen erhältlich. Nur die maximalen Volumenströme sind den Datenblättern zu entnehmen.

Ein weiterer Hersteller zeigt an einem Display die Luftvolumenströme in 5 %-Schritten der maximalen Leistung von 740 m³/h an. Zwischen 40 % und 100 % steigt der Schallpegel von 43 dB(A) auf 56 dB(A). Bei diesem Gerät treten kaum Zisch-Geräusche auf, weil direkt unter dem Ausblasgitter noch ein Vlies angebracht ist. Auffällig ist bei diesem Gerät in Abbildung 4 aber, dass bei 16.000 Hz der Schallpegel kräftig ansteigt (bis auf 26 dB). Solche Pfeif-Geräusche können für gesunde junge Ohren, bei denen der Hörbereich noch bis 20.000 Hz oder sogar darüber hinaus reicht, ausgesprochen störend wirken.

Anlässlich der Schallpegelmessungen stand kein Messgerät zur Ermittlung des tatsächlich vorhandenen Luftdurchsatzes zur Verfügung. Einige Regler arbeiten in Stufen, andere stufenlos. Deshalb war der Volumenstrom lediglich „gezielt zu schätzen“ oder es musste den teilweise vollmundigen Herstellerangaben vertraut werden. Auch die Filterzustände und die ggf. durch Verschmutzung bewirkte Reduzierung der Luftmenge sind unbekannt. Nicht in jedem Fall erscheinen die Herstellerangaben (im Verhältnis zum gemessenen Schallpegel) nachvollziehbar.

Der Abschlussbericht des IGTE an der Uni-Stuttgart [16] zu einem Pilotprojekt an Stuttgarter Schulen kommt zu ähnlichen Ergebnissen. Bei insgesamt 11 untersuchten Klassenräumen waren nur in zweien die Schallpegel kleiner als 40 dB(A), in sieben Fällen wurden aber mehr als 45 dB(A) gemessen.

Schallpegelabnahme im Raum

Auch die Schallpegelabnahme innerhalb des Klassenraumes gegenüber den Werten in 1 m Abstand ist von Interesse, um die Geräuscheinwirkungen an verschiedenen Sitzplätzen errechnen zu können. Dazu wurden in gerasterten Abständen von jeweils 1,0 m – wiederum auf Ohrhöhe sitzender Personen – die dort vorhandenen Schallpegel gemessen. Für einen guten Signal-Rausch-Abstand (Abstand des zu messenden Schallpegels vom im Raum vorhandenen Fremdgeräusch) erfolgten diese Messungen grundsätzlich bei der höchsten Fördermenge, teilweise zusätzlich auch bei der vorgefundenen Einstellung. Die

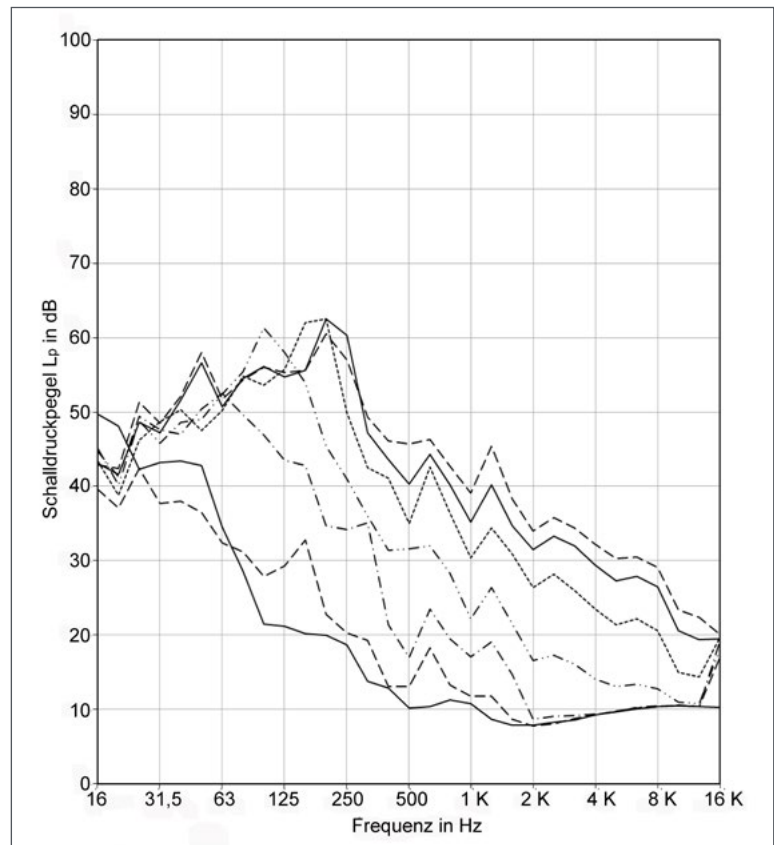
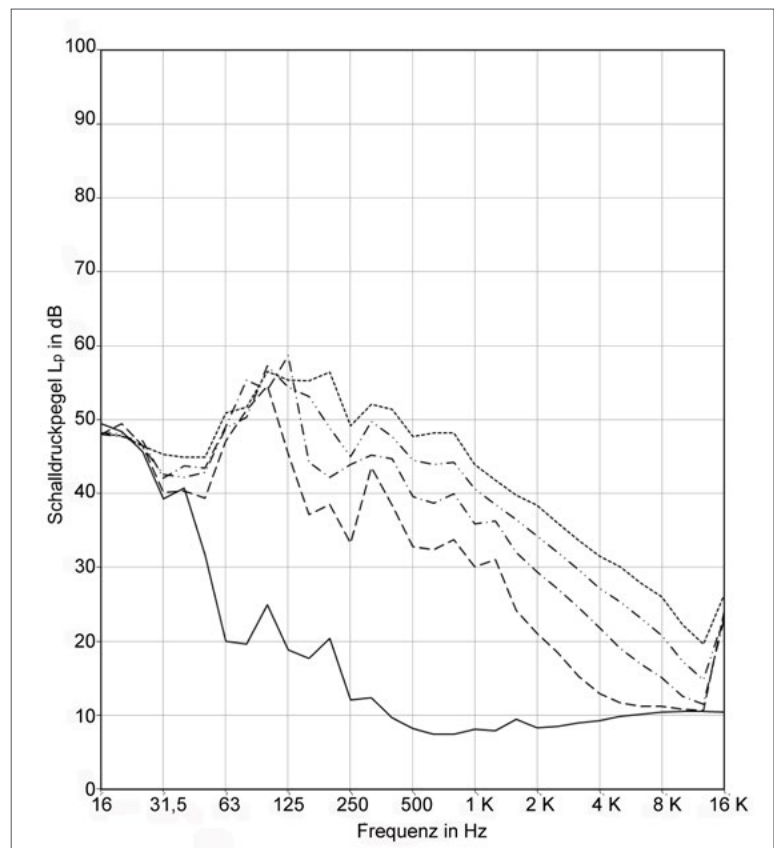


Abb. 3: Schallpegelspektren eines Gerätes mit sechs Stufen; durchgezogene Linie: Grundgeräuschpegel.

Abb. 4: Schallpegelspektren für 40, 60, 80 und 100 % Luftvolumenstrom von 740 m³/h; durchgezogene Linie: Grundgeräuschpegel.



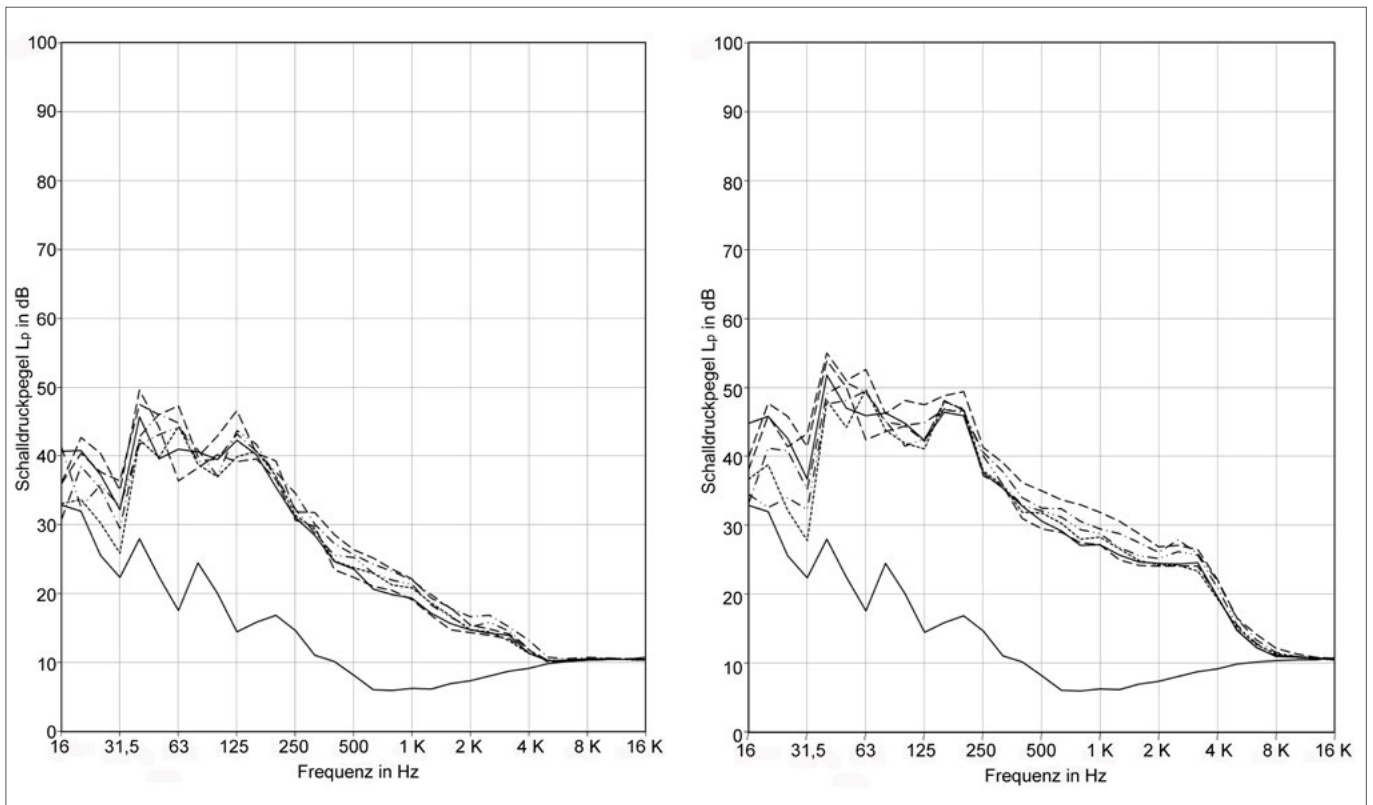


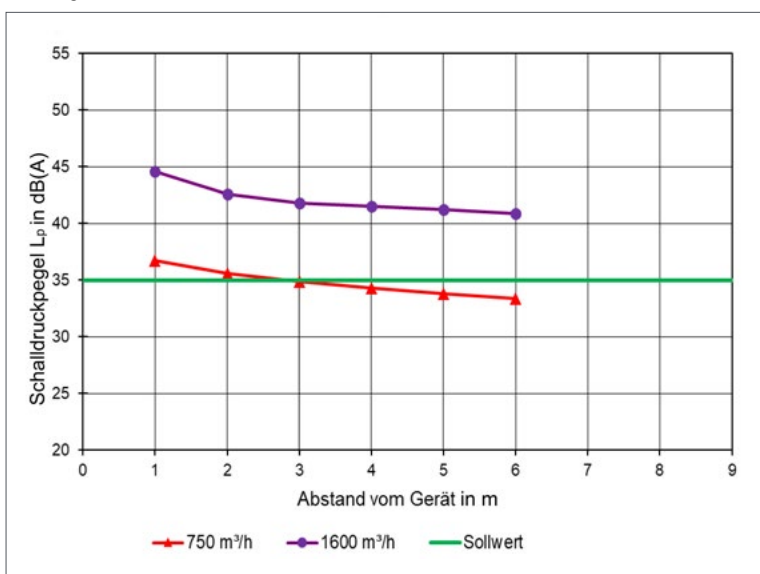
Abb. 5: Schallpegelspektren im Klassenraum von 1 m bis 6 m Abstand, links vorgefundener Zustand, rechts maximale Förderleistung.

Abbildungen 5a (links) und 5b (rechts) zeigen beispielhaft solche Messergebnisse für die vorgefundene und die maximale Einstellung.

Es ist festzustellen, dass die Schallpegelabnahme innerhalb des Klassenraumes vom Klassenraum von hinten in 1 m Abstand vor dem Gerät (also an den Schüler-Sitzplätzen) bis hin zu 6 m Abstand vorne vor der Tafel (beim Lehrer-Standort) relativ gering

ist. Hier liegt also eine sogenannte „Diffusfeld-Situation“ vor. In Abbildung 6 sind die A-bewerteten Gesamtschallpegel der obigen Spektren in Abhängigkeit vom Abstand vom Gerät dargestellt. In beiden Fällen nimmt der Schallpegel von 1 m bis 6 m Abstand nur um etwa 3,5 dB ab. Als grüne horizontale Linie ist der Sollwert für den im Klassenraum einzuhaltenen Störgeräusch-Schallpegel von maximal 35 dB(A) nach DIN 4109, DIN 18041 und VDI 2081 bzw. ASRA3.7 ebenfalls eingetragen.

Abb. 6: Abstandsabhängige Minderung der A-bewerteten Gesamtschallpegel in einem Klassenraum für die vorgefundene und maximale Luftförderleistung im Vergleich zum Sollwert von maximal 35 dB(A).



Anhand der roten Kurve im Vergleich mit der grünen 35 dB-Linie in der Grafik wird erkennbar, warum dieses Gerät herstellenseitig auf nur 750 m³/h gedrosselt wurde. Dann kann nämlich ab etwa 3 m Abstand vom Gerät der Wert von 35 dB(A) eingehalten werden. Dabei nimmt man dann offenbar billigend in Kauf, dass die geforderte Luftumwälzung nicht erreicht wird. Zwei Geräte dieser Art würden das zwar schaffen, allerdings wären durch die Überlagerung der Geräusche überall im Klassenraum die 35 dB(A) überschritten. Zwei Geräte wären zudem verbunden mit den doppelten Anschaffungs- und auch den doppelten Betriebskosten (bei unveränderter finanzieller Förderung).

Etliche Hersteller beschreiben im Internet eine Schallpegelabnahme, welche sich an der Situation im akustischen Freifeld (siehe Abb. 7, graue Kurve) orientiert. Danach soll der Schallpegel bis 10 m Abstand um 20 dB geringer werden. In typischen Klas-

senräumen liegt die maximale Messentfernung bei etwa 6 oder 7 m, in großen Räumen auch mal 8 m (und je nach Position des Gerätes im Raum auch weniger). 10 m werden aber nie erreicht. Deshalb liegen für diesen Abstand keine eigenen Messwerte vor. Die Differenz zwischen Theorie (Freifeld) und Realität (Diffusfeld) ist dennoch sehr gut erkennbar. In realen Räumen nimmt der Schallpegel deutlich weniger ab als im Freifeld (im Freien oder im reflexionsarmen „schalltoten“ Schallmessraum).

Mit der häufig im Internet zu findenden Darstellung entsprechend der unteren grauen Kurve wird den Käufern der Geräte suggeriert, auch bei voller Leistung sei ab etwa 3 m Abstand von der Raumluft-Filteranlage „die Welt wieder in Ordnung“. Tatsächlich ist das hier betrachtete Gerät dort aber noch um 7 dB zu laut. Auch sitzen die Schüler teilweise weniger als 1 m vom Gerät entfernt, denn die Geräte werden im Klassenraum nicht unter akustischen Aspekten aufgestellt, sondern dort, wo noch Platz ist.

Die Tabelle 3 (siehe folgende Seite) gibt eine Übersicht über die in den verschiedenen Schulen bzw. Räumen – teilweise bei unterschiedlichen Betriebszuständen – aufgenommenen Schallpegelmesswerte. Die zugehörigen Volumenströme entstammen Herstellerangaben und/oder Anzeigen am Lüftungsgerät. Auch die Messwerte für 5 m Abstand und die Differenz zu 1 m sind für die entsprechenden Messungen aufgeführt. Alle Messwerte sind auf volle dB gerundet. Die farbigen Markierungen kennzeichnen den jeweiligen Betriebszustand, der beim Betreten des Raumes vorgefunden wurde.

Ein Vergleich berechneter und gemessener Werte soll anhand von Klassenraum S3K1 durchgeführt werden. Nach Tabelle 2 entspricht S3K1 ziemlich genau dem modellhaft vorgegebenen Raum in Tabelle 1 mit einem Volumen von 200 m^3 und einer Absorptionsfläche von 50 m^2 . Während aus den Modelldaten (für $Q=4$) ein geschätzter Hallradius von 2 m resultiert, wird er in Tabelle 2 (für $Q=2$) zu 0,98 m ermittelt.

Ferner ist nach Gleichung 1 in Tabelle 1 die Pegelabnahme zwischen den Abständen von 1 m und 5 m mit $10,3 \text{ dB} - 4,0 \text{ dB} = 6,3 \text{ dB}$ augenscheinlich doch größer als im Raum S3K1 gemessen (Tabelle 3: 4 dB). Das ist aber nicht etwa durch fehlerhafte Messungen begründet, sondern durch Abweichungen der modellhaften Annahme von den realen Gegebenheiten.

- Die Raumluft-Filteranlage ist keine punktförmige, sondern eine großflächige Schallquelle zumindest für höhere Frequenzen.
- Die maßgeblichen schallabstrahlenden Öffnungen der Raumluft-Filteranlage befinden sich nicht direkt vor dem Messmikrofon, sondern am Fußboden und (bei dem hier betrachteten Gerät) in etwa 2 m Höhe.

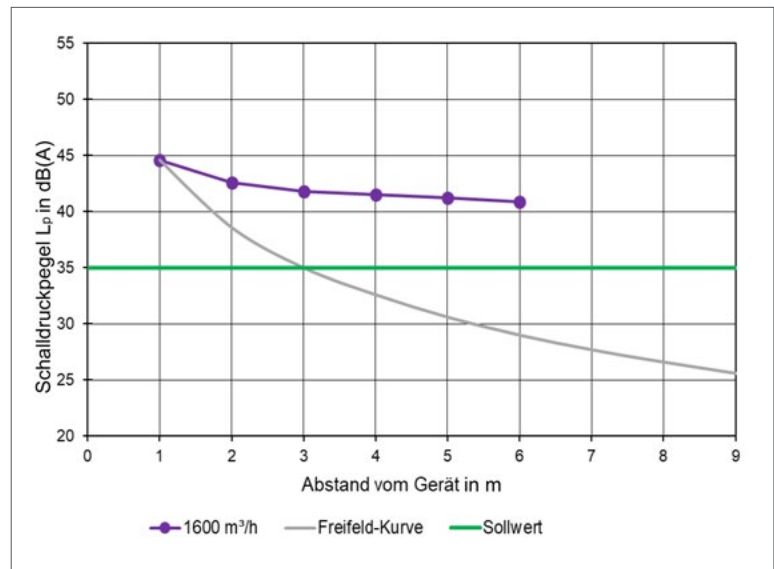


Abb. 7: Abstandsabhängige Minderung der A-bewerteten Gesamtschallpegel in einem Klassenraum für die maximale Luftförderleistung im Vergleich zur Schallausbreitung im Freifeld.

Dadurch liegen die ersten Messpunkte noch im Nahfeld des Gerätes, wo die Pegelabnahme deutlich geringer ist als bei einer Punktschallquelle. Zwischen 3 m und 6 m Abstand nimmt der Schalldruckpegel rechnerisch um $10,4 \text{ dB} - 9,4 \text{ dB} = 1,0 \text{ dB}$ ab. Das stimmt wiederum mit der messtechnischen Wirklichkeit nach Abbildung 7 gut überein.

Der Bedienungsanleitung des betreffenden Gerätes ist für den Luftvolumenstrom von etwa $750 \text{ m}^3/\text{h}$ ein Schallleistungspegel von $L_{WA} = 45 \text{ dB(A)}$ zu entnehmen. Mit der obigen Berechnung für den hier vorhandenen Klassenraum ergibt sich, dass der Schalldruckpegel in 3 m Abstand von der Schallquelle um etwa 9 dB und bei größeren Abständen um bis zu 11 dB geringer ist als der Schallleistungspegel. Mit $L_p = 45 \text{ dB(A)} - 9 \text{ dB} = 36 \text{ dB(A)}$ und $L_p = 45 \text{ dB(A)} - 11 \text{ dB} = 34 \text{ dB(A)}$ ist eine gute Übereinstimmung zu den Messwerten nach Abbildung 6, untere Kurve, vorhanden.

Rechnet man die Nachhallzeit nach DIN 18041 (Anhang A3) vom unbesetzten auf den zu 80 % besetzten Zustand um, so erhöht bei Kindern der Primarstufe die äquivalente Schallabsorptionsfläche für den besetzten Zustand um etwa $\Delta A = 5 \text{ m}^2$. Damit errechnet sich für das Fernfeld eine Pegelminderung $L_w - L_p = 11,3 \text{ dB}$. Gegenüber dem in der Tabelle 1 (letzte Zeile, rechte Spalte) errechneten Wert von 10,8 dB ist das Gerät dann also bei größeren Abständen nur um 0,5 dB leiser.

Bei geringen Abständen kann genau der gegenteilige Effekt auftreten, je nach Aufstellung des Gerätes vor einer Wand oder in einer Ecke. In einem Fall konnte ein relativ leichtes (aber dennoch schallstarkes) Gerät von seinem (offenbar auch nur temporären) Auf-

Tab. 3: Übersicht der Schalldruckpegel-Messwerte der untersuchten Räume und Geräte in Abhängigkeit vom Volumenstrom.

Raum	ca. Volumenstrom in m ³ /h	L _{p,1m} in dB(A)	L _{p,5m} in dB(A)	L _{p,1m} - L _{p,5m} in dB
S1 K1	Stufe 1	32		
S1 K1	Stufe 2	42		
S1 K1	Turbo 600	56	49	7
S1 K2	300	43		
S1 K2	450	49		
S1 K2	590	52		
S1 K2	740	56	47	9**
S2 K1	200	24		
S2 K1	400	33		
S2 K1	600*	45		
S2 K1	800	53		
S2 K1	1.000	55		
S2 K1	1.200	57	53	4
S2 K2	200	26		
S2 K2	400	37		
S2 K2	600*	47		
S2 K2	800	54		
S2 K2	1.000	55		
S2 K2	1.200	57	51	6
S2 P1	Automatik***	45	40	5
S2 P2	Automatik***	45	39	6
S3 K1	750	37	33	4
S3 K1	1.200	45	41	4
S4 K1	800	39		
S4 K1	1.200	46	42	4
S5 K1	470	40		
S5 K1	1.150	57	51	6
S5 K2	1.150	60	54	6

* Die Einstellung auf „Stufe 3“ ist vom Schulträger vorgegeben und wurde offenbar strikt befolgt. Anders sind die im Vergleich zu den anderen Messorten hohen Werte nicht zu erklären.

** Die hohe Pegeldifferenz bei dem Gerät S1 K2 von 9 dB ist durch die Aufstellung des Gerätes in einer Nische und den dadurch höheren Richtungsfaktor erklärbar. Die Freifeld-Pegelabnahme nach Abbildung 7, graue Kurve, von 13 dB in 5 m Abstand wird nirgends erreicht.

*** Viele der messtechnisch untersuchten Gerätetypen bieten auch eine „Automatik-Stufe“ an. Keiner der vorgelegten Bedienungsanleitungen war aber zu entnehmen, mit welcher Regelgröße diese Automaten gesteuert werden (sollen). CO₂-Gehalt, Luftfeuchte und Raumtemperatur lassen zwar in Grenzen auf die Belegung des Raumes schließen, werden aber alle nicht durch die Filterung beeinflusst. Empfundener wird die Einstellung als eine weitere niedrige Betriebsstufe.

stellungsort mittig vor einer Klassenraum-Stirnwand in eine freie Raumecke verschoben werden.

In der Nähe der Raumluftfilteranlage ist die durch den hier vorliegenden Richtungsfaktor $Q=8$ bedingte Pegelanhebung zu erkennen. Weil die Schallaustrittsöffnungen an der Ansaug- und Ausblasseite ungleichmäßig verteilt sind, ist die Anhebung etwas kleiner als der theoretisch zu erwartende Wert von 3 dB. Da sich mit einer veränderten Aufstellung aber der in den Raum abgestrahlte Schalleistungspegel des Gerätes nicht ändert, ist der Schalldruckpegel bei größeren Abständen (im Rahmen der Messgenauigkeit) identisch (siehe Abb. 8). Für die in der Nähe der Anlage sitzenden Kinder ist die Eck-Aufstellung also akustisch noch ungünstiger als die Position mittig vor der Wand.

Daraufhin könnte einem die Idee kommen, die Raumluftfilteranlage mittig im Klassenraum aufzustellen. Dann befindet sich nur noch eine reflektierende Ebene unter dem Gerät, der Richtungsfaktor sinkt auf $Q=2$ und der Schallpegel im Nahbereich sollte um (etwa) 3 dB abnehmen. Das wäre aber mit dem Nachteil verbunden, dass die Schüler an allen vier Seiten nahe am Gerät sitzen und somit noch mehr ungünstige Plätze im Raum vorhanden sind. Hinzu käme noch die Stolpergefahr über Anschlusskabel.

Sprachverständlichkeit

In Bezug auf den Unterrichtserfolg ist die Veränderung der Sprachverständlichkeit unter Einwirkung der dauerhaften Störgeräusche besonders von Interesse. Deshalb wurde bei den beiden Betriebsstufen der Sprachübertragungsindex ($STI = \text{Speech Transmission Index}$ [17]) sowohl ohne als auch mit Störgeräuschen in der Ausbreitungsrichtung vom Lehrerstandort mittig vor der Tafel nach hinten in der Nähe der Raumluft-Filteranlage gemessen. Um in verschiedenen Schulen und verschiedenen Klassenräumen dennoch vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, erfolgten die Messungen jeweils auf einer geraden Ausbreitungslinie. Sie ist in

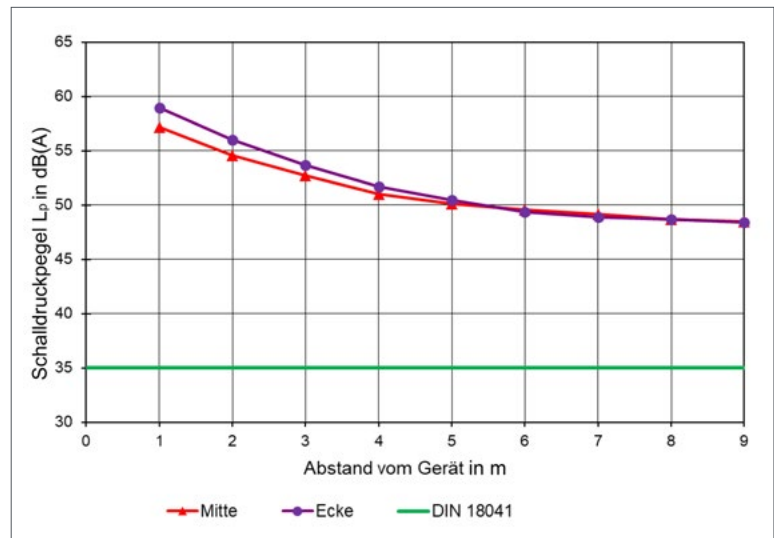
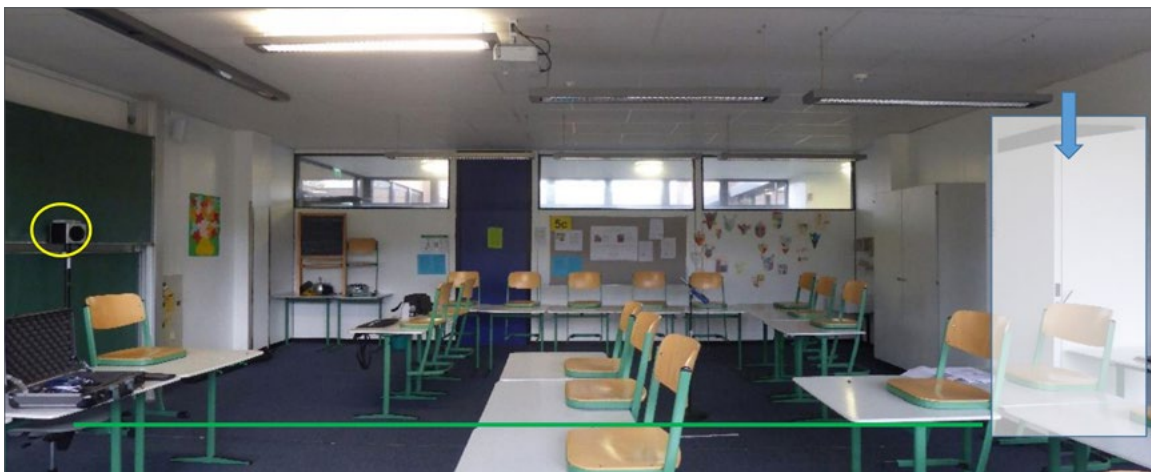


Abb. 8: Pegelanhebung im Nahbereich bei Aufstellung der Anlage in einer Raumecke im Vergleich zur Aufstellung mittig vor einer Wand.

dem Foto (Abb. 9) markiert. Im gelben Kreis befindet sich der Messlautsprecher (die Lehrer-Nachbildung), der senkrechte Pfeil weist auf die Raumluft-Filteranlage hin, die grüne Linie zeigt den Messpfad. Ohne die Geräuscheinwirkungen der Raumluftfilteranlage ist der STI nach Abbildung 10 auch über große Entfernungen sehr gut und sinkt auch bei 7 m Abstand nur knapp unter $STI=0,75$ ab. Geringfügig schlechter wird die Situation mit den Geräuschen der Filteranlage. Bei der (gedrosselten) Betriebsstufe mit $750 \text{ m}^3/\text{h}$ mit einem Schalldruckpegel im Raum um etwa 35 dB(A) wirkt sich die Raumluftfilteranlage nur in den großen Abständen vom Lehrerstandort aus. Dort ist der Sprachpegel des Lehrers am geringsten und die Geräuscheinwirkung der Luftfilteranlage am höchsten. $STI=0,75$ wird ab etwa 4,5 m moderat unterschritten. Daraus ergibt sich der interessante Hinweis, dass die Vorgabe von $L_{NA,Bau} \leq 35 \text{ dB(A)}$ in der Raumakustik-Norm DIN 18041 offenbar sachgerecht ist.

Abb. 9: Geradliniger Messpfad von vorne nach hinten im Raum S3K1.



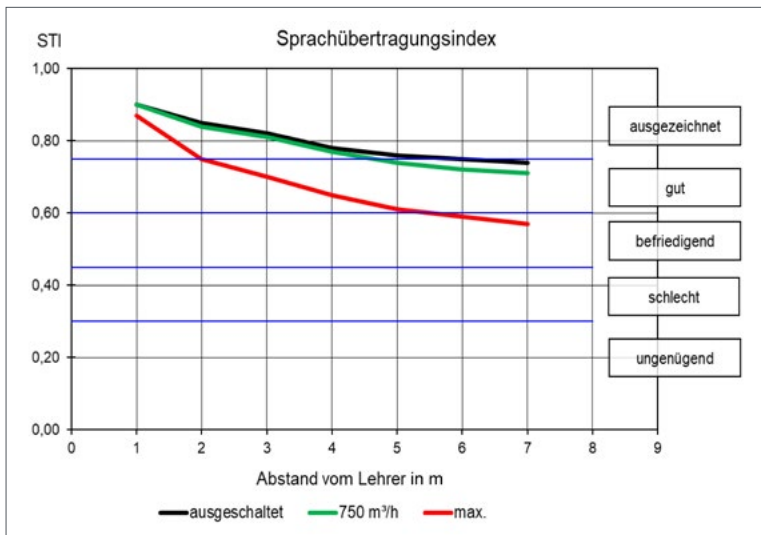


Abb. 10: Sprachübertragungsindex ohne und mit Geräuschen der Raumluftfilteranlage des Raumes S3K1 in niedriger und maximaler Stufe.

Bei Schallpegeln der Raumluftfilteranlage zwischen 41 dB(A) vorne in Lehrernähe und 44 dB(A) hinten in der Nähe des Gerätes wird die Situation deutlich schlechter. Bereits in 1 m Abstand ist die Veränderung von 0,90 auf 0,87 nachweisbar, welche mit zunehmendem Abstand vom Lehrer aber geringerem Abstand zum Lüftungsgerät deutlich anwächst. In 7 m Abstand wird statt STI = 0,74 nur noch 0,57 erreicht. Insbesondere beim Fremdsprachenunterricht, sowie für Kinder mit Deutsch als Zweitsprache oder mit Hörschädigung sind solche Störgeräusche und die damit verbundenen Verschlechterungen der Sprachverständlichkeit nicht akzeptabel und gefährden erheblich den Unterrichtserfolg. Dabei ist die hohe Betriebsstufe dieses Gerätes noch nicht einmal ausreichend, die angestrebte sechsfache Luftumwälzung sicherzustellen.

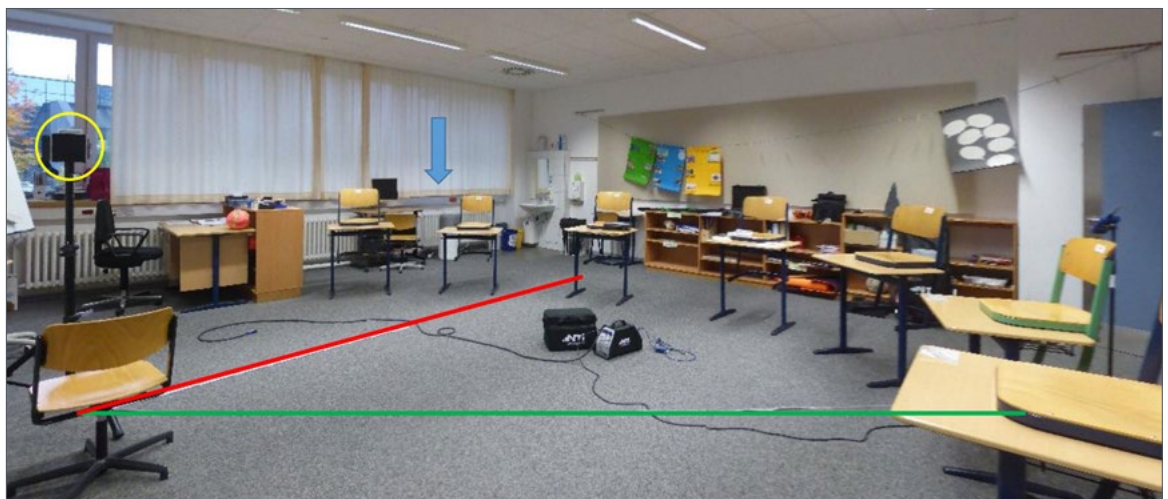
In einer anderen Schule (S1K1) stehen mehrere kleine Raumluftfilteranlagen mit maximalen Volu-

menströmen von jeweils 600 m³/h im Raum verteilt. Dadurch befinden sie sich näher an den Schülerplätzen und wirken sich noch stärker auf die Sprachverständlichkeit aus. Ohne die Geräuscheinwirkungen der Luftfilteranlagen ist der STI auch hier hervorragend und sinkt bis hinten nicht unter 0,75 ab. Das ist bei der ausgesprochen günstigen Nachhallzeitsituation in dieser Förderschuleinrichtung für Kinder mit Hörschädigung ($T_m = 0,39$ s, $A = 73$ m²) auch nicht anders zu erwarten.

Deutlich schlechter wird die Situation aber sofort, wenn die Geräusche der Raumluftfilteranlagen hinzukommen. Die Messungen wurden bei der höchsten Betriebsstufe ausgeführt, weil diese für eine sachgerechte Luftumwälzung erforderlich ist (zwei Geräte je 600 m³/h). Bei den Messungen war aber nur eine der beiden Anlagen in Betrieb, damit die Messsituation übersichtlich blieb. Im tatsächlichen Betriebsfall sind die Werte also noch ungünstiger als hier gemessen. Sie sinken bereits mit nur einem Gerät unter STI = 0,45 ab (teilweise deutlich), fallen also für Guthörende in die Kategorie „schlecht“ und sind demnach für die dortigen Kinder mit Hörschädigung völlig inakzeptabel! Der rot markierte Messpfad führt in Richtung zu den Sitzplätzen in der Nähe der Raumluftfilteranlage, der grün markierte schräg davon weg zur Tür. Der Messlautsprecher strahlte geradeaus von der Tafel nach hinten (siehe Abb. 11).

Das hier aufgestellte Gerät hat am Ausblasgitter scharfe Kanten, an denen die Zisch-Geräusche entstehen, auf die bereits im Zusammenhang mit der Abbildung 2 hingewiesen wurde. Während bei der Situation nach Abbildung 9 mit einem mehr niederfrequenten Rauschen „nur“ eine Verschlechterung auf STI = 0,57 gemessen wurde, verringert sich der Sprachübertragungsindex durch die starken Zisch-Geräusche nach Abbildung 12 bis herab auf STI = 0,34.

Abb. 11: Geradlinige Messpfade im Raum S1K1 in Richtung zur Raumluftfilteranlage (rot) und davon abgewandt zur Türe (grün); der Messlautsprecher (gelber Kreis) strahlt zur Klassenraumrückwand



In diesem Raum konnte auch mit Bezug auf die Sitzplätze gemessen werden. Weil die sieben Sitzplätze im Halbkreis aufgestellt sind, bestand eine sehr übersichtliche Situation. In Abbildung 11 ist auch gut zu erkennen, dass die Luftfilteranlage in der Nähe der Sitzplätze 1 und 2 steht. Entsprechend ist dort nach Abbildung 12 beim Einschalten dieser Anlage der STI am schlechtesten. Abbildung 13 zeigt den STI für die konkreten Sitzpositionen der Kinder.

Wie vorgehen?

Wenn der in verschiedenen Regelwerken genannte und hier auch durch die STI-Messungen belegte Grenzwert für die maximal zulässigen Störgeräusche im Unterricht mit einem Schalldruckpegel von $L_p = 35 \text{ dB(A)}$ eingehalten werden soll, so muss man den Herstellern der Raumluftfilteranlagen Vorgaben machen, welchen Schallleistungspegel L_w sie für die Soll-Betriebsstufe von etwa $800 \text{ m}^3/\text{h}$ (bzw. nach alter Lesart $1.200 \text{ m}^3/\text{h}$) nachzuweisen haben. Für die Umrechnung auf einen Schalldruckpegel L_p in etwa Raummitte sind das Volumen V und die Nachhallzeit T des jeweiligen Klassenraumes die maßgeblichen Kenngrößen. Um nicht in jedem Fall neu messen und rechnen zu müssen, wird im Folgenden eine Abschätzung versucht. Dazu wurden die Nachhallzeiten und Volumina von etwa 160 in den letzten drei Jahren gemessenen Klassenräumen statistisch ausgewertet (siehe Abb. 14).

Der große Abstand zahlreicher Messwerte von der oberen Toleranzbereichsgrenze der Norm-Vorgabe zeigt die Möglichkeiten auf, durch raumakustische Maßnahmen zur Lärminderung in Klassenräumen beizutragen. Diese Vorgehensweise zur Lärminderung in Schulen wird nach wie vor viel zu wenig genutzt! Würde man die ca. 1,3 Mrd. €, welche Bund und Länder für die Beschaffung der Filteranlagen bereitstellen, für – weit nachhaltigere – raumakustische Verbesserungen verwenden (und den etwa gleich hohen Anteil der Schulen ebenfalls), dann könnte man damit gut 400.000 Klassenräume akustisch sanieren. Über alle sechs Oktaven gemittelt errechnet sich eine mittlere Nachhallzeit von $T_m = 0,76 \text{ s}$ ($\pm 0,23 \text{ s}$). Das mittlere Klassenraumvolumen ergab sich zu $V_m = 205 \text{ m}^3$ ($\pm 26 \text{ m}^3$). Die mittlere äquivalente Schallabsorptionsfläche liegt demnach bei etwa $A_m = 43 \text{ m}^2$. Ähnlich wie in Tabelle 1 für $A = 50 \text{ m}^2$ errechnet, liegt also die Differenz bei etwa $L_w - L_p = 10 \text{ dB}$. Danach wäre also zunächst ein Schallleistungspegel bis $L_w = 45 \text{ dB(A)}$ zulässig. Weiterhin sind aber mehrere Dinge wie folgt zu beachten:

- Nicht alle Schüler sitzen in Raummitte oder weiter entfernt. Nach den Beobachtungen anlässlich der Messungen sind Abstände von 1 m keine Seltenheit und werden bisweilen sogar noch unter-

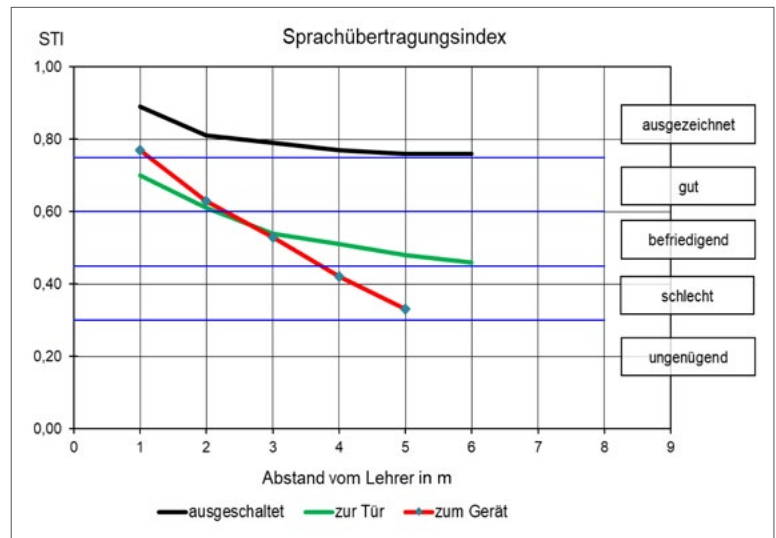
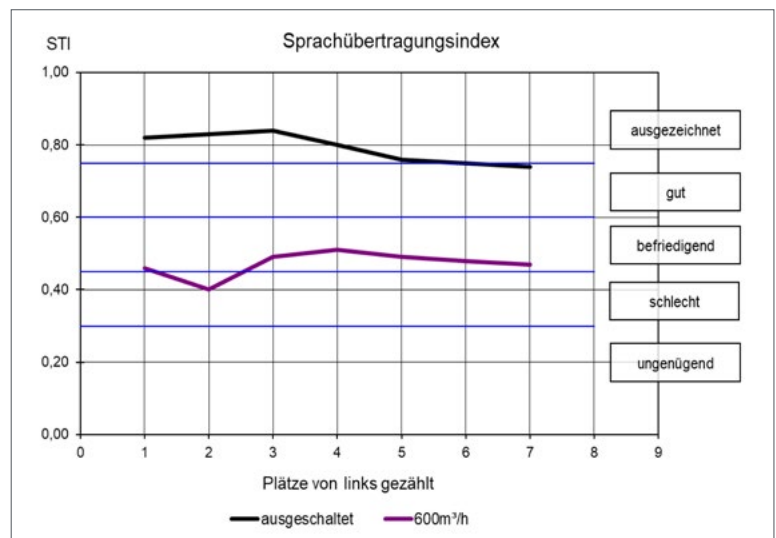


Abb. 12: Sprachübertragungsindex im Raum S1K1 ohne und mit Geräuschen der Raumluftfilteranlage in beiden linearen Messrichtungen.

sritten. Nach den messtechnisch ermittelten Schallausbreitungskurven benötigt man mindestens ein Vorhaltemaß von 2 dB.

- Bisher wurde nur mit Mittelwerten gerechnet. Bei der Hälfte aller Klassenräume liegt aber eine (teilweise deutlich) ungünstigere Situation vor. Wenn zur Sicherheit von $(205 - 26) \text{ m}^3$ und $(0,76 + 0,23) \text{ s}$ ausgegangen wird, so ergibt sich daraus ein $A = 29 \text{ m}^2$ und damit nur knapp ein $L_w - L_p = 9 \text{ dB}$.
- Die Berechnung gilt für die Aufstellung auf einer Ebene. Bei Aufstellung vor einer Wand ($Q=4$) ist das Gerät im Nahbereich rechnerisch um 3 dB lauter, bei Aufstellung in einer Ecke ($Q=8$) sogar um 6 dB. In der Realität wurden Anhebungen bis 4 dB beobachtet. Sogar Schränke neben den Geräten wirkten sich mit Pegelanhebungen aus.

Abb. 13: Sprachübertragungsindex ohne und mit Geräuschen der Raumluftfilteranlage an den einzelnen Sitzplätzen im Raum S1K1.



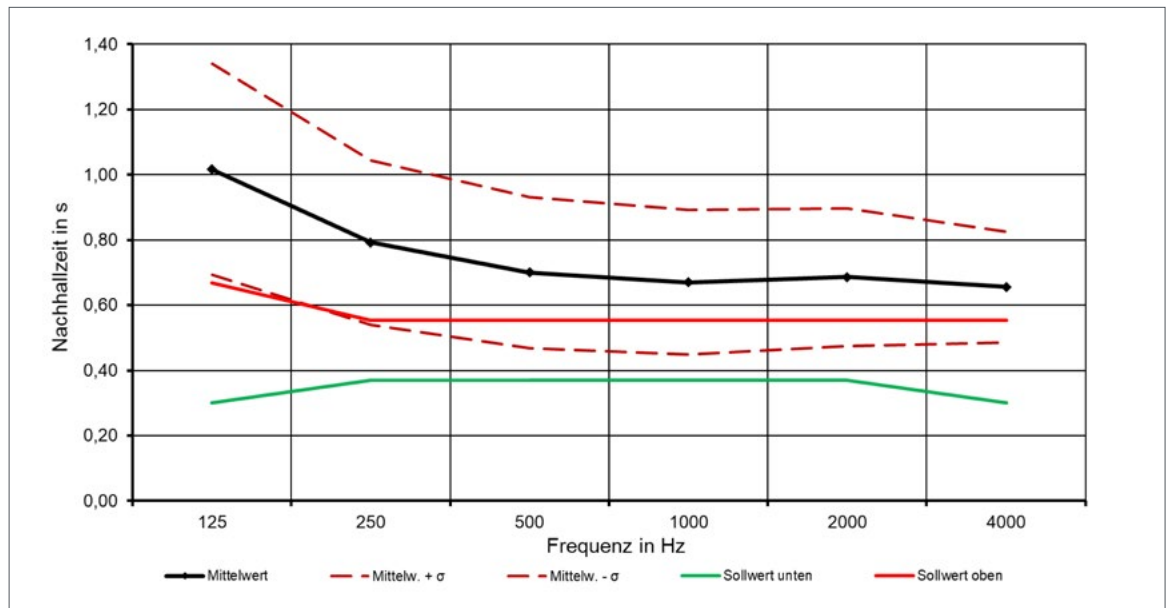


Abb. 14: Mittlere Nachhallzeiten und Standardabweichungen von etwa 160 Klassenräumen sowie Toleranzbereich nach DIN 18041 für die Raumgruppe A4.

In der Summe ist also – wenn die meisten vorkommenden Fälle berücksichtigt werden – für die Soll-Betriebsstufe (4-fach oder 6-fach) ein maximaler Schallleistungspegel der Raumluftfilteranlagen von $L_w \approx 40$ dB(A) zuzulassen, allenfalls von $L_{w,max} = 42$ dB(A).

Bisher hat die Industrie nur wenige offizielle Laborprüfzeugnisse vorgelegt. Die meisten Hersteller geben Schalldruckpegel in 1 m Abstand an, jedoch ohne Angabe von Messbedingungen und Messgeräten. Unter Ansatz der in der Lüftungsplanung üblichen Annahme der Raumdämpfung $L_p = L_w - 8$ dB wurden die Schallleistungspegel dieser Geräte hochgerechnet.

Eine weitere Unsicherheit besteht in den Angaben zum geförderten Volumenstrom. Hier erscheinen einige Katalogangaben in Relation zu den Schallpegeln „vielversprechend“. Mangels einer Möglichkeit, die Volumenströme vor Ort zu messen, muss diesen Werten geglaubt werden. Die bisher vorliegenden Herstellerangaben und die aus den eigenen Messungen ermittelten Schallleistungspegel sind, getrennt nach „großen und kleinen“ Geräten (höher oder niedriger als 1 m) in Abbildung 15 den zugehörigen Volumenstromangaben gegenübergestellt.

Möglicherweise würden die Werte bei realen Volumenstromangaben und genauer Kenntnis der jeweiligen Messbedingungen näher zusammenrücken. Bereits jetzt ist aber erkennbar, dass es schwer werden wird, ein Gerät zu finden, welches selbst bei dem zwischenzeitlich reduzierten Wert von nur 800 m³/h einen Schallleistungspegel von $L_w = 40$ dB(A) oder auch nur 42 dB(A) einhalten kann. Bei den ursprünglich für notwendig erachteten 1.200 m³/h können auch die namhaften Hersteller von Lüftungs-

anlagen weder die eine noch die andere Anforderung erfüllen.

Fazit

- Bei Einhaltung der bei den Schüler:innen akzeptablen Schalldruckpegel filtern die überprüften Umluftanlagen nicht 1.200 m³/h, was bei einer eher vorsichtigen Abschätzung in 200 m³ großen Klassenräumen und einem sechsfachen Luftwechsel erforderlich wäre.
- Bei der Soll-Luftmenge von 1.200 m³/h betragen die Störschalldruckpegel (teilweise deutlich) über 45 dB(A). Dann verschlechtert sich der STI in nicht mehr akzeptabler Größenordnung. Dadurch ist insbesondere beim Fremdsprachenunterricht, sowie für Kinder mit Deutsch als Zweitsprache oder mit Hörschädigung der Unterrichtserfolg erheblich gefährdet.
- Unterhalb von etwa 700 m³/h kann unter günstigen räumlichen Situationen und gerätetechnischen Bedingungen ab etwa 3 m Abstand von den Anlagen der für einen sachgerechten Unterricht maximal zulässige bauseitige Störschalldruckpegel von $L_{NA,Bau} = 35$ dB(A) gerade eingehalten werden. In diesem Zustand ist die Verschlechterung des Sprachübertragungsindex STI gering und akzeptabel.
- Die Schallbelastung kann vielfach nur bei reduziertem Volumenstrom der Anlagen in den zulässigen Grenzen gehalten werden. Daraus ergibt sich die Konsequenz, dass auf ein regelmäßiges Lüften nicht verzichtet werden kann.
- Die größeren Bauformen der Geräte (mit langsamer laufenden Lüfterschaukeln und Platz für

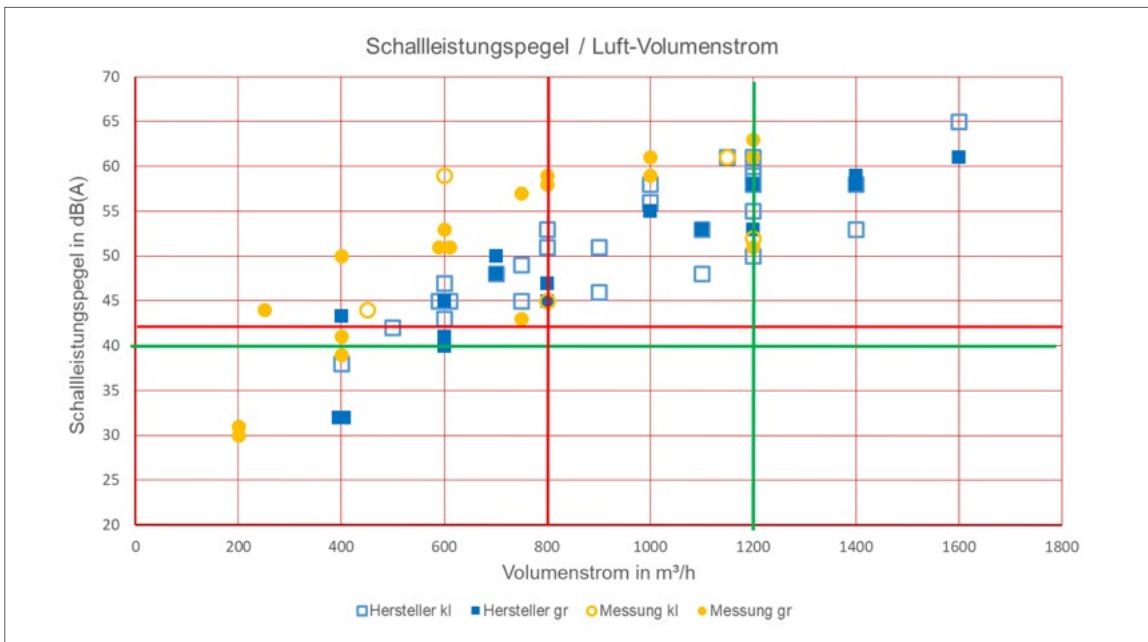


Abb. 15: Schallleistungspegel großer und kleiner Geräte in Abhängigkeit vom geförderten Volumenstrom, Herstellerangaben.

Schalldämpfer) sind akustisch günstiger als kleine derselben Baureihe. Auch die Gestaltung der Luftauslassgitter wirkt sich aus.

Literatur

- [1] Kähler, C.J.; Fuchs, T.; Hain, R.: Können mobile Raumluftreiniger eine indirekte SARS-CoV-2 Infektionsgefahr durch Aerosole wirksam reduzieren? Universität Bundeswehr München, Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik, 2020-08. <https://www.unibw.de/lrt7/raumlufreiniger.pdf>
- [2] Szabadi, J.; Meyer, J.; Dittler, A.: Untersuchung der Minderung der Partikelkonzentration in geschlossenen Innenräumen durch einen hoch wirksamen Innenraumfilter. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik; 2020-10. https://www.researchgate.net/publication/344607373_Untersuchung_der_Minderung_der_Partikelkonzentration_in_geschlossenen_Innenraumen_durch_einen_hoch_wirksamen_Innenraumfilter/link/Sf840bc0a6fdccfd7bSaa351/download
- [3] Ruhe, C.: Zu laute Luftfilteranlagen. Spektrum Hören 2021-6, S.5-7.
- [4] Umweltbundesamt (UBA): Lüftungen, Lüftungsanlagen und mobile Luftreiniger an Schulen. 2021-09. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/lueftung-lueftungsanlagen-mobile-luftreiniger-an>
- [5] VDI-EE 4300-14:2021-09: Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Anforderungen an mobile Luftreiniger zur Reduktion der aerosolgebundenen Übertragung von Infektionskrankheiten.
- [6] VDI: Anforderungen an mobile Luftreiniger. 2022-01. <https://www.vdi.de/news/detail/anforderungen-an-mobile-luftreiniger>
- [7] VDI: Informationen zum Einsatz von mobilen Luftreinigern. Auszüge aus der Expertenempfehlung VDI-EE 4300 Blatt 14, 2021-10. https://www.vdi.de/fileadmin/pages/mein_vdi/redakteure/publikationen/Informationen_zum_Einsatz_von_mobilen_Luftreinigern.pdf
- [8] Setzer, M.J.: Online-Buch Schall, Menüpunkt Raumakustik. <https://www.uni-due.de/ibpm/BauPhy/Schall/indexschall.htm>
- [9] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Bekanntmachung der Richtlinie für die Bundesförderung Corona-gerechte Um- und Aufrüstung von raumluftechnischen Anlagen in öffentlichen Gebäuden und Versammlungsstätten. 2020-10. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/richtlinie-bundesfoerderung-corona-gerechte-um-und-aufruestung-von-raumluftechnischen-anlagen.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- [10] DIN 4109 – 1: Schallschutz im Hochbau. 2018-01.
- [11] DIN 18041: Hörsamkeit in Räumen. 2016-03
- [12] VDI 2081-1:2019-03 Raumluftechnik – Geräuscherzeugung und Lärminderung. 2019-03.
- [13] Bundesanstalt für Arbeitsschutz: Technische Regeln für Arbeitsstätten – ASR A3.7 „Lärm“. 2018-05.
- [14] Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Schule und Berufsbildung (BSB): Handreichung „Mobile Luftreinigungsgeräte für die Unterrichtsräume“. 2021-08.
- [15] BayMBl. 2021 Nr. 712: Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen zur Verbesserung des Infektionsschutzes für die Betreuung von Kindern unter 12 Jahren in Schulen sowie in der Kindertagesbetreuung und in den Heilpädagogischen Tagesstätten der Jugend- und Behindertenhilfe. 2021. <https://www.verkuendung-bayern.de/baymbl/2021-712/>
- [16] Stergiaropoulos, K. et al.: Pilotprojekt: Experimentelle Untersuchung zum Infektionsrisiko in Klassenräumen in Stuttgarter Schulen. Universität Stuttgart, Institut für Gebäudetechnik, Thermotechnik und Energiespeicherung. 2021-07. https://www.stuttgart.de/service/aktuelle-meldungen/juli-2021/studie-mobile-luftreiniger-sind-keine-universalloesung-im-unterricht-stadt-plant-anschaffung-nur-fuer-schlecht-belueftbare-unterrichtsraeume.php.media/229720/2021-07-06_Abschlussbericht_Pilotprojekt_Luftreiniger_Klassenraum_Stuttgart_Finale-Version_06.07.2021.pdf
- [17] Niedersachsen.Klar: Arbeitsschutz und Gesundheitsmanagement in Schulen und Studienseminare. Sprachverständlichkeit. 2018-06. <http://www.aug-nds.de/?id=262>



Dipl.-Ing. Carsten Ruhe
hörgerrecht planen und bauen, Prisdorf