

Luftreinigungsgeräte – akustische Anforderungen und Optimierungsmöglichkeiten

Daniel Beer¹, Paul Fritzsche¹, Bernhard Fiedler¹, Jens Rohlfing², Karlheinz Bay², Jan Troge³, Jonathan Millitzer⁴, Christoph Tamm⁴

¹ Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie IDMT, 98693 Ilmenau

² Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 70569 Stuttgart

³ Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, 09126 Chemnitz

⁴ Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, 64289 Darmstadt

E-Mail: daniel.beer@idmt.fraunhofer.de

Einleitung

Die Covid-19-Pandemie beeinflusst das allgemeine Leben in Deutschland seit zwei Jahren. Intensiv wird deshalb nach Maßnahmen gesucht, um das reguläre Leben, bspw. in Schule und Beruf, aufrechtzuerhalten. Eine Maßnahme besteht darin, dass die Raumluft durch sogenannte Luftreinigungsgeräte permanent gefiltert wird, um die Virenlast geeignet zu reduzieren. Der Markt verzeichnet eine erheblich gestiegene Nachfrage bzgl. Luftreinigungsgeräten. Wohn- und Geschäftshäuser, Schulen oder Kindergärten sollen zunehmend damit ausgestattet werden. Damit durch den Einsatz von Luftreinigungsgeräten tatsächlich das reguläre Leben ermöglicht wird, haben diese technische Anforderungen zu erfüllen. Diese betreffen nicht nur das zu filternde Luftvolumen, sondern u. a. auch das verursachte Betriebsgeräusch. Sollte der emittierte Schallpegel zu hoch sein, kann dies zu Kommunikations- und Konzentrationsschwierigkeiten führen. Entsprechend verlangen viele öffentliche Ausschreibungen, dass Luftreinigungsgeräte nicht nur ein Mindestvolumen an Raumluft filtern, sondern dass bestimmte Schallpegelgrenzen eingehalten werden. Hersteller von Luftreinigungsgeräten stehen somit vor der Herausforderung, dass ihre Produkte auch akustisch optimiert sein müssen, um wettbewerbsfähig zu sein.

Dieser Problematik hat sich das Fraunhofer-Forschungsprojekt »ReinluftAkustik« gewidmet [1]. Gemeinsam mit einem Beirat aus Geräteherstellern bzw. Teilezulieferern des Mittelstandes haben vier Fraunhofer-Institute ein Kompetenz-Cluster gebildet, um die grundlegenden Ursachen der Betriebsgeräuschentstehung und Ansätzen zur Reduzierung des damit verbundenen Schallpegels aufzuzeigen.

Akustische Anforderungen als auch Lärmpegel aktueller Geräte

Zur Veranschaulichung der schalltechnischen Anforderungen für Luftreinigungsgeräte und der Beeinflussung dieser durch die Akustik des jeweiligen Raumes, in dem sie betrieben werden, wurde das Anwendungsszenario eines Klassenraumes gewählt. Gemäß der Expertenempfehlung für Luftreinigungsgeräte in VDI-EE 4300 [2] bzw. den jeweiligen Landesregelungen zur Förderung von Luftreinigungsgeräten in Schulen darf durch den Gerätebetrieb im Klassenraum ein Schalldruckpegel von 35 dB(A) nicht überschritten werden. Gleichzeitig ist eine stündliche Reinlufrate von mindestens dem vierfachen Raumvolumen gefordert. Da der erzeugte Schalldruckpegel mit der Raumakustik variiert, ist es notwendig, dass der Hersteller stattdessen die Schallleistung für

seine Geräte angibt. Nach [2] ist diese dann – unter Berücksichtigung der Raumakustik – in einen entsprechenden Schalldruckpegel nach VDI 2081 Blatt 1 umzurechnen [3].

Bei einem frei im Klassenraum aufgestellten Luftreinigungsgerät ergibt sich, für ein Raumvolumen von 200 m³ und eine mittlere Nachhallzeit von 0,5 s, im Abstand von 2 m, ein Korrekturfaktor zwischen Schallleistung und Schalldruck von ca. 10 dB. Unter der Vorgabe eines zulässigen Schalldruckpegels im Raum von 35 dB(A) folgt daraus, dass der Schallleistungspegel maximal 45 dB(A) betragen darf. Der stündliche Volumenaustausch muss dabei mindestens 800 m³ betragen. In Abbildung 1 sind unterschiedliche Luftreinigungsgeräte hinsichtlich ihrer Schallleistung und ihres Volumenstroms als Punktwolke aufgeführt. Die grüne Fläche kennzeichnet den Bereich, in dem der Schallleistungspegel und der Volumenstrom eines Einzelgerätes liegen muss, damit es die Anforderungen für das Klassenraumbeispiel erfüllt. Es zeigt sich, dass kaum ein Gerät im Einzelbetrieb die Anforderungen für den Klassenraum erfüllt. Wie sich die Situation ändert, wenn zwei Geräte gleichzeitig zum Einsatz kommen, kennzeichnet die blaue Fläche. Der Volumenstrom des Einzelgerätes muss dann nur noch mindestens 400 m³/h betragen. Der Schallleistungspegel des Einzelgerätes darf wegen der Pegelüberlagerung nicht größer als 42 dB(A) sein.

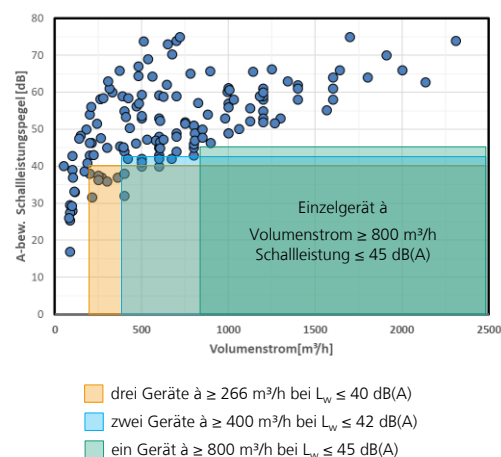


Abbildung 1: Gegenüberstellung der Schallleistungsanforderung der VDI-EE 4300 für einen durchschnittlichen Klassenraum und Schallleistungspegel (L_w) von Luftreinigungsgeräten zusammengestellt aus einer Internetrecherche (2021) und Messdaten in Abhängigkeit des Volumenstroms.

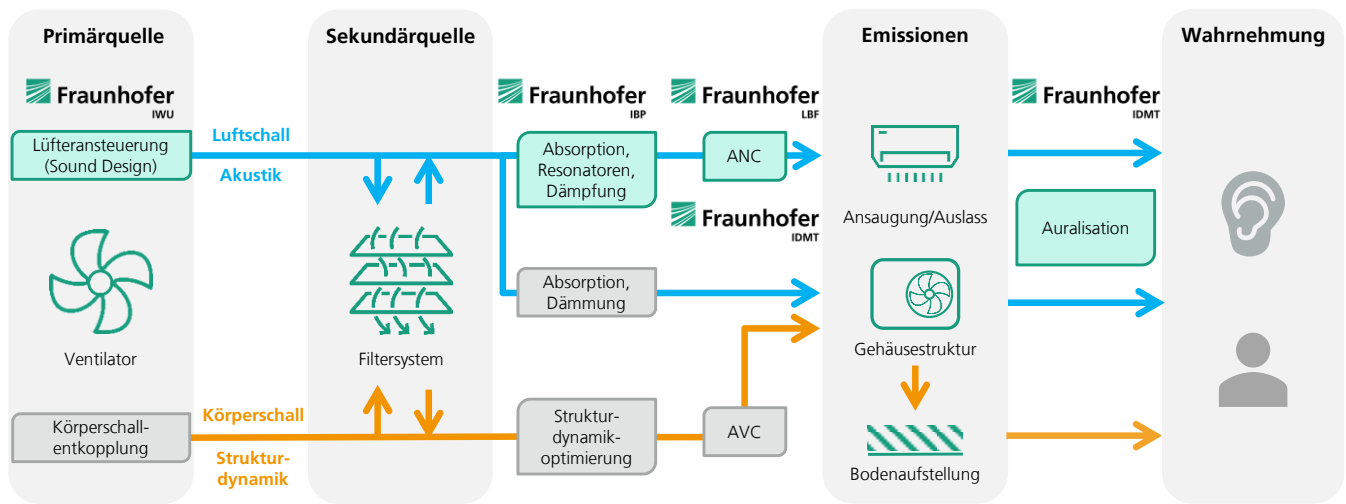


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Schallentstehungsorte und Schallausbreitungspfade bei einem Luftreinigungsgerät sowie Maßnahmen zur Schallreduktion als auch Erfahrbarmachung durch Auralisation.

Abbildung 1 zeigt, dass wenige Geräte geeignet sind, um die Anforderungen im Tandembetrieb zu erfüllen. Die beige Fläche verdeutlicht den Sachverhalt für die gleichzeitige Verwendung von drei Luftreinigungsgeräten. Diese Beispielbetrachtung von aktuellen Luftreinigungsgeräten im Lichte der geltenden Anforderungen verdeutlicht den hohen Bedarf bzgl. einer akustischen Optimierung.

Maßnahmen zur Geräuschreduzierung

Abbildung 2 skizziert beispielhaft die Schallentstehungsorte und Schallausbreitungspfade bei einem Luftreinigungsgerät. Sowohl Luft- als auch Körperschall werden durch den Ventilator erzeugt und in das System eingeleitet. Weitere Schalleinträge können von anderen Bauteilen hinzukommen, bspw. durch Strömungsgeräusche. Abgestrahlt wird der Luftschall über die Luftein- und Luftauslassöffnungen. Der Körperschall wird über die Gehäusestruktur in Luftschall umgesetzt und ggf. auch direkt in den Boden bzw. über eine Aufhängungsvorrichtung direkt in die Raumwand eingekoppelt. In Abbildung 2 sind unterschiedliche Möglichkeiten zur Beeinflussung als auch zur Hörbarmachung (Auralisation) des Betriebsgeräusches aufgeführt. Die grün markierten Maßnahmen werden im Folgenden weiter ausgeführt.

Akustisch optimierte Lüfteransteuerung

Die Hauptschallquelle in Luftreinigungsgeräten ist der Ventilator. Das Schallspektrum eines Ventilators setzt sich aus verschiedenen Frequenzanteilen zusammen, die abhängig von der Drehzahl sind. Der Hauptbeitrag ist der s. g. Drehklang, der durch die periodische Rotation der Ventilatorschaufeln entsteht. Die akustische Anregung des antreibenden Elektromotors, die s. g. elektromagnetischen Geräusche, entstehen durch die dynamischen Kräfte im Luftspalt des Motors. Für die elektronische Kommutierung von den häufig eingesetzten EC-Motoren wird eine hochfrequente Pulsfrequenz genutzt, die oft ebenfalls über den Motor als hörbarer Luftschall abgestrahlt wird. Untersucht wurde deshalb das Potenzial, ob über eine akustisch optimierte Ansteuerung die genannten Motorgeräusche reduzierbar sind. Dafür wurden über die Antriebsregelung eines exemplarischen Ventilators zusätzliche Stromharmonische erzeugt und in den Motor eingespeist, die den dynamischen Kraftanteilen im Luftspalt entgegenwirken und

diese auslöschen. Durch weitere eingespeiste Stromharmonische wurde ein dynamisches Wechselmoment erzeugt, das dem Drehklang entgegenwirkt und diesen reduziert. Abbildung 3 verdeutlicht, dass es auf diese Weise möglich ist, die elektromagnetischen Geräusche des Motors, je nach Betriebspunkt, um bis zu 15 dB abzusenken. Der Drehklang und insbesondere die Schallabstrahlung der Blattdurchgangsfrequenz konnten um ca. 5 dB reduziert werden. Zusätzlich zeigte sich, dass – mit Hilfe einer Randomisierung der Pulsfrequenz in der Motoransteuerung – hochfrequente Schallanteile wesentlich reduzierbar sind. Eine akustisch optimierte Ansteuerung des Ventilators ermöglicht somit, den Schallbeitrag von Luftreinigungsgeräten wesentlich zu reduzieren. Eine derartige Maßnahme kann auch nachträglich in bestehende Geräte implementiert werden.

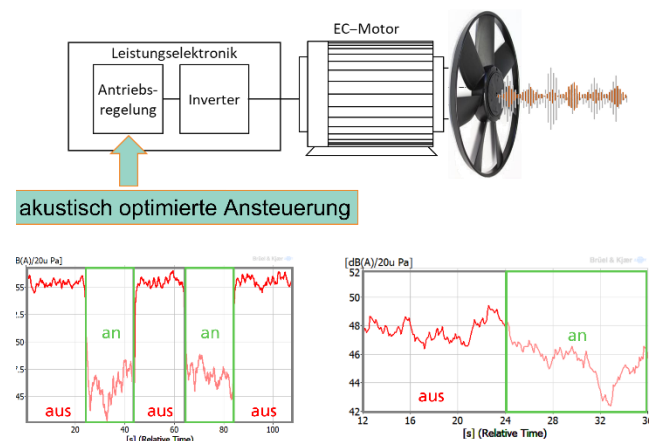


Abbildung 3: Schalldruckpegelreduktion der 24. Motorordnung um > 10 dB (u. l.) und des Drehklangs (7. Ord.) um ca. 5 dB durch aktive Antriebsregelung (u. r.).

Schalldämpfung an Ansaug- und Ausblasöffnungen

An einem Luftreinigungsgerät, dessen Ventilatorgeräusch ungedämpft über die Ansaug- und Ausblasöffnungen abgestrahlt wird, wurden generische Maßnahmen zur Reduzierung der Schallleistung durchgeführt (Abbildung 4).

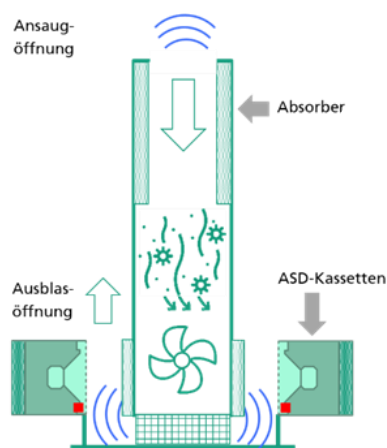


Abbildung 4: Luftreiniger-Demoaufbau, mit porösem Absorber an der Ansaugöffnung und aktiven Schalldämpferkassetten (ASD-Kassetten) an den Ausblasöffnungen.

Beispielgebend wurde das Gehäuse saugseitig mit einem breitbandig wirkenden, porösen Absorber ausgekleidet und ausblasseitig eine aktive Resonatorenkonfiguration (aktiver Schalldämpferkassetten, kurz: ASD-Kassette) eingesetzt. Abgestimmt auf einen bestimmten Wirkfrequenzbereich tragen beide Maßnahmen zur Reduzierung des Schalleistungspegels bei. Anschließend wurde das Luftreinigungsgerät im Hallraum vermessen. In Abbildung 5 ist die erzielte breitbandige Reduktion des Schalleistungspegels dargestellt; sie beträgt etwa 7 dB im Summenpegel. Details dazu sind in [4] aufgeführt.

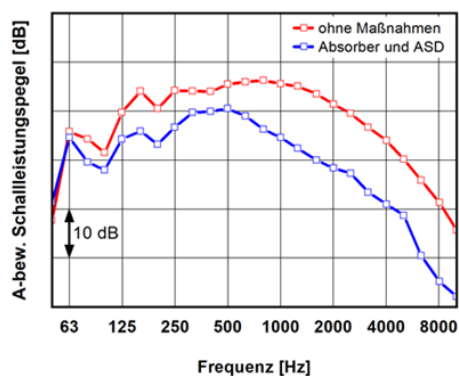


Abbildung 5: Breitbandige Reduktion der Schalleistung durch den Einsatz der Kombination aus porösen Absorbieren und aktiven Schalldämpferkassetten (blau).

Active Noise Control an der Ausblasöffnung

Das Betriebsgeräusch eines Luftreinigungsgerätes kann je nach Betriebsmodus deutlich im Frequenzspektrum variieren. Dementsprechend interessant ist eine Maßnahme, deren Wirkungsbereich sich elektronisch anpassen lässt. Eine Möglichkeit hierfür bietet der Ansatz eines Gegenschallsystems (Active Noise Control, kurz: ANC). Das Ziel ist hierbei, das Störschallfeld mit der Überlagerung eines Gegenschallfeldes zu reduzieren oder auszulöschen. Zu diesem Zweck wurde das Störschallfeld eines Luftreinigungsgerätes in seiner spektralen Zusammensetzung und seiner räumlichen Abstrahlung an der Ausblasöffnung messtechnisch ermittelt.

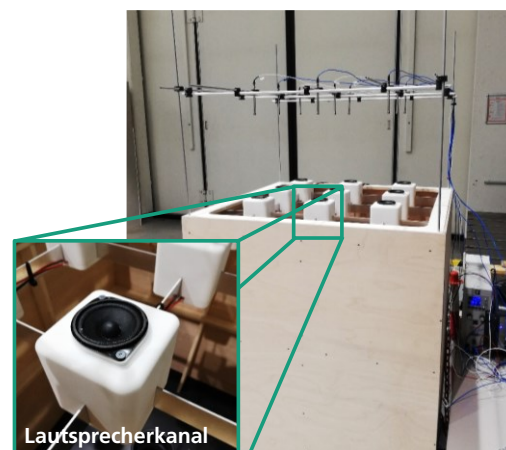


Abbildung 6: ANC-Demonstrator mit neun Gegenschallquellen in der Ausblasöffnung.

Der adressierte Störfrequenzbereich liegt zwischen 100 Hz und 500 Hz. Zur Erzeugung des notwendigen Gegenschallfeldes wurde ein Lautsprecher-Array mit neun Kanälen entworfen, das in der Ausblasöffnung platziert wird und durch seine Geometrie den Volumenstrom möglichst wenig beeinflussen sollte. Der aufgebaute Demonstrator ist in Abbildung 6 zu sehen. Für das Design des einzelnen Lautsprecherkanals wurden unterschiedliche Lautsprecherchassis hinsichtlich ihres Übertragungsverhaltens in einem 0,2 l großen, geschlossenen Gehäuse simulativ und messtechnisch untersucht (Abbildung 7). Entscheidend waren hierbei die Maximierung des erzielten Schalldruckpegels, insbesondere bei 100 Hz, und die gleichzeitige Minimierung nichtlinearer Verzerrungen. Daraus konnte abgeleitet werden, welchen Verstärkungsfaktor der erforderliche Lautsprecherverstärker bieten muss, um das gewünschte Gegenschallfeld erzeugen zu können.

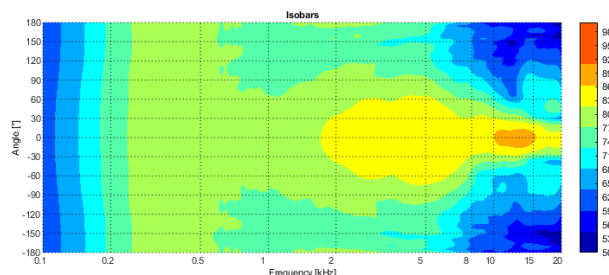


Abbildung 7: Prüfstand zur Vermessung des Abstrahlverhalten des einzelnen Lautsprechers (oben) und Darstellung der Messergebnisse als Isobarendiagramm (unten).

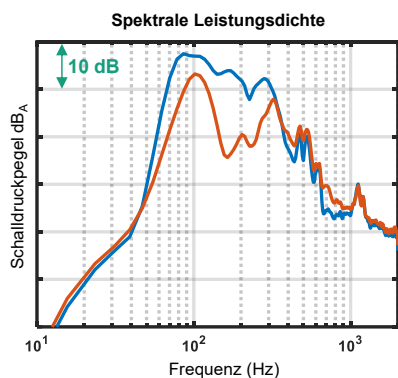


Abbildung 8: Reduktion des Schalldruckpegels an der Ausblasöffnung durch aktivierte Gegenschallquellen (ANC-Ansatz).

Ebenso ist anhand des Isobarendiagramms erkennbar, dass das Rundstrahlverhalten des Lautsprecherkanals im adressierten Wirkungsbereich passend für die Erzeugung des Gegenschallfeldes durch den Array-Verbund ist. Zum Testen unterschiedlicher Anwendungsfälle wurde das Störschallfeld zum einen durch einen im Kanal befindlichen Lautsprecher und zum anderen durch einen eingebauten Lüfter erzeugt. Die Berechnung des Gegenschallfeldes erfolgte mit Hilfe eines adaptiven Reglers. Auf diese Weise konnte eine breitbandige Reduktion zwischen 70 Hz und 300 Hz realisiert werden (Abbildung 8).

Auralisation von Luftreinigungsgeräten

Numerische Schallleistungs- oder Schalldruckpegelangaben sind für Nichtakustiker oft ungeeignet, um die tatsächlich wahrgenommenen akustischen Eigenschaften der Geräte in der Einsatzumgebung zu bewerten. Dabei geht es oft nicht nur um die Lautstärke, sondern auch um Klangunterschiede zwischen den Geräten. Um hier sowohl dem Nutzer als auch dem Hersteller, Planer, Vertrieb ein Werkzeug zur Erfahrbarmachung des Betriebsgeräusches zur Hand zu geben, wurde ein Auralisationstool um Luftreinigungsgeräte erweitert. Dazu wurden die akustischen Messdaten untersuchter Geräte für die interaktive Binauralsynthese mit virtueller Raumakustik aufbereitet. Abbildung 9 zeigt das Online-Tool, das unter [5] aufgerufen werden kann.

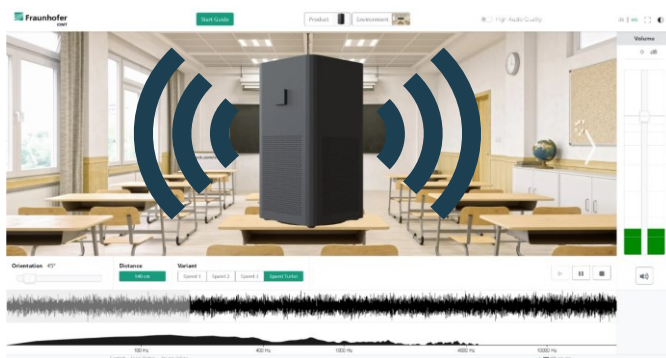


Abbildung 9: Screenshot des Online-Auralisationstools zur Hörbarmachung des Betriebsgeräusches von Luftreinigungsgeräten in unterschiedlichen Räumen.

Zusammenfassung

Die Auswertung der untersuchten Luftreinigungsgeräte zeigt, dass kein Einzelgerät die Richtwerte der VDI-EE 4300 für den Schalldruckpegel und die stündliche Reinlufrate im gewählten Klassenraumszenario erfüllt. Erst beim Einsatz von zwei oder mehr Geräten gleichzeitig wird dies möglich. Daraus kann abgeleitet werden, dass ein Großteil der aktuell verfügbaren Luftreinigungsgeräte mindestens paarweise eingesetzt werden muss, um die Vorgaben öffentlicher Ausschreibungen, die i. d. R. der Expertenempfehlung in VDI-EE 4300 folgen, erfüllen zu können.

Verursacht wird das Betriebsgeräusch vornehmlich durch den Ventilator und von ihm hervorgerufene Strömungsvorgänge. Mithilfe einer akustisch optimierten Ventilatoransteuerung, dem gezielten Einsatz von Absorbern, Resonatoren sowie Active Noise Control an den Ansaug- und Ausblasöffnungen ist eine deutliche Reduktion des Betriebsgeräusches möglich. Auf diese Weise könnten aktuelle Geräte allein durch das Nachrüsten von Geräuschminderungsmaßnahmen derart verbessert werden, dass sie dann auch als Einzelgerät die Anforderungen der VDI EE 4300 im gewählten Klassenraumszenario erfüllen.

Dank des interaktiven Auralisationstools können auch Nichtakustiker das Betriebsgeräusch und die drauf wirkenden Geräuschminderungsmaßnahmen erleben und bewerten.

Danksagung

Das Projekt „ReinluftAkustik“ wurde gefördert im Rahmen der internen Programme der Fraunhofer-Gesellschaft, Fördernummer KMU-Akut 840 083.

Literatur

- [1] »ReinluftAkustik« – Akustische Optimierung kompakter Lüftungssysteme und Luftreinigungsgeräte, Fraunhofer-Internes Förderprogramm KMU-Akut
URL: <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/projekte-referenzen/reinluft-akustik.html>
- [2] VDI-EE 4300 Blatt 14:2021-09, „Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Anforderungen an mobile Luftreiniger zur Reduktion der aerosolgebundenen Übertragung von Infektionskrankheiten“, VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL), 2021
- [3] VDI 2081 Blatt 1, „Raumlufttechnik – Geräuscherzeugung und Lärminderung“, VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik, 2022
- [4] Bay, K.; Rohlfing, J.: Zur Akustik von Luftreinigungsgeräten. DAGA 2022, 48. Jahrestagung für Akustik, Stuttgart
- [5] Homepage des Auralisations-Tools,
URL: <https://auralization.idmt.fraunhofer.de>