Ansätze für nachhaltige Schalldämpfer in luft- und prozesslufttechnischen Anlagen

Wolfgang Herget, Peter Brandstätt

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 70569 Stuttgart, E-Mail: Peter.Brandstaett@ibp.fraunhofer.de

Einleitung

Die Ökobilanz von zentralen und dezentralen raumlufttechnischen Anlagen muss sich verbessern, damit Klimaziele erreicht werden können. Bisher steht zumindest der Betrieb der Anlagen im Fokus, indem z.B. Komponenten aerodynamisch günstig gestaltet werden, um Druckverluste und damit den Energieverbrauch der Strömungsquellen zu minimieren. Für die Ökobilanz von Gebäuden ist diese Energieeffizienz von zentraler Bedeutung, zumal der Klimatisierungsbedarf steigt. Mit zunehmender Energieeffizienz gerät die sogenannte „grauen Energie“ immer mehr in den Fokus. Die Ökobilanz dezentraler und zentraler RLT-Anlagen erfordert die Entwicklung nachhaltiger Gestaltungsoptionen ihrer Komponenten.

Dieses Ziel gilt für passive RLT-Komponenten mit Einfluss auf die schalltechnische Qualität der Anlagen, letztlich also auf die Geräuschabstrahlung in Räume. Dazu zählen z.B. Schalldämpfer und Luftdurchlässe sowie Filter, Wärmetauscher und Wetterschutzgitter, immer einschließlich der zugehörigen Kanalelemente. Jede Komponente kann zur strömungsinduzierten Entstehung und zur Dämpfung von Schall beitragen, der sich im Kanal oder über Nebenwege in Richtung Raum ausbreitet. Der vorliegende Beitrag fokussiert in einem ersten Schritt auf die Schalldämpfer.

Marktdaten und Nachhaltigkeit

Für Hersteller von RLT-Komponenten war bisher der Einsatz von Mineralwolle als poröser akustischer Absorber aus Kosten- und Funktionsgründen fast unumgänglich. Die Mineralwollproduktion ist jedoch ein sehr energieintensiver Vorgang und die Rückführung der eingesetzten Mineralwolle aus RLT-Komponenten nach deren Zyklusende in neue Produkte ist oft schwierig, da aktuell nur sortenreine Mineralwolle der gleichen Art recycelt werden kann [1]. Ebenfalls ist der Recyclingprozess von Mineralwolle erneut energieintensiv [2]. Das zweite Material von RLT-Komponenten ist hauptsächlich Stahlblech. Auch die Herstellung von Stahlblech und die Rückführung in den Stoffkreislauf ist ein energieintensiver Prozess [3]. Daraus ergibt sich die Motivation für die Erforschung und wirtschaftliche Umsetzung neuer Materialien für RLT-Komponenten, um diese in Produkte zu überführen, die mit dem aktuellen Stand der Technik in ihrer Funktion vergleichbar sind und einen erheblich besseren CO_2-Fußabdruck [4] aufweisen.

Ein Ansatz zur Substitution von Stahlblech besteht in der Verwendung von Kunstoffen mit angepassten Eigenschaften. Während in den vergangenen Jahren vor allem Verbundwerkstoffe favorisiert wurden, stehen nun Monomaterialien im Fokus, die Vorteile bei der Wiederverwertung aufweisen. Auch mit kunststoffbasierten Monomaterialien lassen sich geschichtete Werkstoffe mit optimierten Eigenschaften herstellen [5], konnten sich bisher aus Kostengründen aber nicht durchsetzen.

Die Abschätzung des Anteils der für Schallabsorber, und damit auch für Schalldämpfer, verwendeten Materialien gestaltet sich schwierig, da er in den Daten für Dämmstoffe enthalten ist [6]. Die Daten zeigen, dass der Markt zu 90 % von konventionellen Materialien dominiert wird. Dabei nimmt Mineralwolle einen Anteil von 50 % ein, EPS und XPS, die hauptsächlich als Fassadendämmstoffe Anwendung finden, ca. 35 % und Polyurethan ca. 5%. Dämmstoffe aus nachwachsenden oder mineralischen Rohstoffen kommen damit lediglich auf einen Anteil um 5 %.

Zu den für akustische Anwendungen eingesetzten Absorber, die allgemein verfügbar sind, gehören neben der Mineralwolle noch die in Abbildung 1 genannten Absorber aus PET, Polyester und Polyurethan. Sie zählen zu den Produkten, die zunehmend mit Nachhaltigkeitsangaben, z.B. Environmental Product Declaration EPD versehen werden und somit eine Einschätzung und einen Vergleich des CO_2-Abdrucks erlauben.

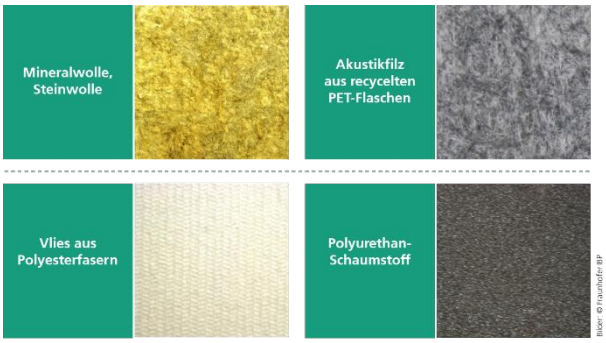

Abbildung 1: Die gebräuchlichsten Materialien für Schallabsorber, für die zunehmend EPDs erstellt werden.

Bis auf Mineral- und Steinwolle werden die Kunststoffprodukte auf Erdölbasis hergestellt. Für PET-Absorber wird dabei häufig nicht nur Abfallmaterial verwendet, sondern optimierte und weiterentwickelte Variante aus neuen Fasern, die den Verbund ohne zusätzliche Additive ermöglichen.

Nachhaltige Materialien in der Forschung

Die Suche nach neuen Materialien steht aktuell im Fokus. Anhand einer Internetrecherche konnten verschiedene Bereiche identifiziert werden. Sie umfassen nahezu alle Naturprodukte mit Faseranteilen, wie z.B. Hanf, Schilf und Stroh, aber auch Recycling von Stoffen und Textilfasern, die sich zu Matten verarbeiten lassen. Darüber hinaus werden Moose als Schallabsorber in Innenräumen eingesetzt sowie

Biomasse aus Kakteen und biobasierter Polyurethanmatrix zu offenporigem Kunstleder verarbeitet. Selbst Lederabfälle und Zellulosereste bieten im Recycling das Potenzial für neue Produkte. Die wenigsten dieser Ansätze konnten sich bisher am Markt durchsetzen. Neben den Kosten im Vergleich zu etablierten Produkten sind es zum einen vergleichbare akustische Eigenschaften bei andererseits ökologischem Vorteil. So sind viele Naturprodukte nur dann als Schallabsorber einsetzbar, wenn sich durch Bindemittel Matten oder Platten herstellen lassen. Diese benötigen in vielen Anwendungen einen Flammschutz und darüber hinaus z.B. Schutz vor Insektenbefall. Die dabei zur Anwendung kommenden Zusatzstoffe führen dazu, dass aus den Naturprodukten Sondermüll entsteht, da die Komponenten für das Recycling nicht getrennt werden können.

Zwei Beispiel aus Projekten des IBP seien hier zitiert und in Abbildung 2 dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung ist ein Mineralschaum aus dem Projekt StaubGold (BW Stiftung, Programm "Nachhaltiges Bauen" 2015) zu sehen, der aus den feinen Bestandteilen von Abbruchmaterial und Bindemittel hergestellt wird. Zusätzlich kommt ein Schaumbildner zum Einsatz, so dass eine offenporige Struktur entsteht. Das Treibhausgaspotenzial THG des Materials wird von diesen additiven Komponenten bestimmt.

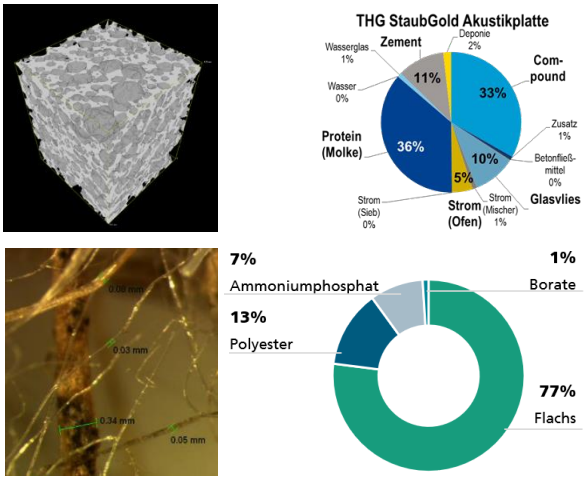

Abbildung 2: Beispiele für Neuentwicklungen nachhaltiger Absorber und deren Zusammensetzung. Offenzelliger Mineralschaum (oben) und Flachsfaservlies (unten).

Der untere Teil von Abbildung 2 zeigt eine mikroskopische Aufnahme eines Flachsvlieses mit einer Zusammensetzung unterschiedlich dicker Fasern für die akustische Optimierung. Auch hier kommen Flammhemmer und Bindemittel zum Einsatz (Bild rechts unten), die für die Funktion notwendig sind. Damit verliert das Material wieder den Vorteil der Sortenreinheit und verhindert das Recycling.

Aktuelle Forschungsprojekte widmen sich daher verstärkt der Entwicklung von Materialien, die ohne oder mit abbaubaren Bindemitteln auskommen. Die Frage des Brandschutzes in vor allem bei Naturfasern zumeist noch offen. Einige Materialentwicklungen sind zum Teil schon länger am Markt verfügbar und sind zumindest in der Frage des Bindemittels einen Schritt weiter. Abbildung 3 zeigt drei Beispiele. Im Foto links ist eine Platte aus gesintertem Glasgranulat (REAPOR) dargestellt, sowie eine Vergrößerung der Porenstruktur. Das Granulat wird gebläht und dadurch offenporig. Anschließend wird es durch Sinterung erhitzt, so dass die Granulatkörner miteinander verbacken und die Bindung herstellen. Dadurch entsteht ein doppeltporöser Absorber mit breitbandiger akustischer Wirkung, der sich auch, wie in Abbildung 4 dargestellt, als Kanalbauteil oder als Schalldämpferkulisse einsetzen lässt.

Abbildung 3: Entwicklung nachhaltiger Absorber am IBP, Gesintertes Glasgranulat (REAPOR, links), Rohrkolbenplatte (Typha, Mitte) und am Fraunhofer WKI, Holzschaum mit inhärenten Bindungskräften (rechts).

Das Foto in der Mitte von Abbildung 3 zeigt eine Bauplatte aus Rohrkolbenmaterial das mineralisch gebunden wird. Je nach Gestaltung der Platte kann sie für die Schalldämmung oder Absorption eingestellt werden. Der Rohstoff ist schnell nachwachsend in Moorgebieten und hilft darüber hinaus diese zu renaturieren. Im Foto rechts der Abbildung 3 ist eine neue Holzschaumplatte zu sehen, die am WKI entwickelt wurde. Diese nutzt inhärente Bindungskräfte des Lignins und kommt daher ohne weiteres Bindemittel aus.

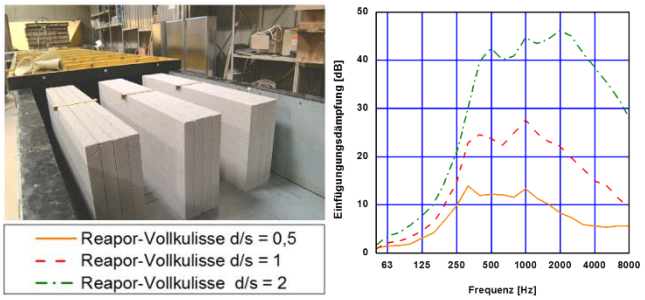

Abbildung 4: Gesintertes Glasgranulat (Reapor) als Kulissen-Schalldämpfer, Länge = 1250 mm, Messung bei drei Ausstellungsverhältnissen d/s, Kulissendicke 2d = 200 mm, Spaltbreite 2s = 400, 200, 100 mm.

Darüber hinaus sind verschiedene Mineralfaserprodukte erhältlich, die auf geringeren Energieeinsatz bei der Herstellung, organische Bindemittel mit dem Verzicht auf Phenolharz oder modifizierter Faserstruktur bei geringerer Dichte entwickelt wurden. Sie weisen damit eine verbesserte Energiebilanz und reduzierten CO_2-Abdruck auf.

Ein Beispiel für Messungen an Schalldämpfern mit Mineralfaser mit organischem Bindemittel auf Stärkebasis (rot) im Vergleich zu einer herkömmlichen Mineralfaser (blau) ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Diagramme zeigen zwei Konfigurationen mit einer Kulissendicke und Spaltbreite von 200 mm im linken Diagramm, sowie mit 100 mm im rechten Diagramm. Obwohl Unterschiede in den Dämpfungsverläufen sichtbar sind, zeigt auch die Kulisse aus Mineralwolle mit organischem Bindemittel vergleichbare Eigenschaften in der Dämpfung. Hier sind ähnliche Dichten und Strömungswiderstände entscheidend für die akustischen Eigenschaften.

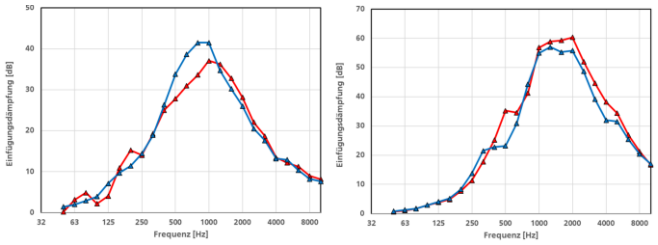

Abbildung 5: Dämpfungsverläufe von Schalldämpfern mit konventioneller Absorberfüllung (blau) und mit organischem Bindemittel (rot) bei ansonst gleicher Konfiguration, Kulissendicke = Spaltbreite = 200 mm, (links), Kulissendicke = Spaltbreite = 100 mm (rechts), Länge = 1500 mm.

Schalldämpfer als Komponente

Neben vielen weiteren Komponenten in Lüftungsanlagen, wie Filter, Drossel- und Brandschutzklappen, sind Schalldämpfer die zentrale Komponente zur Minderung des Ventilatorgeräusches. Nahezu ausnahmslos werden die Schalldämpfer in Rechteckkanälen dabei als Kulissen-Schalldämpfer ausgeführt, wobei die einzelnen Kulissen überwiegend mit Mineralwolle als Schallabsorber gefüllt sind. Die grundsätzliche akustischen Funktion der Schalldämpfer ergibt sich neben der Länge der Kulissen aus der Dicke der Kulissen, und damit der Absorberschicht, sowie dem Abstand der Kulissen zueinander im Kanal.

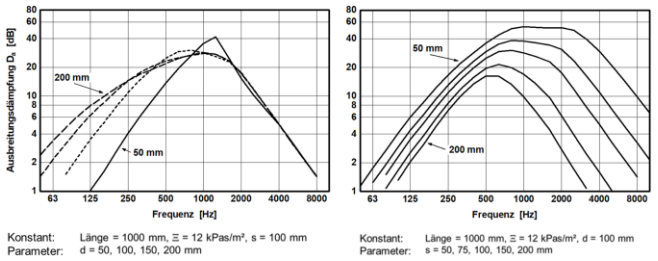

Abbildung 6: Typische Dämpfungsverläufe von Schalldämpfern mit passiver Absorberfüllung bei zunehmender Kulissendicke (links) und abnehmender Spaltbreite (rechts). Alle weiteren Parameter konstant.

Die in Abbildung 6 dargestellten typische Verläufe zeigen im linken Diagramm die Zunahme der Dämpfung bei tiefen Frequenzen mit wachsender Kulissendicke. Für eine dabei konstante Spaltbreite ergeben sich damit identische Verläufe bei den hohen Frequenzen. Für eine Zunahme der Dämpfung bei hohen Frequenzen ist daher eine Reduzierung der Spaltbreite notwendig, wie das rechte Diagramm in Abbildung 6 zeigt und führt bei sehr engen Spalten zu hohen Werten sowie einer Zunahme auch bei tieferen Frequenzen. Anforderung an Schalldämpfer bei mittleren und hohen Frequenzen führen in der Auslegung häufig dazu enge Spalte zu wählen.

Dieser akustische Vorteil bewirkt aber ein zunehmendes Hindernis für die Strömung, da nur eine geringe Fläche des Kanals offenbleibt und führt zu einer starken Zunahme des Druckverlusts. Bei damit ebenfalls zunehmender Strömungsgeschwindigkeit im Kulissenspalt entstehen als weiterer Nachteil Strömungsgeräusche an den Schalldämpferkulissen, die aber vom Schalldämpfer selbst nicht mehr gedämpft werden können und so als neue Quelle verbleiben.

Mit dieser Art der Anwendung wird die Komponente Schalldämpfern selbst zum Energieschlucker in übermäßiger Art und weist im Einsatz eine deutlich negative Energiebilanz auf. Eine möglichst optimale Auslegung der Schalldämpfer ist also, neben gestalterischen Aspekten, geboten.

Denn generell muss der Druckverlust an den Schalldämpfern durch zusätzliche Ventilatorleistung überwunden werden. Die dadurch entstehenden Energiekosten EK lassen sich mit Gleichung (1) abschätzen und Verbesserungsmaßnahmen quantifizieren.

$$EK = 5{,}25 \; \frac{\zeta \; \mu \varepsilon}{\eta} \; \frac{\rho}{\rho_0} \frac{q_v}{q_0} \left(\frac{v_s}{v_0} \right)^2 \qquad \left[\frac{T€}{a} \right] \qquad (1)$$

Darin sind ζ_S der Druckverlustbeiwert des Schalldämpfers, μ [h/24h] der Einsatzgrad des Ventilators, ε [€/kWh] der Strompreis, η Wirkungsgrad des Ventilators, ρ [kg/m³] Gasdichte, v_S [m/s] die Strömungsgeschwindigkeit im Kulissenspalt und q_V [m³/s] der geförderte Volumenstrom. Die entsprechenden Bezugsgrößen sind $\rho_0 = 1{,}21$ [kg/m³], $q_0 = 10$ [m³/s] und $v_0 = 10$ [m/s].

Allein durch den Einsatz von Anströmprofilen (AP) an den Kulissen lassen sich bei ansonst unveränderten Einbau- und Betriebsdaten ca. 19 % an Energiekosten einsparen, wie das Beispiel in Tabelle 1 verdeutlicht. Dabei wurden folgende Betriebsparameter bei Normalbedingungen angesetzt: Wirkungsgrad des Ventilators $\eta = 0{,}85$, Dauerbetrieb $\mu = 1$, Strompreis $\varepsilon = 0{,}15$ €/kWh, Strömungsgeschwindigkeit im Kulissenspalt $v_S = 28$ m/s und ein Volumenstrom von $q_V = 200.000$ m³/h.

Tabelle 1: Energiekosten für einen 2 x 2 m² großen Schalldämpfer in der Prozessluft mit 5 Kulissen 200 mm breit, 200 mm Spaltbreite und 1000 mm Länge.

Zustand	Parameter		
	Druckverlust	Zusatzenergie	Energiekosten
Ohne AP	304 Pa	19,7 kW	25.800 €/a
Mit AP	247 Pa	16,0 kW	21.000 €/a

Selbst bei kleineren Schalldämpfern oder niedrigeren Durchsätzen zahlt sich der Einsatz strömungsgünstig gestalteter Kulissen aus. Stand der Technik sind Kulissenrahmen mit abgerundeten Kanten, die den Strömungswiderstand zumindest etwas vermindern. Eine deutliche Reduzierung wird durch den Einsatz eines Anströmprofils als Halbkreis oder als Dreieck erzielt, zusätzliche Abströmprofile helfen, den Strömungswiderstand zu minimieren. Die zusätzlichen Investitionskosten in der Größenordnung weniger Euro stehen in keinem Verhältnis zu den ansonst anfallenden Energiekosten im Betrieb. Vor allem Bauherren, die zugleich Nutzer der Anlagen sind, sollten diese nicht unerhebliche Einsparung an Energie und Kosten im Sinne eines nachhaltigen Betriebs

berücksichtigen. Aber auch Investoren sind angehalten ihre Anlagen im Sinne der Nachhaltigkeit optimal zu planen.

Schalldämpfer als Gesamtsystem

Abschließend ist die Betrachtung von Schalldämpfern als Gesamtsystem einer Lüftungsanlage angebracht. Im Sinne der einfachen modularen Bauweise ist der Einsatz von konzentrierten Schalldämpfern in Kulissenbauweise durchaus verständlich. Darüber hinaus lassen sich damit vermeintlich sowohl die akustische wie die hydraulische Auslegung einfach bewerkstelligen. Die Nachteile hinsichtlich des Druckverlusts und der Energiekosten liegen dennoch auf der Hand. Daher bietet es sich an, die vorhandenen, zum Teil langen und unbedämpften Kanalstrecken mit Absorber auszukleiden, und so als Schalldämpfer auszubilden. Damit entstehen beabsichtigt große Spaltbreiten, die nach Abbildung 6 zu geringen Dämpfungswerten bei den mittleren und hohen Frequenzen, aber eben auch zu deutlich reduzierten Druckverlusten führen. Zur Kompensation dieses Dämpfungsverlustes werden Bögen und Umlenkungen ebenfalls mit Absorber belegt. In der Summe entsteht ein verteiltes Dämpfungssystem nach Abbildung 7 mit einer an die akustischen Erfordernisse anpassbaren Dämpfung durch Abstimmung der Komponenten. Bei Bedarf kann das System um Resonatoren für den tieffrequenten Bereich erweitert werden.

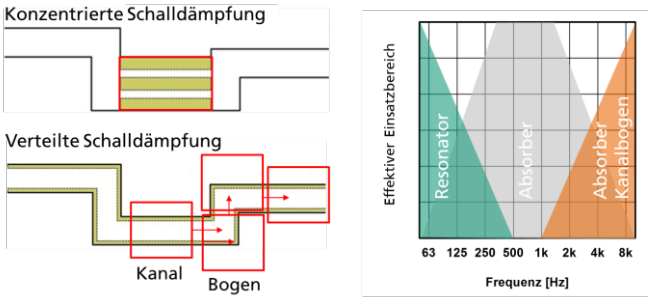

Abbildung 7: Lösungsansatz für verteilte Schalldämpfung statt Konzentration mit angepassten Komponenten für verschiedene Frequenzbereiche.

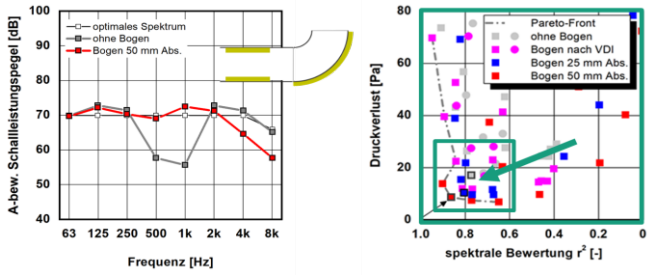

Abbildung 8: Ausgeglichenes Zielspektrum durch optimierte Dämpfung (links) und optimale Kombination der Komponenten für minimalen Druckverlust bei optimierter Dämpfung mithilfe Maschinellen Lernens (rechts).

Die Auslegung des Systems erfordert eine parallele Berechnung des Druckverlustes im System und der Dämpfung der Komponentenanordnung. Ziel ist dabei eine optimal an die Anforderung angepasste Dämpfung. Dazu kann als Eingangsgröße das Ventilatorspektrum verwendet werden oder, vorteilhafter, das Zielspektrum am Luftauslass zur Einhaltung der Grenzwerte. Durch Abstimmung der ausgekleideten Kanallängen, der Dicke der Absorberschichten und Anzahl der Bögen lässt sich damit, wie in Abbildung 8 links gezeigt, ein ausgeglichenes Zielspektrum einstellen. Auf diese Weise werden überdämpfte Frequenzbereiche sowie tonale Komponenten vermieden.

Im Diagramm in Abbildung 8 rechts wird die für die Akustik ermittelte Konfiguration als spektrale Bewertung auf der x-Achse qualifiziert und drückt die Summe der Differenzen zum ideal glatten Zielspektrum aus. Auf der y-Achse findet sich die Ergebnisse der Druckverlustberechnungen für die jeweiligen Konfigurationen abgetragen. Die dadurch entstehende Front minimaler Druckverluste und maximaler akustischer Passung ergibt über viele Simulationen eine Paretofront mit den optimalen Werten nahe beim Ursprung des Koordinatensystems. Die simultane Berechnung von Druckverlust und Dämpfung lässt sich in ein Optimierungssystem überführen und mit Verfahren des Maschinellen Lernens automatisieren. Mit diesen Verfahren werden komplexere Systeme handhabbar und der Anwendung zugeführt.

Fazit

Das Bestreben Schalldämpfer in Luftleitungssystemen als Bestandteil einer nachhaltigen Gebäudetechnik zu begreifen, erfordert gestalterische Maßnahmen auf allen Handlungsebenen. Die Wahl des Materials ist dabei nur eine Stellschraube für mehr Nachhaltigkeit. Letztendlich ist die strömungsgünstige Ausgestaltung einfacher Kulissen als Komponente bis hin zum Zusammenspiel mehrerer Komponenten im Gesamtsystem entscheiden für den Gewinn an Energie und Senkung des CO_2-Fußabdrucks. Verteilte Systeme bieten dabei ein großes und bisher nicht ausgeschöpftes Potenzial.

Literatur

[1] SAINT-GOBAIN ISOVER G+H AG, URL: https://www.isover.de/recycling-und-entsorgung-mit-isover#mineralwolle-ist-recyclebar

[2] Forum Nachhaltiges Bauen, URL: https://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/Steinwolle

[3] Salzgitter AG, URL: https://www.salzgitter-ag.com/fileadmin/mediadb/szag/coporate_responsibility/umwelt_und_energie/studie_co2_bilanz_stahl.pdf

[4] DIN EN ISO 14067:2019-02: Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung

[5] Rohlfing, J; Aoki, Y; Wack, R.; Diemert, J.: Akustisch optimierte Polymerwerkstoffe, Komponenten und Geometrien für Kunststoffgehäuse, DAGA 2022 - 48. Jahrestagung für Akustik, S. 1354 – 1357, Stuttgart

[6] Leitfaden Dämmstoffe 3.0: Landeshauptstadt München, Referat für Gesundheit und Umwelt, Bauzentrum München, Oktober 2017