

Akustikgestaltung von Gebäudefassaden

David Goecke, Dr. Peter Brandstätt, Yohko Aoki

EINLEITUNG Die Lärmbelastung im urbanen Gebiet ist an Mobilitätsflächen, wie Bahnlinien, Straßenschluchten oder Parkflächen, von aktueller Bedeutung. Hier wird der Schall, ausgehend von Straßen- und Schienenverkehr, an häufig schallhart ausgeführten Fassadenelementen reflektiert. Deshalb bieten schallabsorbierend ausgekleidete Fassaden sowie aktiv geregelte Fassadensysteme das Potenzial, die Schallimmission der Umgebung bzw. in den Gebäuden zu reduzieren. Die Herausforderungen dabei sind jedoch vielseitig: So sind schallabsorbierende Fassadenelemente vor Witterungseinflüssen ausreichend resistent auszuführen und weitere bauphysikalische Anforderungen, wie Wärmedämmung und Brandschutz, zu berücksichtigen. Außerdem ist die Abschätzung der (flächenanteilig) notwendigen schallabsorbierenden Fassadenelemente für eine bestimmte Situation und deren Randbedingungen ohne ausreichende Expertise kaum möglich. Zusätzlich führen Fassadenöffnungen, wie sie temporär bei der natürlichen Lüftung durch Fenster entstehen, zu einer erhöhten Lärmbelastung innerhalb der Gebäude. Die hier vorgestellten Verfahren und Technologien können einen Beitrag leisten, nicht nur Straßenzüge zu beruhigen, sondern auch Bereiche für die Naherholung zu gestalten.

ABSTRACT Noise pollution in urban mobility areas, such as railway lines, street canyons or parking areas, is an everyday topic. Mostly sound-reflecting surfaces lead to multiple reflections, especially at hard covered facades. Therefore, sound-absorbing and actively controlled facade systems offer the potential to reduce the sound immission in buildings and their environment. However, there is a variety of challenges: Sound-absorbing facade elements must be designed to be sufficiently resistant to surrounding effects like weather. Also, other building physics requirements like thermal insulation and fire protection must be taken into account. Furthermore, the estimation of the amount of sound-absorbing facade elements (proportional to the facade area) is required for each specific situation which is hardly possible without sufficient expertise. In addition, facade openings, such as those that occur temporarily during natural ventilation through windows, lead to an increased noise pollution within a building. The procedures and technologies presented here can contribute not only to calming streets but also to designing areas for local recreation.

Urbane Akustik

Die Lärmbelastung im urbanen Raum ist maßgeblich abhängig vom Verkehrsaufkommen. Die auf den städtischen Straßen verkehrenden Fahrzeuge emittieren insbesondere Antriebs- und Abrollgeräusche. Das Aufheulen des Motors, bspw. an einer Ampel, oder das (starke) Abbremsen sowie das Hupen in Gefahrensituationen ergänzen die charakteristische Klangeigenschaft des Verkehrslärms. Durch den Trend hin zur Elektromobilität verändert sich zwar der Charakter des Antriebsgeräuschs ganz grundsätzlich. Der gleichbleibende Anteil des Reifenabrollgeräuschs, sowie die Einführung eines Fußgängerwarnsystems (AVAS: „Acoustic Vehicle Alert System“), führen jedoch nicht dazu, dass Elektrofahrzeuge keine Geräusche emittieren. Viele Innenstädte verfügen über ein Schienennetz. Lärm von Schienenfahrzeugen setzt sich u. a. aus dem Roll- und Windgeräusch, den Geräuschen von Elektromotoren, der Bremsvorgänge und der Kurvenfahrt (Kurvenquietschen) zusammen. Zusätzlich entsteht beim Überfahren von Stellwerken, Gleisschwellen und Bahnübergängen die für den

städtischen Bahnverkehr charakteristische Klangeigenschaft. Baustellen, Parkplätze, Freizeitaktivitäten, Abfallentsorgung und zukünftig auch Drohnen sind ebenfalls typische Schallquellen im urbanen Raum. Auch Unterhaltungen, Sportveranstaltungen und Musikdarbietungen können subjektiv belästigend wahrgenommen werden.

Gestaltung von Gebäudefassaden

Das Wirkpotenzial von urbanen Oberflächen ist vielseitig. Aus bauphysikalischer Sicht dienen sie durch Absorption, z. B. von Staub und Abgasen, der Luftreinigung. Zusätzlich steuern sie Licht und beeinflussen das Klima sowie das Wassermanagement. Aus Sicht der Akustik dienen urbane Fassadenflächen den Gebäuden durch ihren Schallschutz. Dazu zählt die Schalldämmung von außen nach innen und in geringerem Maße die Absorption der auftreffenden Schallwellen, die an Lücken und Öffnungen entsteht. Die Ausstattung von Fassaden mit schallabsorbierenden Elementen bietet eine passive Schallschutzmaßnahme an der Außenseite der Gebäude und führt zu einer Reduzierung der Lärm-

belastung in der direkten urbanen Umgebung. Darüber hinaus können Teile der Gebäudefassaden transparent oder transluzent ausgeführt werden, sodass sie Sicht- oder Lichtverhältnisse nur wenig beeinflussen. Es ist auch möglich, Fassaden (vertikal) zu begrünen oder sie im Sinne des „Biophilic Design“ natürlich wirken zu lassen. Mit der Fassadenbegrünung können Zusatzeffekte wie die Steigerung der Behaglichkeit und Verbesserung des Mikroklimas ausgenutzt werden [1].

Prognose der akustischen Wirkung

Stadtplaner und Architekten stehen regelmäßig vor der Aufgabe, die Auswirkung neu gestalteter Gebäudefassaden auf die Schallimmission in der Umgebung begutachten zu lassen. Dabei sind seitens der Genehmigungsbehörden Vorgaben einzuhalten, die sicherstellen sollen, dass es durch das Bauvorhaben auch nach der Umsetzung zu keiner Erhöhung der Schallimmission an schützenswerten Orten in der Umgebung kommt. Bereits minimale Änderungen (ab 0,1 dB(A)) können unter Umständen zu Planänderungen und ggf. zum Baustopp führen, wenn eine Überschreitung gesetzlicher Grenzwerte prognostiziert wird [2]. Zusammen mit der Fa. Schüco International KG ist das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP daher der Frage nachgegangen, wie die Auswirkung der Fassadengestaltung auf die Schallimmission anhand von vereinfachten Gebäudetopologien mit verschiedenen Gebäudemmaßen und bei variierender schallabsorbierender Wirkung während der Planung grundlegend abgeschätzt werden kann. Das Ergebnis ist ein Prognosewerkzeug für Anwender*innen ohne spezielle Softwarekenntnisse. Trotz des begrenzten Verständnisses für die akustische Auswirkung von Gebäudefassaden können Anwender*innen die Auswirkung verschiedener mehr oder weniger schallabsorbierender Fassadenanteile vereinfacht abschätzen. Ein Schallimmissionsgutachten soll damit schließlich nicht umgangen, sondern zielgerichteter beauftragt werden können.

Als Ausgangspunkt wird zunächst eine stark vereinfachte Bebauungssituation gewählt, die trotzdem praxisrelevant ist. Geplant wird in diesem Beispiel ein neues Gebäude (Topologie A) an einer Straße. Eine Schallimmissionsprognose soll herausstellen, ob durch das Gebäude eine Mehrbelastung durch Lärm gegenüber (Immissionspunkte IP 1 bis IP 6) oder in den oberen Stockwerken bzw. oberhalb der Schallquelle (IPs 7 bis 9) entsteht. Die Kombination von zwei gegenüberstehenden Gebäuden (Topologie B) wird in einer weiteren Entwicklungsstufe ebenfalls berücksichtigt, um die Schallimmission in der dabei entstehenden Straßenschlucht abzuschätzen (Bild 1).

Für die Prognose werden die in Tabelle 1 gezeigten Parameter festgelegt. Dabei gehen die Gebäudehöhe, Gebäudebreite sowie der Abstand des Gebäudes zur Straße in die Betrachtung ein. Der Einfluss der Gebäudetiefe wird zunächst vernachlässigt und als konstant angesetzt.

Als wesentliches akustisches Maß ist der mittlere Reflexionsverlust der Fassade zu nennen, der (vereinfacht) aus dem bewerteten Schallabsorptionsgrad und dem damit prozentual ausgeführten Flächenanteil einer Fassade nach Gleichung (1) bestimmt werden kann.

$$DL = -10 \cdot \log_{10} (1 - (\alpha_w \cdot S_A)) \quad [dB] (1)$$

Mit:

α_w = bewerteter Schallabsorptionsgrad

S_A = Anteil schallabsorbierende Fläche (1 entspricht 100 %)

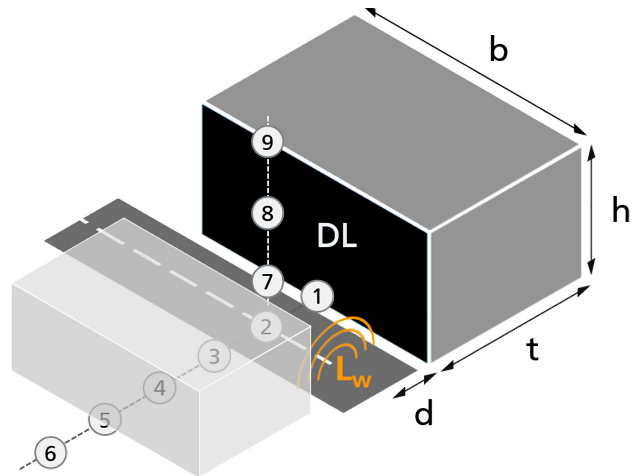


Bild 1 Vereinfachte Topologie (A) für ein Prognosewerkzeug zur Auslegung schallabsorbierender Gebäudefassaden: Immissionspunkte 1 bis 6 gegenüber; 7 bis 9 oberhalb der Schallquelle. Topologie B wird mit einem zweiten gegenüberstehenden Gebäude illustriert. Grafik: Fraunhofer IBP

Tabelle 1 Beschreibung der veränderlichen Parameter der Topologie A für ein Prognosewerkzeug zur Auslegung schallabsorbierender Gebäudefassaden.

Parameter	Werte	Beschreibung
DL [dB]	0, 1, 2, 4, 6, 8	Reflexionsverlust der Fassade
h [m]	10, 20, 30	Gebäudehöhe
b [m]	10, 20, 30	Gebäudebreite
d [m]	2, 4, 6	Abstand zur Linien-schallquelle
t [m]	5	Gebäudetiefe (konstant)

Das gewünschte Berechnungsergebnis ist die Schallimmission für alle Parameterkombinationen der Tabelle 1 an allen IPs. Für Topologie A entstehen damit 162 Kombinationen an Ausbreitungsrechnungen, die in einzelnen Simulationsmodellen mit SoundPlan® bis zur fünften Reflexionsordnung ermittelt werden. Als Schallemission wird eine Linien-Schallquelle mit einer Schalleistung von $L_w = 80$ dB(A) breitbandig angesetzt. Zur Beurteilung der Auswirkung des schallabsorbierenden Fassadenanteils wird schließlich eine Schalldruckpegeldifferenz an den IPs herangezogen. Dabei wird die Differenz der Schallimmission ermittelt, die sich zwischen einer schallharten (DL = 0 dB) und einer schallabsorbierenden Gebäudefassade an den IPs einstellt. Diese ist abhängig vom Reflexionsverlust (also der flächenanteiligen Schallabsorption) und dem Abstand des IPs zur Gebäudefassade sowie zur Schallquelle.

Bild 2 (oben) zeigt beispielhaft, wie der mittlere Reflexionsverlust aus den bewerteten Absorptionsgraden der verschiedenen Materialien nach Gleichung (1) abgeschätzt werden kann. Bild 2 (unten) zeigt das Ergebnis als Variante 2. Für einen Vergleich verschiedener Maßnahmen stellen Variante 1 und 3 Ergebnisse für Fassaden mit anderen Annahmen der Schallabsorption bei gleichen Gebäudemäßen dar.

Das Ergebnis in Bild 3 zeigt, dass die Einordnung des Einflusses schallabsorbierender Fassaden gelingt: bis zu 1,9 dB(A) Differenz zwischen schallhart und schallabsorbierend

Eingabe:				
"Taschenrechner": Bestimmung des Reflexionsverlustes DL				
Bauteile:	Anteil [%]	Absorption α_w^* [-]	DL [dB]	
Absorber	60	0,8	2,84	
Beton	25	0,03	0,34	
Fenster	5	0,03	0,02	
Türen	10	0,15	0,07	
Gesamt:	100	0,504		
* bewerteter Schallabsorptionsgrad			DL =	3,05 dB
Parameterwahl:		Topologie A		
Variante:	DL ₁ [dB]	h ₁ [m]	b ₁ [m]	d ₁ [m]
1	1,00	25	30	6
2	3,05	25	30	6
3	8,00	25	30	6

Bild 2 Eingabemasken für die Berechnung des Reflexionsverlustes einer Gebäudefassade bestehend aus verschiedenen Komponenten und Materialien (oben) und für die Eingabe der Parameter der Topologie A (drei Varianten) eines Prognosewerkzeugs zur Auslegung schallabsorbierender Gebäudefassaden *Grafiken: Fraunhofer IBP*

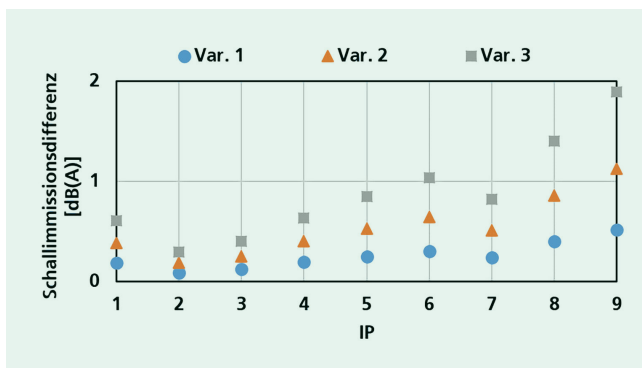


Bild 3 Prognoseergebnisse der drei Varianten aus Bild 2 der Topologie A (vgl. Bild 1) des Prognosewerkzeugs zur Auslegung schallabsorbierender Gebäudefassaden *Grafik: Fraunhofer IBP*

ausgeführter Fassade bei einem Reflexionsverlust von DL = 8 dB (Var. 3) kann prognostiziert werden. Da der Reflexionsverlust von DL = 3,05 dB (Var. 2) nicht simuliert wurde (vgl. Tabelle 1), wird dieser durch eine geeignete Interpolation der simulierten Ergebnisse prognostiziert. Die Evaluierung und Implementierung einer geeigneten Interpolation wurde durch Tests mit simulierten Szenarien validiert. Bisher wurden nach diesem Verfahren die beiden Topologien A und B umgesetzt. Je mehr Gebäudefassaden sich in nächster Nähe gegenüberstehen, desto wirkungsvoller ist die Schallabsorption zur Beruhigung der Umgebung. Eine solche Situation ist in Innenhöfen zu finden, die im Rahmen eines Projektes akustisch untersucht wurden und im Folgenden in einem ähnlichen Zusammenhang näher diskutiert werden.

Akustik in Innenhöfen

In städtischen Innenhöfen kommen zum Verkehrslärm, der neben der Mobilität durch Öffnungen und Durchgänge eindringt, Geräusche durch startende und wartende Fahrzeuge auf Parkflächen (ca. 65 dB(A) Schalldruckpegel) innerhalb des Areals hinzu. Zusätzlich können Geräuschquellen mit lautstarken Einzelereignissen sowie von Sport- und Spielstätten (ca. 70 bis 90 dB(A)) auftreten. Der zeitweise vorhandene, durch pri-

vate und gewerbliche Baustellen bedingte Lärm entsteht durch die Errichtung von Gebäuden, durch energetische Sanierungsarbeiten am Bestand sowie durch Abbrucharbeiten, um Platz für neue Wohnungen zu schaffen. Als Geräuschquellen sind dabei mittelschwere bis schwere Werkzeuge bzw. Werkzeugmaschinen wie Presslufthammer (90 dB(A)) und Baufahrzeuge (inkl. Be- und Entladen) zu nennen. Aber auch Gespräche auf Balkonen oder im Außenbereich von Restaurants, spielende Kinder sowie andere Alltagsgeräusche können für eine ständige Geräuschkulisse sorgen. Durch mehrfache Reflexionen an den Oberflächen von Gebäuden (z. B. Fenster und Balkone) und Bodenbeläge werden die Geräusche in Innenhöfen weiter verstärkt. Deshalb kann eine besondere Lärmbelastung in Innenhöfen entstehen [1].

Schallschluckende Balkone

Die Untersicht von Balkonen bietet zusätzlich zu den Fassaden Gestaltungsfläche, die zur Schallabsorption genutzt werden kann. In einer modellhaften Untersuchung wird das Potenzial dieser möglichen Lärminderungsmaßnahme mit der Software COMSOL[®] näher untersucht. Die Software bietet die Möglichkeit, gezielt ergänzende raumakustische Simulationen auf Basis der Randelementmethode (BEM) durchzuführen.

Für das Beispiel wird ein Absorptionsmaterial mit den akustischen Eigenschaften von Reapor[®], ein Blähglasgranulat mit einer Dicke von 100 mm, unterhalb der Balkonplatte angebracht. Dieses Material eignet sich auch für den praktischen Einsatz, da es Witterungseinflüssen im Freien unter Beibehaltung der akustischen Eigenschaften standhält. Die Schallquelle ($L_w \approx 70$ dB bei 500 Hz) ist zum einen am Boden (SQ1) positioniert, um ein Schallereignis im Innenhof zu simulieren. Zum anderen ist sie auf einem der Balkone positioniert (SQ2), um Gespräche oder andere Aktivitäten und deren Auswirkung auf die Schallausbreitung bewerten zu können.

Bild 4 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung in einer Schnittansicht durch den Simulationsbereich. Dabei stehen die Ergebnisse, berechnet für die beiden Schallquellpositionen, im

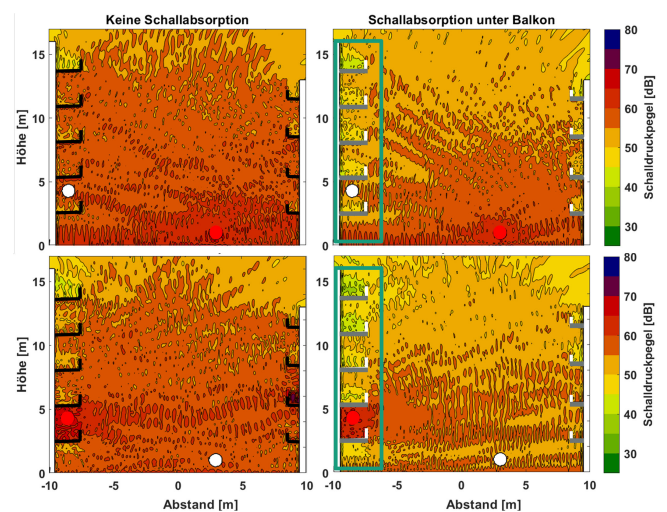


Bild 4 Auswirkungen schallabsorbierend ausgekleideter Balkonuntersichten bei einer Schallquelle am Boden (oben: roter Kreis, inaktiv in Weiß) und auf dem Balkon (unten: roter Kreis, inaktiv in Weiß); links: kein absorbierendes Material (schwarz), rechts: Balkonuntersicht (grau) schallabsorbierend. *Grafiken: Fraunhofer IBP, Simulation mit COMSOL[®]*

Vergleich ohne (links) und mit Reapor® (rechts) an der Balkonuntersicht gegenüber. Es ist zu erkennen, dass für beide Quellpositionen der Immissionspegel im betrachteten Simulationsbereich durch das gezielt angebrachte Material um 5 bis 10 dB reduziert werden kann. Die farblich dargestellte Schallpegelverteilung zeigt dabei insbesondere auf den Balkonen eine Reduktion der Schallimmission. Die Auskleidung der Unterseite von Balkonen bietet also das Potenzial, die Schallimmissionen im Innenhof zu reduzieren [1].

Intelligenter Schallschutz

Einen wesentlichen Anteil am Schallschutz von Fassaden haben die Verglasungen und Fenster mit in der Regel niedrigeren Schalldämmwerten im Vergleich zu den Wandbauteilen. Durch das Öffnen, z. B. zur kontrollierten natürlichen Lüftung, gelangt mehr Schall ins Gebäude. Dabei entsteht ein Zielkonflikt: Die Schalldämmung ist damit um ein Vielfaches geringer, weshalb die Lärmbelastung im Innenraum während der Belüftung steigt. Wenn auf diese kontrollierte natürliche Lüftung nicht verzichtet werden kann, sind innovative Lösungsansätze gefragt. Einer davon ist die automatische Regelung des Schließmechanismus des Fensters auf Basis akustischer Kenngrößen. Ein erster Ansatz besteht darin, das Öffnen und Schließen mit einem Schwellwert, also einem festgelegten Schalldruckpegel, zu verknüpfen [3]. Eine Überschreitung führt zum Schließen, eine Unterschreitung zum Öffnen des Fensters. Dabei ergibt sich die folgende Herausforderung: Es wird ein mechanischer Antrieb benötigt, der das Fenster in Bewegung setzt. Um rechtzeitig einen signifikanten Lärmschutz zu erreichen, muss eine ausreichend hohe Bewegungsgeschwindigkeit erreicht werden. Die dazu benötigte Leistung des Motors führt zusätzlich zu Geräuschen, die ebenfalls zur Belästigung werden können. Ein niedriger Schwellwert könnte hingegen zu einer Überempfindlichkeit des Systems (ständiges Öffnen und Schließen) führen.

Die intelligente akustische Fenstersteuerung

Um dieser Herausforderung zu begegnen, liegt der Fokus des hier vorgestellten, neuen Ansatzes auf der erweiterten Auswertung des Geräuschcharakters. Eine weitere Motivation dafür ist, dass auch bei geringem Schalldruckpegel ein Geräusch belästigend sein kann. Spezielle Geräuschanalysen aus dem Bereich der Musikanalyse (engl.: Music Information Retrieval) wie die Vorzeichenwechselrate des gemessenen Schalldruckverlaufs, der energetische Schwerpunkt des Frequenzspektrums oder der Modulationsgrad bieten Möglichkeiten der objektiven Geräuschbeschreibung. Psychoakustische Analysen, wie Lautheit, Tonalität und Schärfe, sind wahrnehmungsbezogene Analysegrößen, die ebenfalls herangezogen werden können [4], [5].

Ziel ist es, anhand dieser Geräuschanalysen eine potenzielle und personalisierte Lärmbelastung vorauszusagen, die zum rechtzeitigen Schließen des Fensters führt. Dabei unterstützen Verfahren des maschinellen Lernens, bei denen die Analyseergebnisse als Merkmale („Feature“) zur Prognose der Lärmbelastung („Label“) dienen. Um daraus die subjektive Lärmbelastung zu erheben, ist eine Nutzerbefragung (Hörversuch) notwendig. Bei ausreichender Datenbasis kann eine künstliche Intelligenz trainiert und für den aktiven und personalisierten

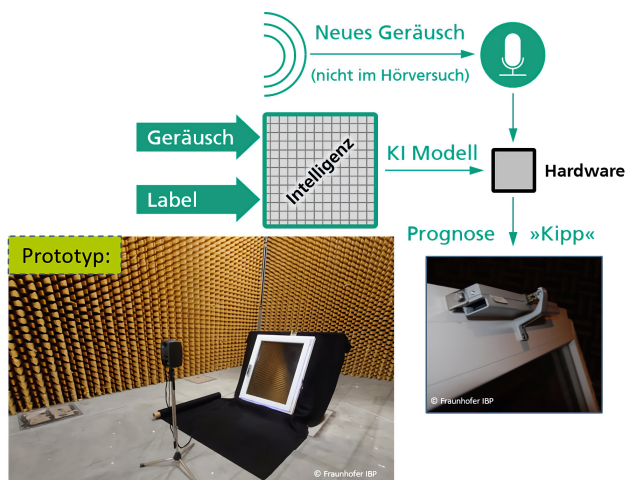


Bild 5 Lösungsansatz der intelligenten akustischen Fenstersteuerung: Geräusche werden analysiert und eine künstliche Intelligenz mit subjektiven Geräuschbewertungen trainiert, damit eine Belästigungsprognose durch nicht trainierte (neue) Geräusche ermöglicht und eine Bewegung des Fensters gesteuert werden kann. Fotos und Grafiken: Fraunhofer IBP

Lärmschutz genutzt werden. Geräusche, die nicht in der Datenbasis vorkommen, aber für den Nutzer einen belästigenden Geräuschcharakter aufweisen, bewirken so das Schließen des Fensters, noch bevor der maximale Schalldruckpegel erreicht wird (**Bild 5**).

Eine Personalisierung kann dabei in zwei Wegen ausgestaltet werden: zum einen Schallquellen, die anhand des Geräuschcharakters mit dem Label „lästig“ gekennzeichnet wurden, direkt für das Training des Systems heranzuziehen. Zum anderen ist die Anwendung durch direkte Geräuscherkennung denkbar. Der Nutzer kann das System dann durch die Auswahl der ihn belästigenden Schallquellen selbst personalisieren.

Anwendungsfälle

Temporäre, sich wiederholende Schallereignisse von mehreren Sekunden Dauer bieten potenzielle Anwendungsfälle der intelligenten akustischen Fenstersteuerung. Der Einsatz an Bahnstrecken oder Flughäfen ist damit denkbar. So wird das Fenster bspw. bereits geschlossen, wenn ein Flugzeug im Anflug ist und noch nicht über dem Wohnhaus fliegt. Ein ähnliches Szenario ist im Schienenverkehr zu finden: Bereits während der Anfahrt eines Zuges wird das Fenster bewegt. Als zusätzliche Integration in die Prognose könnten Flug- und Fahrpläne einbezogen werden, sofern sie ausreichend verlässlich sind.

Ein Mikrofon als akustischer Sensor sowie die künstliche Intelligenz zur Steuerung der natürlichen Belüftung kann schließlich auch in bestehende Smart Home-Systeme integriert werden. Denn nicht nur unzureichende Luftqualität (z. B. CO₂-Gehalt), schlechte Lichtverhältnisse oder eine unangenehme Temperatur (z. B. zu hell bzw. zu warm für den Schlaf) kann die Aufenthaltsqualität in Räumen mindern, sondern auch störender Schall.

Zusammenfassung

Dieser Beitrag berichtet beispielhaft über die Akustikgestaltung von Gebäudefassaden. Dabei werden schallabsorbierende Materialien für die Auskleidung von Fassaden und Balkone ange-

nommen. Ein am Fraunhofer IBP entwickeltes Prognosewerkzeug ermöglicht darauf aufbauend eine Einordnung des Einflusses derart ausgestalteter Fassaden auf die Schallimmission in der Umgebung. Diese Konzepte können zur Geräuschminderung, aber auch akustischen Gestaltung im urbanen Raum einen Beitrag leisten. Sie zeigen ferner Möglichkeiten auf, wie in Innenhöfen natürliche Naherholungsgebiete geschaffen werden können. Schließlich wird das Konzept einer intelligenten Fenstersteuerung vorgestellt, die unter Berücksichtigung der subjektiven Geräuschbewertung und geeigneten Geräuschanalyse die Lärmbelastung auch bei Nutzung natürlicher Belüftung in Gebäuden reduziert. ■

DANKSAGUNG

Wir danken der *Schüco International KG*, dem *Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg* und dem *Leistungszentrum Mass Personalization* (Fraunhofer Gesellschaft, Universität Stuttgart) für die finanzielle Förderung der vorgestellten Studien sowie für die Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] *D. Goecke, M. Koehler und Y. Aoki*: Bauakustische Gestaltung von städtischen Innenhöfen. In: Tagungsband DAGA 2021, Wien 2021.
- [2] Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm, 1998.
- [3] Lüften ohne Lärm – Akustische Fenstersteuerung. Hrsg.: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2016. www.ibp.fraunhofer.de/de/projekte-referenzen/akustische-fenstersteuerung.html
- [4] Lärmschutz durch KI – Die intelligenten Fenster und Lüftungskonzepte von Fraunhofer. Hrsg.: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2021. www.ibp.fraunhofer.de/de/ueber-uns/netzwerke-kooperationen/leistungszentrum-mass-personalisation/intelligente-fenster-und-lueftungskonzepte.html
- [5] *F. Schmidberger*: Eine mathematische Beschreibung des Belästigungspotentials durch Verkehrsgeräuschimmission in Gebäuden. Institut für Akustik und Bauphysik IABP, Stuttgart 2021.



David Goecke, M. Sc., M. Ac.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter,
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart



Dr. Peter Brandstät
Abteilungsleiter Akustik,
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart

Yohko Aoki, Ph. D.
Wissenschaftliche Mitarbeiterin,
Fraunhofer Institut für Bauphysik, Stuttgart
Fotos: Autoren