

Nr. 02/ Juni 2021

AKUSTIK JOURNAL



Der leise Flug der Eule ■ Virtuelle akustische Welten in Forschung und Praxis ■ Mit Feuchtigkeit gegen die Schalltransmission ■

Preisträgerinnen und Preisträger der DEGA 2021 ■ DAGA 2021 in Wien ■ International Year of Sound 2020–2021 ■ DEGA-Akademie-Kurse im Jahr 2021 ■ DEGA-Lärmschutzpreis: erster Preisträger ■ DEGA-Preis für Kommunikationsräume: erster Preisträger ■ Vorschau: DAGA 2022 in Stuttgart ■



Residential South

LAF **72.0** dB

NoiseScout - Autarke Lärmüberwachung

Neu mit automatischem Mikrofon-Selbsttest

- Ferngesteuerte Lärmmessungen
- Automatische Alarmauslösung
- Automatischer CIC-Selbsttest mit M2340
- Verschiedene Präsentationsmöglichkeiten
- Anbindung per LAN, WLAN oder 4G-Modem



Bauakustische Messungen

- Luft- und Trittschalldämmung nach DIN 4109 / ISO 16283
- Robustes und leichtes Mess-Kit
- Sequentielle oder parallele Messungen

Editorial

Strom an, Lärm aus! Oder?

Liebe Leserinnen und Leser!

Wenn man sich die letzten Umfragen des Umweltbundesamtes zur Lärmbelastung in Deutschland in Erinnerung ruft, stehen der Straßenverkehr und die Nachbarn ganz oben in der Rangliste der Verursacher allen (Lärm-)Übels.

Bei den Nachbarn ist das Belästigungsbild vielschichtig sowie in innerstädtischen und eher ländlichen geprägten Wohnquartieren unterschiedlich. In beiden geht es insbesondere in Mehrfamilienhäusern oft um schlechten baulichen Schallschutz. In den immer stärker verdichteten Städten geht es aber auch um schallharte Straßenräume, die ein „aggressives“ akustisches Klima entstehen lassen. Und selbst wenn es gelingt, Innenhöfe von lauten Straßenzügen abgewandt anzuordnen, gewährleisten diese dann häufig – ob man nun will oder nicht – eine gute Sprachverständlichkeit von Balkon zu Balkon oder auch von offenem Fenster zu offenem Fenster. Das liegt daran, dass sie einen viel zu großen Anteil schallharter Flächen aufweisen, die natürlich leichter zu pflegen sind als Rasen oder Pflanzen. Hier wäre es hilfreich, wenn die Planenden über Straßenräume nachdenken würden, die nicht von parallelen Glasfassaden eingefasst wären und einen höchstmöglichen Anteil an Grün an den Hauswänden aufwiesen. Das hätte nicht nur akustische Vorteile, es könnten auch Staub, Luftschadstoffe und Regenwasser gespeichert werden. Mehr Grün wäre aber natürlich auch die Lösung für schallharte Innenhöfe und für ein angenehmeres Kleinklima im Hof während der immer wärmeren Sommer.

In den eher durch Einfamilienhausbebauung geprägten Gebieten finden sich meist genügend Grünflächen, aber eben auch zahlreiche, immer häufiger per Akku elektrisch betriebene Geräte, die uns das Leben eigentlich erleichtern sollen. So schafft etwa die Luft-Wasser-Wärmepumpe zwar ein gutes Klima-Gewissen bei denjenigen, die sie betreiben. Zusammen mit den motorgetriebenen Geräten wie dem Rasenmäher, der Heckschere, der Kettensäge, der Schlagbohrmaschine, dem Laubbläser und anderen „nützlichen“ Hilfen nerven sie aber unsere Nachbarn. Selbst wenn alle diese Geräte einen Elektroantrieb hätten, erzeugen sie gerade nach Feierabend, am Wochenende und natürlich nur bei schönem Wetter (wie auch die Motorräder, aber das ist noch ein anderes Thema) einen „Klangteppich“ in den Gärten, auf den Terrassen und den Balkonen, der an eine „Industrialisierung des Wohnens“ denken lassen könnte. Abhilfe schafft hier nur körperliche Arbeit, gesunder Menschenverstand und in Ausnahmefällen ein freundliches Gespräch mit der Nachbarin oder dem Nachbarn.



*Christian Popp
Vorsitzender des Beirats der
LÄRMKONTOR GmbH*

Beim Straßenverkehr lässt sich hingegen recht schnell diagnostizieren, dass es zu viele, zu große, zu schwere und zu schnelle Autos sind, die für die hohen Belastungen sorgen. Wenn diese alle mit einem Elektroantrieb ausgestattet wären, hätten sie gegenüber den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren insbesondere im niedrigen Geschwindigkeitsbereich auf den ersten Blick sicher Vorteile. Diese Vorteile sind aber spätestens dann dahin, wenn AVAS (Acoustic Vehicle Alerting System) mit einem an ein Raumschiff erinnernden Geräusch aktiviert worden ist.

Statt ausschließlich nach technischen Antworten zu suchen, wäre es sicher zukunftsweisender etwa im Rahmen einer Mobilitätswende darüber nachzudenken, den Menschen mehr vom Straßenraum abzugeben, die das Radfahren, das Zufußgehen oder die ÖPNV-Nutzung bevorzugen. Ein bisschen Fläche bliebe dann vielleicht auch noch für die Außengastonomie und den Einzelhandel übrig. Das würde die Stadt sicher wieder ein bisschen lebenswerter machen und es könnten Familien leichter davon überzeugt werden, zu bleiben und nicht auf das Land zu fliehen.

Ihr
Christian Popp

Inhalt

Akustik Journal Nr. 02 / Juni 2021

- **5 Aktuelles**
- **9 Fachartikel**
 - 9 Der leise Flug der Eule**
Thomas F. Geyer, Christoph Fritzsche, Ennes Sarradj, Hermann Wagner
 - 18 Virtuelle akustische Welten in Forschung und Praxis**
Michael Vorländer
 - 33 Mit Feuchtigkeit gegen die Schalltransmission**
Marcus Hermes
- **47 Ehrungen der DEGA**
 - 47 Preisträgerinnen und Preisträger 2021**
- **47 Menschen**
 - 47 Gratulationen und Personalien**
- **48 Veranstaltungen**
 - 48 Veranstaltungshinweise**
 - 48 DAGA 2021
 - 50 DEGA-Akademie: Kurs „Strömungsakustik 1 – Grundlagen, Auslegungen und Anwendungen“
 - 50 DEGA-Akademie: Kurs „Strömungsakustik 2 – Theorie, numerische Verfahren und Anwendungen“
 - 51 DEGA-Akademie: Kurs „Raumakustik kompakt“
 - 51 DEGA-Akademie: Kurs „Psychoakustik – Grundlagen und Anwendungen“
 - 52 DEGA-Akademie: Kurs „DEGA-Schallschutzausweis“
 - 52 14. DEGA-Symposium „Interaktive Simulation und Auralisation von Räumen“
 - 53 Vorschau**
 - 53 DAGA 2022
 - 54 Veranstaltungsrückblick**
 - 54 24. Tag gegen Lärm 2021
 - 55 Veranstaltungskalender**
- **56 DEGA**
 - 56 Nachrichten und Mitteilungen aus der Fachgesellschaft**
 - 56 Einladung DEGA-Mitgliederversammlung
 - 56 Zuschüsse für Studierende und Promovierende zur DAGA 2021
 - 57 Fachausschüsse und Fachgruppen der DEGA stellen sich vor: FA Elektroakustik**
 - 58 Fachausschüsse / Fachgruppen**
 - 62 Mitglieder / Fördermitglieder**
- **64 Normen / Richtlinien**
 - 64 Neue Regelwerke zu den Themen Akustik und Lärmminderung (Feb. 2021 – Mai 2021)**
- **66 Publikationen**
 - 66 Zeitschriften, Tagungsbände, Empfehlungen und Memoranden, Broschüren etc.**
 - 68 Buchrezension**
- **69 Aus der Industrie**
- **70 Impressum**

Aktuelles

Nachrichten aus der Akustik

■ DAGA 2021: 47. Jahrestagung für Akustik



Die 47. Jahrestagung für Akustik wird vom 15.–18.08.2021 in Wien stattfinden. Alle Informationen zur Tagung (Termin, Deadlines Vortrags- und Rahmenprogramm) finden Sie auf den Seiten [48f](#) oder unter <https://www.daga2021.eu/> ■

■ DAGA-Posterpreis: Bewerbungen bis 08.08.2021

Bei der diesjährigen DAGA-Tagung wird es wieder eine Auszeichnung der besten Poster geben. Wie im letzten Jahr erfolgt die Bewertung durch eine Jury, und die Preisträgerinnen und Preisträger werden vor dem Plenarvortrag am Mittwoch, den 18.08.2021, bekannt gegeben (um 11:40 Uhr im Saal Strauß 2+3).

Für einen ausreichenden zeitlichen Vorlauf werden alle interessierten Poster-Autor(inn)en gebeten, ihr Poster im Rahmen des Poster-Uploads (<https://www.daga2021.eu/autoren>) bis spätestens **Sonntag, den 08.08.2021** hochzuladen und das entsprechende Feld „Teilnahme am Posterpreis“ zu aktivieren. Voraussetzung für die Prämierung ist, dass das Poster während der DAGA-Tagung auch tatsächlich präsentiert wird. Dies betrifft sowohl Vor-Ort-Poster als auch Online-Poster. ■

■ Zuschüsse für Studierende und Promovierende zur DAGA 2021

Die DEGA vergibt auch in diesem Jahr wieder Zuschüsse zum Besuch der Tagung DAGA 2021 in Wien, um jungen Akustikerinnen und Akustikern die Teilnahme zu erleichtern. Detaillierte Informationen erhalten Sie auf S. [56f](#). ■

■ Lothar-Cremer-Preis und DEGA-Studienpreis: Vorschläge einreichen

Alle Mitglieder der DEGA sind eingeladen, Kandidatinnen und Kandidaten für den Lothar-Cremer-Preis vorzuschlagen, der während der DAGA 2022 in Stuttgart verliehen wird. Bitte senden Sie Ihren Vorschlag mit Würdigung, Lebenslauf, Publikationsliste und Veröffentlichungen bis spätestens 31. August 2021 in dreifacher Ausfertigung in Papierform an die Geschäftsstelle der DEGA. Es sollten solche schriftlichen Arbeiten beigelegt werden, auf die sich der Auszeichnungsvorschlag inhaltlich begründet (z. B. Dissertation, ausgewählte Zeitschriftenaufsätze), siehe auch <http://www.dega-akustik.de/preise-grants/lothar-cremer-preis>.

Ebenso können Kandidatinnen und Kandidaten für den DEGA-Studienpreis von allen Hochschullehrenden bis zum 15. September 2021 vorgeschlagen werden, der ebenfalls während der DAGA 2022 in Stuttgart verliehen wird. Bitte fügen Sie Ihrer Begründung einen tabellarischen Lebenslauf, die Abschlussarbeit (Master, Bachelor, Diplom o. ä.) und eine Würdigung durch eine weitere Fachkraft bei. Alle Dokumente sollen ausschließlich elektronisch an dega@dega-akustik.de eingereicht werden. Die Arbeit muss bereits benotet worden sein; andererseits darf die Abgabe nicht mehr als ein Jahr zurückliegen (Benotung und Abgabedatum bitte angeben). Weitere Details stehen auf <http://www.dega-akustik.de/preise-grants/dega-studienpreis>.

Beachten Sie auch die aktuellen Preisträgerinnen und Preisträger des Jahres 2021 (siehe Seite [47](#)), die während der kommenden DAGA am 16.08.2021 ihre Auszeichnungen erhalten werden. ■

■ International Year of Sound 2020–2021



Das Jahr 2021 steht wie schon 2020 unter dem Motto „International Year of Sound“. Eine Übersicht über Motivation, Initiativen und Termine finden Sie auf der Seite <https://sound2020.org>.

Auch die DEGA beteiligt sich am International Year of Sound 2020–2021 mit eigenen Veranstaltungen und Publikationen; bitte beachten Sie vor allem:

- Erstmalige Verleihung des DEGA-Lärmschutzpreises, siehe S. [7](#)
- Erstmalige Verleihung des DEGA-Preises für Kommunikationsräume, siehe S. [6](#)
- Tagung DAGA 2021, siehe S. [48f](#)
- 14. DEGA-Symposium, siehe S. [52](#)
- YouTube-Videos „Noisella lehrt Akustik“ (Infoserie für Kinder), siehe S. [7](#)

Weiterhin sei auf frühere Publikationen der DEGA hingewiesen, siehe

<https://www.dega-akustik.de/sound2020>:

- YouTube-Video „Faszination Akustik – eine Reise durch die Welt des Schalls“ anlässlich des 50-jährigen DAGA-Jubiläums
- YouTube-Video „So klingt meine Welt“ aus den Einsendungen zum gleichnamigen Wettbewerb für Schülerinnen und Schüler im Jahr 2019
- YouTube-Videos vom 13. DEGA-Symposium am 25.09.2020 unter dem Motto „Akustik verbindet“
- Tagungsband zur Jahrestagung DAGA 2020, inklusive Sonderteil zum 50-jährigen Tagungs-Jubiläum
- Tagungsband zur Jahrestagung DAGA 2020 inklusive eines Sonderteils zum 50-jährigen Tagungs-Jubiläum
- Editorial „2020 – das Internationale Jahr des Sounds“ im Akustik Journal, Ausgabe 01/20
- Pressemitteilung der DEGA zum International Year of Sound ■

■ **DEGA-Akademie**

Kurs „Strömungsakustik 1 – Grundlagen, Auslegungen und Anwendungen“
28.–29.09.2021, Erlangen und online (hybrid)

Kurs „Strömungsakustik 2 – Theorie, numerische Verfahren und Anwendungen“
30.09.–01.10.2021, Erlangen und online (hybrid)

Kurs „Raumakustik kompakt“
08.10.2021, Braunschweig

Kurs „Psychoakustik – Grundlagen und Anwendungen“
11.–13.10.2021, online

Kurs „DEGA-Schallschutzausweis“
12.11.2021, online

Ausführliche Informationen zum jeweiligen Kurs finden Sie auf Seite 50ff oder unter <https://www.dega-akustik.de>. ■

■ **DEGA-Preis für Kommunikationsräume: erster Preisträger**

Zum International Year of Sound 2020-2021 vergibt die DEGA erstmals den neuen DEGA-Preis für Kommunikationsräume. Dieser Preis prämiiert öffentlich zugängliche Räume für die Sprachkommunikation mit hervorragender Raumakustik.

Aus den eingesandten Bewerbungen hat die Jury als Gewinner-Beitrag eine neu gebaute Pfarrkirche in Holzkirchen gewählt, deren Raumakustik durch die Firma Müller-BBM GmbH in Planegg gestaltet wurde. Die Kirche zeichnet sich durch eine Symbiose von Raumakustik und Architektur in einem Gesamtkonzept aus, bei dem die verschiedenen Disziplinen eng kooperiert haben. Das Projekt ist insofern vorbildlich, da es sich um ein architektonisch-akustisches Gesamtkonzept handelt, bei dem die Akustik proaktiv in den Planungs- und Entwurfsprozess einbezogen wurde, statt in einer vorhandenen Bausubstanz akustische Probleme zu reduzieren. Die akustischen Maßnahmen sind so gestaltet, dass sie das ästhetische Konzept des Raumes unterstützen und quasi unsichtbar im Hintergrund wirken. Obwohl der Raum aufgrund seiner Form akustisch fordernd ist, konnte eine sehr gute Akustik für die variable Nutzung des Raums erzielt werden. Mit dem DEGA-Preis für Kommunikationsräume wird somit eine Arbeit prämiert, die eine exemplarische Kooperation zwischen Akustik und Architektur zur Schaffung eines ästhetischen, audiovisuellen Gesamtkonzepts aufweist. Die ausführliche Bekanntgabe des Preises und die Übergabe der Urkunde erfolgt während der Tagung DAGA 2021 (Termin und Ort werden noch bekannt gegeben). Weitere Informationen finden Sie unter <https://www.dega-akustik.de/preis-fuer-kommunikationsraeume> ■



Sie tragen Verantwortung für akustische Bewertungen?

Mit uns können Sie Ihren Messgeräten vertrauen.

Jetzt
unverbindlich
beraten
lassen.

Um verlässliche Messungen durchzuführen, müssen Ihre Messmittel in regelmäßigen Abständen rückgeführt bzw. kalibriert werden. Nur so können Sie sicherstellen, dass Sie reproduzierbare Messungen durchführen und mit gleichbleibend hoher Qualität arbeiten.

Kalibrierdienstleistungen für Akustik und Audiometrie

- höchstes Niveau im DAkS-akkreditierten Prüflabor
- Druck- und Freifeldkalibrierungen
- Eichung von Schallpegelmessern als Rundum-Service

■ DEGA-Lärmschutzpreis: erster Preisträger



Zum International Year of Sound 2020-2021 vergibt die DEGA erstmals den neuen DEGA-Lärmschutzpreis. Dieser Preis prämiiert umgesetzte, innovative Lösungen für den Lärmschutz und soll damit zu einem besseren Bewusstsein für die Bedeutung des Lärms als gesellschaftliche Aufgabe beitragen.

Aus den eingesandten Bewerbungen hat die Jury als Gewinner-Beitrag die Einbindung des Diffraktions-Effektes in die Konstruktion einer Lärmschutzwand durch die Firma 4Silence B. V. in Enschede (NL) bestimmt. Hierbei handelt es sich um die Idee, neben der Schirmwirkung der Wand (anhand ihrer Höhe) und neben Absorptions-Effekten (durch entsprechende Verkleidungen oder Aufsätze) eine Beugung des Schalls durch eine schallweiche Fläche auf der Oberkante der Wand zu erreichen. Dadurch kann die gewünschte Lärminderung bei etwas geringeren Wandhöhen realisiert werden. Dieses Konzept wurde in der Vergangenheit vorwiegend im Labor bzw. an Universitäten entwickelt. Die Firma 4Silence hat hieraus ein praxistaugliches und marktreifes Produkt umgesetzt. Mit dem DEGA-Lärmschutzpreis wird somit ein gelungener Technologietransfer von der Theorie in die Praxis prämiert.

Die Bekanntgabe des Preises erfolgte zum Tag gegen Lärm – International Noise Awareness Day am 28.04.2021. Die Übergabe der Urkunde soll zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen, sobald die Pandemie-Lage dies erlaubt.

Weitere Informationen zum DEGA-Lärmschutzpreis erhalten Sie unter <https://www.dega-akustik.de/laermschutzpreis>. ■

■ Rückblick auf den Tag gegen Lärm2021

Unter dem Motto „Immer noch zu laut!?“ fand am 28. April 2021 der 24. Tag gegen Lärm – International Noise Awareness Day statt.

Die zentrale Veranstaltung der DEGA stellte die Verdichtung von Innenstädten, den akustischen Beitrag der zunehmenden Elektromobilität im Verkehr sowie die Geräuschemissionen von im Freien eingesetzten elektrischen Geräten und Maschinen, z. B. in Gärten oder auf Baustellen, in den Mittelpunkt.

Detaillierte Informationen zur Veranstaltung bzw. zum ganzen Aktionstag erhalten Sie im Rückblick auf Seite 54.

Übrigens: Das Datum des 25. Tag gegen Lärm – International Noise Awareness Day 2022 steht bereits fest. Er wird am 27. April 2022 stattfinden. ■



■ 14. DEGA-Symposium

Unter dem Motto „Interaktive Simulation und Auralisation von Räumen“ findet das 14. DEGA-Symposium vom 12. bis 13. November 2021 in Berlin statt.

Verantwortlich für das Programm ist dieses Mal der Fachausschuss Virtuelle Akustik der DEGA. Weitere Informationen zum Symposium erhalten Sie auf S. 52. ■



■ Noisella lehrt Akustik – eine YouTube-Infoserie für Kinder



Anlässlich des Tag gegen Lärm 2021 und des International Year of Sound 2020–2021 hat die DEGA eine Video-Infoserie für Kinder gestartet. Die Figur „Noisella“ bringt dabei Kindern das Thema Akustik näher: Was sind Geräusche? Wie entstehen Sie? Was passiert dabei? Die folgenden YouTube-Videos sind über <https://www.tag-gegen-laerm.de/publikationen/noisella-lehrt-akustik> zu sehen:

- Folge 1: Was sind Geräusche?
- Folge 2: Lasst uns Geräusche kennenlernen
- Folge 3: Fang die Geräusche ein!
- Folge 4: Erkenne die Geräusche
- Folge 5: Schöne Geräusche und laute Orte
- Folge 6: Lausche dem Geräusch! Schauen Sie doch einmal rein! ■



Ingenieur (m/w/d) – Schwerpunkt Schallimmissionsschutz

Wir sind ein Team von 15 Leuten und pflegen eine offene und interdisziplinäre Gesprächskultur. Unsere Ideen tauschen wir häufig auf ausgedehnten Spaziergängen oder bei einem mittäglichen BBQ auf der sonnigen Dachterrasse aus. Wir planen gemeinsam unsere Strategien, arbeiten selbständig an unseren jeweiligen Projekten und feiern zusammen unsere Erfolge. Dadurch sind wir zum Weltmarktführer für Software zur Berechnung von Umgebungslärm und Schall in Räumen geworden.

Als idealer Bewerber sind Sie:

- vertraut mit den einschlägigen Normen und Richtlinien des Immissionsschutzes
- erfahren mit der Lärmprognose unter Anwendung von Software
- weder im deutschsprachigen noch im englischsprachigen Raum auf den Mund gefallen
- mit Begeisterung dabei, abwechslungsreiche Projekte durchzuführen
- qualitätsbewusst, kundenorientiert und technikbegeistert

Ihre Aufgaben:

- Sie identifizieren technologische Trends und beraten unsere Entwicklung an der Schnittstelle zwischen Anwender und Entwicklung
- Sie bringen Ideen für hilfreiche Funktionen und deren Umsetzung mit ein
- Sie helfen unseren Kunden bei komplexen technischen Problemstellungen
- Sie unterstützen bei der Softwareanwendung im Rahmen verschiedenster nationaler und internationaler Projekte
- bei Interesse unterstützen Sie in diversen Fachgremien und bei der Normungstätigkeit

- durch Produktdemonstrationen vermitteln Sie Ihr Expertenwissen (z. B. via Webpräsentation oder in Beratungsgesprächen)

Unser Angebot:

- individuelle Weiterbildungsmöglichkeiten und die Chance, eigene Ideen in einem angenehmen Betriebsklima zu verwirklichen
- attraktives, leistungsgerechtes Gehalt, flexible Arbeitszeiten und 30 Tage Urlaub
- modernes Büro mit stilvollem Ambiente und lockerer Atmosphäre, z. B. gelegentlichem Feierabendbier
- ob Radfahrer (Duschkmöglichkeit vorhanden), Hundebesitzer, Kaffee- oder Teetrinker – bei uns fühlt sich jeder wohl
- exklusive Events & Sportaktionen im Team

Haben wir Sie neugierig gemacht?

Dann senden Sie uns bitte Ihre aussagekräftigen Bewerbungsunterlagen mit möglichem Eintrittstermin und Gehaltsvorstellungen ausschließlich per E-Mail an: bewerbung@datakustik.com.

Wenn Sie Rückfragen zu der Position haben, rufen Sie uns gerne an unter +49 8105 77467 0

Alle personenbezogenen Formulierungen in dieser Stellenanzeige sind geschlechtsneutral zu betrachten.

Der leise Flug der Eule

Thomas F. Geyer, Christoph Fritzsche, Ennes Sarradj, Hermann Wagner

Der lautlose Flug der Eulen ist eines der bekanntesten Beispiele für die Anpassungsfähigkeit der Natur und Vorbild für viele Innovationen auf dem Gebiet der Strömungsakustik mit dem Ziel der Lärminderung an technischen Anwendungen wie Ventilatoren oder Windenergieanlagen. Die Ursachen dieses leisen Flugs sind, neben der geringen Fluggeschwindigkeit der Eule, drei spezielle Anpassungen ihres Gefieders: Eine kammartige Struktur an der Flügelvorderkante, Fransen an der Hinterkante und ein weicher und luftdurchlässiger Flaum, der die Flügel bedeckt. Bisherige Untersuchungen zeigen, dass der Hakenkamm in erster Linie eine aerodynamische Funktion hat, indem er vor allem bei hohen Anstellwinkeln, das heißt in der Flugphase kurz vor dem Ergreifen der Beute, für mehr Auftrieb und Stabilität sorgt. Jedoch zeigt sich bei diesen Flugkonditionen auch ein akustischer Vorteil, indem er starke Schallquellen an der Flügelspitze verhindert. Die Fransen an der Flügelhinterkante sowie die luftdurchlässige Beschaffenheit des Gefieders tragen deutlich zur Geräuschminderung bei, indem sie die Turbulenz in der Grenzschicht beeinflussen sowie einen allmählichen Druckausgleich zwischen Flügelunterseite und -oberseite ermöglichen. Diese Eigenschaften sorgen dafür, dass das Fluggeräusch der Eule bei mittleren und hohen Frequenzen ab etwa 2 kHz deutlich unter dem anderer Raubvögel liegt. Dies konnte sowohl in Überflugmessungen an lebenden Vögeln sowie in Windkanalmessungen an Flügelpräparaten nachgewiesen werden.

Einleitung

Der leise Flug der Eule fasziniert die Menschen schon seit langem und ist Inhalt einer ganzen Reihe umfangreicher wissenschaftlicher Publikationen (siehe zum Beispiel [1–5]). Darüber hinaus dient er als Motivation für viele technische Neuerungen auf dem Gebiet der Strömungsakustik, wozu vor allem Modifikationen an Tragflügeln, Rotorblättern von Windenergieanlagen und Ventilatorschaufeln zählen.

Von Interesse sind bei der Auseinandersetzung mit dem leisen Eulenflug im Wesentlichen zwei Fragestellungen: Was genau sind die Ursachen des leisen Flugs? Und wie leise fliegen Eulen wirklich? Diesen Fragen soll im vorliegenden Artikel nachgegangen werden. Dem interessierten Leser wird jedoch empfohlen, ebenfalls die hier zitierte Fachliteratur zu lesen.

The silent flight of owls

The silent flight of owls is a famous example for nature's ability to adapt to certain requirements, and a motivation for many novel technologies aiming at the reduction of aerodynamic noise from technical applications such as fans and wind turbines. The mechanisms responsible for the silent flight are, beside the low flight speed of the owl, a comb-like structure at the leading edge of the wing, long and soft fringes at the trailing edge and a soft and flow permeable downy surface of the feathers. Past investigations have shown that the leading edge comb primarily serves an aerodynamic function, by increasing lift and adding stability at high angles of attack. This is especially necessary in the final phase of the flight, shortly before the owl catches its prey. More recent measurements also show an acoustic benefit of the hooks, which prevent the formation of a strong noise source at the wing tip at these conditions. The trailing edge fringes and the permeable plumage of the owls lead to a manipulation of the turbulence in the boundary layer and enable a gradual pressure compensation between the pressure side and the suction side of the owl wing. These adaptations result in a significant reduction of the gliding flight noise of owls compared to that of other, non-silently flying birds of prey at medium and high frequencies above approximately 2 kHz. This has been confirmed both in flyover measurements on flying owls as well as in wind tunnel measurements on prepared wings.

Ursachen des leisen Flugs

Ein erster, oft übersehener Grund für den leisen Flug der Eule im Vergleich zu anderen Raubvögeln ist ihre deutlich geringere Fluggeschwindigkeit. So fliegen Eulen im Gleitflug im Durchschnitt etwa 6 bis 10 m/s [6], während die Durchschnittsgeschwindigkeit des Bussards (*Buteo buteo*) im Schlagflug bei etwa 12 bis 13 m/s und die des Sperbers (*Accipiter nisus*) bei 10 bis 11 m/s liegt [7]. Im Sturzflug sind für den Wanderfalken (*Falco peregrinus*), einen der schnellsten Raubvögel, sogar Geschwindigkeiten von fast 90 m/s gemessen worden [8]. Ermöglicht wird der Eule dieser langsame Flug durch die geringe Flächenlast und die große Flügelfläche bei vergleichsweise geringer Flügelstreckung, also das Verhältnis von Spannweite zu Flügeltiefe [9] sowie einen hohen Koeffizienten [10]. Die deutlichen Un-



Abb. 1: Fotografie eines Uhus.

terschiede in den Fluggeschwindigkeiten spiegeln sich natürlich in den unterschiedlichen Jagdstrategien der Raubvögel wider: Die meist nachtaktive Eule fliegt langsam und in geringer Höhe oder sitzt auf einer etwas erhöhten Position, wie einem Pfahl oder einem Baum, und ortet ihre Beute (vor allem Mäuse, Insekten und andere Kleintiere) akustisch [11]. Dabei hilft neben dem sehr guten Gehör [12] eine spezielle, asymmetrische Anordnung der Ohren. Zusätzlich besitzen Eulen einen sogenannten Gesichtsschleier, eine kranzförmige Einfassung im vorderen Bereich des Kopfes aus Federn (siehe Abbildung 1), der die Schallwellen in Richtung der Ohren lenkt. Die Jagd erfolgt dann bei der Eule ebenfalls mit

Abb. 2: Flügel einer Schleiereule.



vergleichsweise geringer Geschwindigkeit. Andere, nicht leise fliegende Raubvögel wie der Bussard, der Sperber oder der Falke hingegen sind tagaktiv. Sie orten ihre Beutetiere optisch und jagen diese daraufhin durch schnelle Annäherung, so dass die Beutetiere schlicht keine Zeit zur Flucht mehr haben.

Bei der Verdeutlichung des Einflusses der Fluggeschwindigkeit auf das entstehende Geräusch im Gleitflug soll eine kurze Beispielrechnung helfen: Betrachtet man den Vogelflügel vereinfacht als eine ebene Platte, so wächst nach der Theorie die durch die Umströmung erzeugte Schallleistung P mit der fünften Potenz der Strömungsgeschwindigkeit U an, es gilt also $P \sim U^5$ [13]. Eine angenommene Reduktion der Fluggeschwindigkeit von 10 % macht sich daher schon in einer Abnahme des Schallleistungspegels von etwa 2,3 dB bemerkbar. Für eine technische Anwendung ist dies natürlich nur beschränkt möglich.

Ein weiterer, weitaus interessanterer Grund für den leisen Flug der Eule sind die speziellen Anpassungen des Eulengefieders. Obwohl bereits seit Anfang des letzten Jahrhunderts durch Publikationen aus dem Gebiet der Zoologie [14] bekannt, wurden diese Anpassungen schließlich 1934 in einem in einer technischen Fachzeitschrift veröffentlichten Artikel von Graham [15] hinsichtlich ihrer Bedeutung für den leisen Flug der Eule zusammenfassend beschrieben. Diese Anpassungen sind

- eine kammartige Struktur an der Vorderkante des Eulenflügels, bestehend aus kleinen, aufwärts gebogenen Häkchen in der Federfahne der vordersten Schwungfeder,
- Fransen an der Flügelhinterkante, gebildet aus den Fahnen der Federn im Bereich der Hinterkante, und
- ein sehr weicher und luftdurchlässiger Flaum, der die Ober- und Unterseite der Flügel bedeckt.

Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Fotografie des Flügels einer Schleiereule (*Tyto alba*). Im Folgenden werden diese drei Gefiederanpassungen hinsichtlich ihres Beitrags zum leisen Flug im Detail besprochen. Soweit vorhanden, geschieht dies auf Grundlage von Ergebnissen aus der Literatur oder aus eigenen Messungen der Autoren.

Der Hakenkamm an der Flügelvorderkante

Der Hakenkamm befindet sich an der Außenfahne der vordersten Schwungfeder, die die Vorderkante des Eulenflügels bildet. Über diese Anpassung existieren etliche biologische Arbeiten, die die genaue Länge, Form sowie die mechanischen Eigenschaften der Häkchen detailliert beschreiben [16, 17]. Dabei besteht breiter Konsens darüber, dass der Hakenkamm im Wesentlichen die Aerodynamik des Flügels beeinflusst [6, 17, 18, 19, 20]. Die kleinen,

gebogenen Häkchen, welche in Abbildung 3 im Detail dargestellt sind, sorgen dafür, dass die Strömung bei hohen Anstellwinkeln des Flügels nach außen, das heißt zur Flügelspitze hin, abgelenkt wird. Bei niedrigen Anstellwinkeln scheint sich dieser Effekt umzukehren [19, 20], wobei hier sicherlich weiterer Forschungsbedarf besteht. Zusätzlich sorgen die Häkchen dafür, dass die Strömung auf der Flügeloberfläche laminar, das heißt nicht turbulent, bleibt. An den einzelnen Häkchen entsteht zudem Turbulenz, so dass der Hakenkamm zur Ausbildung einer sogenannten Wirbelschicht führt [18]. Insgesamt resultieren diese Effekte in einer Verbesserung der Aerodynamik, vor allem bei hohen Anstellwinkeln. Auf diese Weise hilft der Hakenkamm dabei, der Eule das Fliegen mit langsamer Geschwindigkeit und hohen Anstellwinkeln zu ermöglichen, was vor allem in der letzten Phase der Jagd, kurz vor dem Ergreifen der Beute, sowie bei Wendemanövern wichtig ist.

Deutlich weniger Erkenntnisse gibt es zum Einfluss des Hakenkamms auf das entstehende Fluggeräusch. Graham [15] vermutet bereits, dass es durch den Hakenkamm zu einer lokalen Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit kommt, bevor die Strömung auf die eigentliche Vorderkante trifft. In einer frühen Studie von Kroeger et al. [18] aus dem Jahr 1971, die bereits die Nutzbarmachung der Mechanismen der Eule für die Flugindustrie zum Ziel hat, wurden Überflugmessungen an Streifenkäuzen durchgeführt. Dabei flogen die Eulen auf einem bestimmten Pfad im Inneren eines Hallraums, in dem sich ein Mikrofon befand. Im Rahmen dieser Studie wurde auch der Einfluss des Hakenkamms untersucht, indem dieser nach einer ersten Messung entfernt und die Messung anschließend wiederholt wurde. Die Ergebnisse weisen jedoch eine sehr große Streuung auf, so dass eine akustische Wirkung des Hakenkamms zwar naheliegend ist, aber nicht zweifelsfrei festgestellt werden kann. Eine ähnliche Messung wurde kurz darauf, im Jahr 1973, auch von Neuhaus et al. [6] veröffentlicht. Diese Ergebnisse legen ebenfalls eine zumindest geringfügige akustische Wirkung des Hakenkamms nahe, auch wenn die verwendete Messtechnik und die aus Sicht eines Akustikers etwas eigenwillige Darstellung der Ergebnisse eine eindeutige Interpretation erschweren.

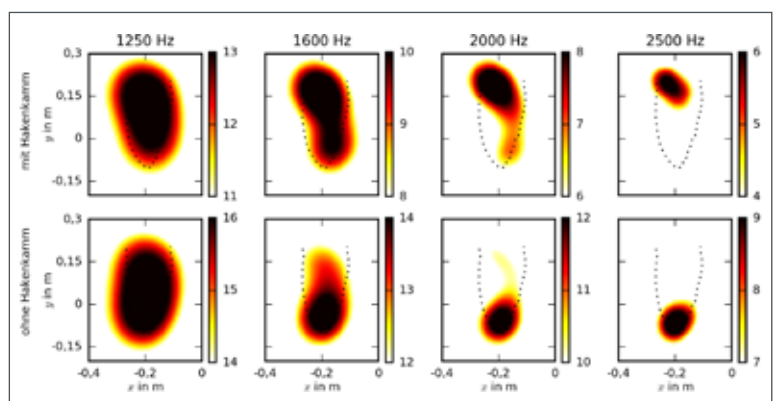
Eine aktuellere Untersuchung [21] zum Einfluss des Hakenkamms auf das Fluggeräusch wurde von den Autoren in Form von akustischen und aerodynamischen Messungen an Flügelpräparaten im Windkanal [22] durchgeführt. Dabei wurden zuerst Messungen an einem intakten Flügel einer Schleiereule durchgeführt. Anschließend wurde der Hakenkamm mit Hilfe eines Skalpell entfernt und die Messungen wurden wiederholt. Die akustischen Messungen



Abb. 3: Mikroskopische Aufnahme der Haken an der Vorderkante des Flügels einer Schleiereule.

erfolgten mit Hilfe einer Anordnung aus mehreren Mikrofonen, einem sogenannten Mikrofonarray. Diese Technik bietet den Vorteil, dass durch spezielle Berechnungsalgorithmen sowohl der Ort als auch die Stärke von Schallquellen bestimmt werden kann [23]. Insgesamt konnten die Messergebnisse zum einen die aus der Literatur bekannten Effekte des Hakenkamms auf die Aerodynamik bestätigen. So sorgen sie für eine leichte Erhöhung der aerodynamischen Auftriebskraft vor allem im Bereich hoher Anstellwinkel sowie für eine geringere Verformung des Flügels, was insgesamt zu einer größeren Stabilität beim Flug führt. Zusätzlich zeigte sich ein sehr interessanter akustischer Effekt, der in Abbildung 4 dargestellt ist. Bei hohen Anstellwinkeln (Anm.: In der Abbildung wird das beispielhaft für einen geometrischen Anstellwinkel von 24° gezeigt, was im freien Flug jedoch einem deutlich niedrigeren Anstellwin-

Abb. 4: Schallquellen am präparierten Flügel einer Schleiereule mit und ohne Hakenkamm bei einem geometrischen Anstellwinkel von 24° und einer Strömungsgeschwindigkeit von 10 m/s (Strömung von links nach rechts, obere Reihe: Hakenkamm intakt, untere Reihe: Hakenkamm entfernt, Spalten zeigen Ergebnisse für das jeweilige Terzband mit Mittenfrequenzen von 1.250 Hz bis 2.500 Hz).



kel entsprechen würde.) verhindert der Hakenkamm die Ausbildung einer starken Schallquelle an der Flügelspitze. Stattdessen befinden sich die Schallquellen im Fall des intakten Hakenkamms auf der Oberfläche des Flügels und sind zudem deutlich weniger stark. Dies ist vor allem in den Bildern für Terzfrequenzen ab 1.600 Hz deutlich sichtbar. Das lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Vorderkantenhäkchen vor allem bei hohen Anstellwinkeln wirksam sind, wie sie zum Beispiel kurz vor dem Ergreifen der Beute auftreten. In diesem für den Jagderfolg kritischen Flugzustand wirken die Häkchen stabilisierend, indem sie die Deformation des Flügels und Flügelschwingungen verringern, sie erhöhen die Auftriebskraft und tragen zur weiteren Geräuschkürzung bei.

An dieser Stelle soll nicht unerwähnt bleiben, dass der Hakenkamm der Eule diejenige Anpassung ist, die wahrscheinlich am häufigsten als Vorbild für Modifikationen an technischen Tragflügeln dient. So ist vor allem die Vorderkantenzähnelung davon inspiriert, die zur Lärmreduzierung an Tragflügeln in turbulenter Zuströmung zum Einsatz kommt (siehe zum Beispiel [24, 25]). Auch hier wirkt sich die Zähnelung zusätzlich positiv auf die Aerodynamik aus, da sie zur Ausbildung von Wirbeln führt, welche die Grundströmung stabilisieren.

Der Fransensaum an der Hinterkante

Der sogenannte Fransensaum an der Hinterkante des Eulenflügels wird durch die ausgefranseten Fahnen der hinteren Schwungfedern im Hand- und Armbereich des Flügels gebildet. Während die einzelnen sogenannten Federäste einer Schwungfeder üblicherweise durch ein System von sogenannten Haken- und Bogenfasern miteinander verbunden sind, so fehlen diese Fasern an der Spitze der Schwungfedern der Eule, wodurch die Federäste in diesem Bereich weniger stark untereinander verbunden sind und derartige flexible Fransen entstehen. Abbil-

Abb. 5: Mikroskopaufnahme der Fransen an der Hinterkante des Flügels einer Schleiereule.



dung 5 zeigt eine Nahaufnahme dieser Fransen am Flügel einer Schleiereule.

Auch über den Fransensaum der Eule existieren Forschungsarbeiten aus dem Bereich der Biologie, in welchen Parameter wie die Länge, Orientierung und Dichte der Federäste detailliert beschrieben sind [26]. Zur Wirksamkeit des Fransensausms in Bezug auf das leise Fluggeräusch der Eule bietet die Literatur ebenfalls einige sehr aufschlussreiche Erklärungen (siehe zum Beispiel [15]). Zum einen kommt es durch die Luftdurchlässigkeit der Fransen zu einem allmählichen Druckausgleich zwischen der Oberseite (die sogenannte Saugseite) und der Unterseite (Druckseite) des Flügels. Dadurch ist der Druckunterschied an der eigentlichen Hinterkante des Flügels weniger stark und es entsteht weniger Schall. Zum anderen werden durch die Fransen kleine, in der Strömung über die Oberfläche enthaltene turbulente Wirbel quasi ausgekämmt, so dass diese bei der Interaktion mit der Hinterkante ebenfalls weniger Schall erzeugen. Durch die Form der Fransen nimmt zusätzlich auch die Effektivität ab, mit der Schall an der Hinterkante gestreut wird [27]. Darüber hinaus wird auch der Flexibilität des Fransensausms eine akustische Wirkung zugeschrieben. So wird nach Kroeger et al. [18] das Spektrum der Turbulenz in der Grenzschicht, die sich über dem Flügel ausbildet, durch die Flexibilität zu tieferen Frequenzen verschoben. Da diese Turbulenz letztlich an der Hinterkante in Schall umgewandelt wird, bedeutet das eine Minderung des durch die Umströmung entstehenden Geräuschs bei hohen Frequenzen.

Grundsätzlich ist der Einfluss des Fransensausms auf das Fluggeräusch der Eule jedoch nur sehr schwer experimentell untersuchbar. Das hat damit zu tun, dass – anders als beim Hakenkamm an der Vorderkante – der Fransensaum einen nicht zu vernachlässigenden Bereich des Flügels ausmacht. Ein Abschneiden des Fransensausms zum Zweck vergleichender Experimente an fliegenden Vögeln oder auch an Flügelpräparaten hätte deshalb eine deutliche Veränderung der Flügelform und damit auch der aerodynamischen Parameter zur Folge. Das würde die Ergebnisse eines Vergleichs mit/ohne Fransensaum sehr fragwürdig machen. Das Gleiche gilt auch für andere grundsätzlich denkbare Methoden wie das Abkleben. Sie alle würden den Flügel zu stark verändern, um aussagekräftige Rückschlüsse auf den akustischen Effekt des Fransensausms zu ermöglichen.

Auch die Fransen an der Hinterkante des Eulenflügels dienen als Motivation für Modifikationen an technischen Tragflügeln mit dem Ziel der Minderung des Umströmungsgeräuschs. Dazu zählen zum Beispiel sägezahnförmige Einschnitte (zum Beispiel [28,29]) oder bürstenförmige Hinterkanten [30]. Auch diese Modifikationen beeinflussen neben dem

Umströmungsgeräusch auch die Aerodynamik des Tragflügels.

Das luftdurchlässige Gefieder

Die Daunen auf der Oberfläche der Eulenfedern entstehen durch die im Vergleich zu anderen Vögeln sehr langen Hakenfasern der Eule, auch Pennula genannt, die besonders elastisch sind und auf der Flügeloberfläche aufliegen. Dadurch erscheinen die Federn der Eule generell weicher und elastischer [6] sowie poröser [18]. In der Literatur findet sich für diese Gefiederanpassung daher auch der Ausdruck "Polsterung" [31].

Hinsichtlich des leisen Flugs der Eule dürfte im Fall des weichen Flaums vor allem die erhöhte Permeabilität, das heißt die Luftdurchlässigkeit, im Vergleich zum Gefieder anderer, nicht leise fliegender Vögel, von Interesse sein. Ebenso wie die Fransen an der Flügelhinterkante führt diese Luftdurchlässigkeit zu einem graduellen Druckausgleich zwischen Flügelunterseite und -oberseite sowie zu einer Beeinflussung der in der Grenzschicht sich über den Flügel bewegendenden turbulenten Strukturen, die an der Hinterkante als Schall abgestrahlt werden. Ein direkter Effekt des Gefieders auf den abgestrahlten Schall in der Art einer schallabsorbierenden Struktur ist dabei

ebenfalls untersucht worden [32], spielt jedoch vor allem aufgrund der nur sehr geringen Dicke eines Eulenflügels vor allem im Bereich der Hinterkante [33, 34] eine nur sehr untergeordnete Rolle. Nicht unerwähnt bleiben soll die Tatsache, dass eine teilweise Durchströmung des Flügels wiederum einen negativen Effekt auf die sich ergebende Aerodynamik hat. Über die Luftdurchlässigkeit von Vogelfedern war lange Zeit nur eine Arbeit von Müller und Patone [35] bekannt, die jedoch keine Federn von Eulen enthielt. In einer Studie der Autoren des vorliegenden Artikels wurde jedoch der Durchströmungswiderstand von Eulenflügeln gemessen und mit dem anderer, nicht leise fliegender Vögel verglichen [36]. Der Durchströmungswiderstand ist eine Größe, welche den Widerstand eines luftdurchlässigen Materials gegen eine gleichmäßige Durchströmung beschreibt. Er kann als umgekehrt proportional zur Permeabilität verstanden werden. Für die Messungen wurden 15 präparierte Flügel einer Schleiereule, 8 Flügel eines Waldkauzes (*Strix aluco*) und 2 Flügel einer Waldohreule (*Asio otus*) als Vertreter der leise fliegenden Eulen verwendet. Die Ergebnisse wurden mit denen von Messungen an 9 präparierten Flügeln des Bussards, 2 Flügeln des Sperbers und 5 Flügeln der Taube (*Columba livia*) verglichen. Für jeden Flügel wurden Messungen



Make better spaces

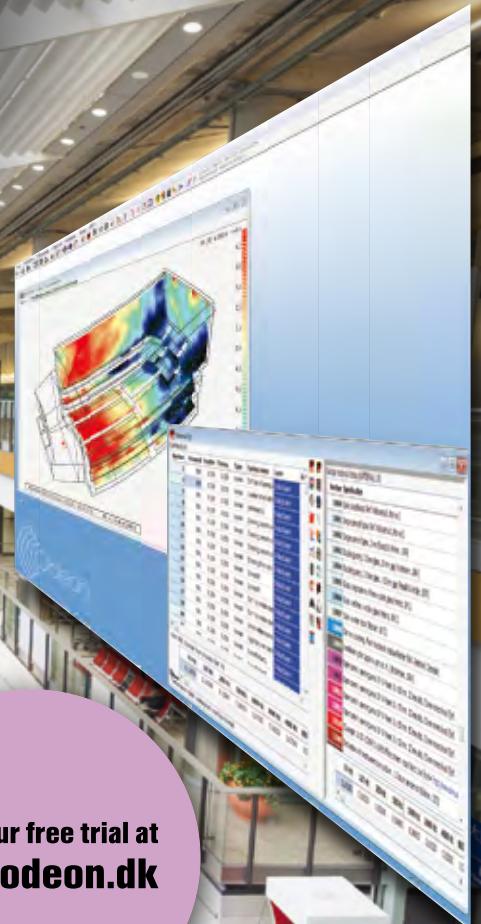
with the complete software solution for room acoustics

Elegant and user friendly interface

Fast and reliable simulations and measurements

Available as: **B** Basics, **I** Industrial, **A** Auditorium & **C** Combined

Start your free trial at
www.odeon.dk



an acht, über den Flügel verteilten Messpositionen durchgeführt. Die Messergebnisse zeigen deutlich, dass die Flügel der Eulenvögel einen signifikant geringeren Durchströmungswiderstand als die Flügel von Bussard, Sperber und Taube aufweisen, dass ihre Luftdurchlässigkeit somit größer ist.

Wie schon für den Fransensaum an der Flügelhinterkante ist es auch für die Daunen auf der Flügeloberfläche nicht möglich, ihren Einfluss auf das Fluggeräusch separat zu quantifizieren. Jede auch nur entfernt denkbare Maßnahme zur Entfernung der Daunen oder zur Abdeckung der Federn hätte eine nicht vernachlässigbare Beeinträchtigung der Flügel-aerodynamik zur Folge.

Auch im Fall des weichen Flaums beziehungsweise generell des luftdurchlässigen Gefieders der Eulen wird versucht, die schallmindernden Mechanismen auf technische Anwendungen zu übertragen. So gibt es zum Beispiel etliche Studien zum Einfluss porös gestalteter Hinterkanten auf den Umströmungslärm von Tragflügeln [37, 38]. Auch bei technischen Anwendungen muss jedoch beachtet werden, dass eine poröse Beschaffenheit nicht nur die Akustik beeinflusst, sondern auch die Aerodynamik.

Messung des Fluggeräuschs von Eulen

Um das beim Gleitflug der Eule entstehende Geräusch quantifizieren und mit dem anderer Raubvögel vergleichen zu können, sind grundsätzlich drei verschiedene Szenarien möglich. Die erste Möglichkeit wäre die Messung des Geräuschs von frei fliegenden Vögeln anhand sogenannter Überflugmessungen, bei denen der Vogel über ein Mikrofon oder eine ganze Anordnung von Mikrofonen fliegt. Der wesentliche Vorteil dieser Methode ist, dass die Vögel tatsächlich entsprechend ihrem natürlichen Verhalten fliegen. Von Nachteil sind dabei jedoch störende Einflüsse wie eventuell vorhandene Nebengeräusche oder die Notwendigkeit der Bestimmung der Fluggeschwindigkeit und des Abstands der Vögel vom Mikrofon. Eine zweite Möglichkeit sind Messungen an Vögeln, die in einem speziellen aeroakustischen Windkanal entgegen der Strömung fliegen, und zwar derart, dass sich die absolute Position nicht ändert. Dies bedarf natürlich einem entsprechend aufwändigen Training der Tiere, wobei der Vorteil in der für akustische Messungen geeigneten Messumgebung liegt. Die dritte Möglichkeit wären ebenfalls Messungen in einem Windkanal, jedoch nicht an lebenden Vögeln, sondern an Präparaten. Auch hier liegt der Vorteil in der Nutzung eines für akustische Experimente geeigneten Windkanals, während der Nachteil die Verwendung von starren Flügelpräparaten ist. Grundsätzlich muss jedoch bei allen Methoden beachtet werden, dass das Fluggeräusch der Eule sehr gering ist, was

hohe Anforderungen an die Empfindlichkeit und den Dynamikbereich der Messmikrofone stellt.

Die erste Variante wurde bereits in frühen Studien von Gruschka et al. [39] und Kroeger et al. [18] im Jahr 1971 sowie von Neuhaus et al. [6] im Jahr 1973 veröffentlicht. Gruschka et al. und Kroeger et al. beziehen sich beide auf die gleiche Messkampagne, bei der ein Streifenkauz (*Strix varia alleni*) auf einem einigermaßen konstanten Pfad durch einen Hallraum fliegen gelassen wurde. Die durchschnittliche Fluggeschwindigkeit im Gleitflug betrug 7,3 m/s, die Messungen erfolgten mit einem knapp oberhalb des Bodens positionierten Kondensatormikrofon. Die gemessenen Schalldruckpegelspektren wurden auf verschiedene Abstände umgerechnet. Dabei zeigte sich, dass das Fluggeräusch ab einem Abstand von etwa 3 m unterhalb der Hörschwelle des Menschen liegt. Vergleiche mit anderen, nicht leise fliegenden Vögeln wurden nicht durchgeführt. Basierend auf den von Kroeger et al. veröffentlichten Daten hat Lilley später eine weitere, vielbeachtete Arbeit zum leisen Eulenflug verfasst [40]. Eine der wesentlichen Schlussfolgerungen aus dieser Arbeit ist, dass die speziellen Gefiedereigenschaften der Eule dafür sorgen, dass Schallanteile bei Frequenzen oberhalb von 2 kHz praktisch unhörbar sind. Dies ist exakt der Frequenzbereich, in dem die typischen Beutetiere der Eule gerade sehr gut hören.

In der experimentellen Studie von Neuhaus et al. wurde das Fluggeräusch eines Waldkauzes ebenfalls durch Überflugmessungen ermittelt und mit dem von Stockenten (*Anas platyrhynchos*) verglichen. Die Aufnahmen für den Waldkauz entstanden in einer Turnhalle, wo die zwei untersuchten Vögel von einer Hand auf eine benachbarte Sitzstange fliegen mussten, während die Messungen an den Stockenten im Freien stattfanden. Leider flogen die Waldkäuse nicht im Gleitflug, sondern im sogenannten Gleitrudern beziehungsweise im Hochrütteln – beides Flugzustände, bei denen der Vogel aktiv mit den Flügeln schlägt [41]. Die Mikrofontfernung konnte in beiden Fällen nur geschätzt werden. Diese Unterschiede in der Messung, die verschiedenen Flugzustände sowie die ungewöhnliche Art der Darstellung der Ergebnisse machen einen direkten Vergleich der Fluggeräusche schwierig.

Schließlich wurden auch durch die Autoren Überflugmessungen an Eulen und nicht leise fliegenden Vögeln durchgeführt [42]. Die Messungen fanden im "Wildpark Johannismühle" statt. Mit Hilfe der dortigen Falknerinnen wurden dabei in mehreren Messkampagnen verschiedene Raubvögel über ein aus 92 Einzelmikrofonen bestehendes Mikrofonarray fliegen gelassen. Die Bestimmung des Flugpfads der Vögel erfolgte durch zwei Kameras, die zeitsynchron zu den akustischen Messungen filmten. Dabei



Abb. 6: Flug einer Schleiereule über eine am Boden befindliche, mit Tüchern getarnte Anordnung von Messmikrofonen.

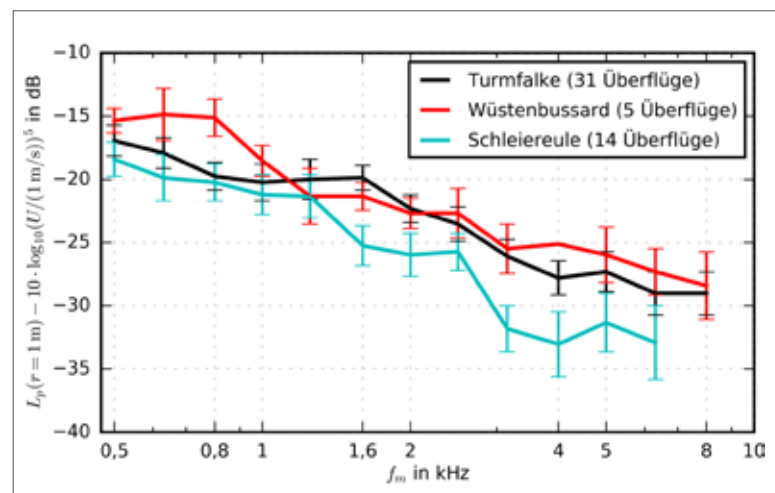
spielten verschiedene Faktoren eine Rolle, die bei der Planung und Durchführung der Messungen entsprechend berücksichtigt werden mussten. So fanden die Messungen im Freien statt, was zum einen zu starken Hintergrundgeräuschen, zum Beispiel durch Wind oder andere Tiere des Wildparks, als auch zu gewissen Einschränkungen des Messaufbaus führte. Dieser musste so gestaltet sein, dass im Fall von ungünstigen Wetterverhältnissen die Messung kurzfristig abgebrochen werden kann. Die aufwändige Messtechnik musste zum anderen durch dünne, sehr schalldurchlässige Materialien getarnt werden, da andernfalls Gefahr bestand, dass die Raubvögel diese zerstören. Abbildung 6 zeigt den Flug einer Schleiereule über das am Boden befindliche, mit dünnen Tüchern getarnte Mikrofonarray.

Bei den Messungen flogen die Vögel mehrmals von der Hand der einen Falknerin zu der einer anderen, jedoch im Allgemeinen nur so oft, wie sie sich durch entsprechendes Futter locken ließen. Da der Fokus der Messungen ausschließlich auf dem Gleitflug lag und demnach Überflüge mit anderen Flugzuständen sowie solche mit starken Störgeräuschen (zum Beispiel Vogelschreie) nicht ausgewertet wurden, kam für jeden untersuchten Vogel letztlich nur eine sehr begrenzte Anzahl auswertbarer Überflüge zusammen. Von den sechs insgesamt untersuchten Vögeln blieben letztlich ein Turmfalke (*Falco tinnunculus*, 31 gültige Überflüge), ein Wüstenbussard (*Parabuteo unicinctus*, 5 Überflüge) und eine Schleiereule (14 Überflüge) übrig. Aus diesen Messungen wurde der Schalldruckpegel bezogen auf eine Entfernung von 1 m und normiert mit der fünften Potenz der aus den Flugpfaden berechneten Fluggeschwindigkeit U ermittelt. Diese Normierung ergibt sich aus der bereits genannten Theorie für die Schallentstehung an überströmten Platten [13] unter der Annahme, dass das Fluggeräusch im Gleitflug im Wesentlichen durch die Überströmung der Flügelflächen entsteht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass das Fluggeräusch der Eule ab einer Frequenz von etwa 1,6 kHz deutlich unter dem Flug-

geräusch der anderen, nicht leise fliegenden Raubvögel liegt. Dieses Ergebnis bestätigt somit sehr gut die von Lilley postulierte schallmindernde Wirkung des Eulengefieders ab einer Frequenz von 2 kHz [40].

Die zweite Möglichkeit, die Durchführung von Windkanalmessungen an fliegenden Vögeln, wurde bisher nur von einer Gruppe chinesischer Wissenschaftler an einer Taube durchgeführt [43]. Auch dabei kam Mikrofonarraymesstechnik zum Einsatz, wodurch gezeigt werden konnte, dass sich die dominanten Schallquellen bei gleitenden Tauben an den Flügelspitzen befinden. Die vergleichsweise große Spannweite typischer Raubvögel, darunter auch Eulenvögel, würde derartige Messungen zur Untersuchung des leisen Eulenflugs sehr aufwändig machen. Die dritte Methode, die Untersuchung des leisen Eulenflugs durch Windkanalexperimente an präparierten Flügeln, wurde ebenfalls von den Autoren verfolgt [10]. Dabei wurden einerseits vorhandene Präparate verwendet, die von den "Senckenberg Naturhistorischen Sammlungen Dresden" zur Verfügung gestellt wurden, sowie weitere von Mitarbeitern dieses

Abb. 7: Skalierte Schalldruckpegel des Fluggeräuschs aus Überflugmessungen in Terzbändern (die Skalierung berücksichtigt den Einfluss unterschiedlicher Fluggeschwindigkeiten in den Messungen; der Wert in Klammern gibt die Zahl der Überflüge an, die in die Berechnung eingingen).



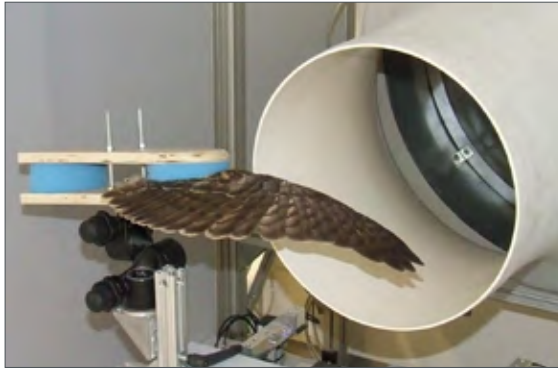
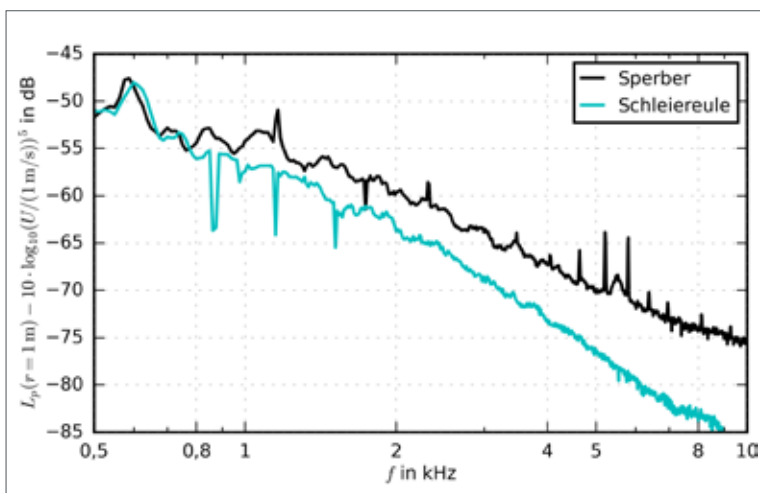


Abb. 8: Messaufbau im aeroakustischen Windkanal (gezeigt ist der rechte Flügel eines Sperbers).

Museums frisch präparierte Flügel von sogenannten Totfunden. Bei Untersuchungen an Präparaten muss jedoch einschränkend festgestellt werden, dass sich ein präparierter Flügel im Windkanal nicht genauso verhält wie der Flügel eines gleitenden Vogels, da sich Eigenschaften wie die Flexibilität durch die Präparation ändern können. Auch die Form der Präparate kann der eines echten Flügels nur möglichst gut anhand von Bild- und Videoaufnahmen nachempfunden werden, aber eine gewisse Unsicherheit bleibt vorhanden. Vorteil derartiger Messungen ist jedoch die gute Reproduzierbarkeit innerhalb einer speziell für akustische Messungen ausgelegten Messumgebung. Zusätzlich können in einem Windkanal auch aerodynamische Parameter, wie Auftriebs- und Widerstandskräfte, gemessen werden, was bei Überflugmessungen nicht möglich ist. In der Studie wurden Messungen an je zwei präparierten Flügeln unterschiedlicher Vogelarten durchgeführt. Dazu gehörten die Schleiereule und der Waldkauz als Vertreter der leise fliegenden Eulenvögel sowie der Mäusebussard (*Buteo buteo*), der Sperber und die Taube als Vertre-

Abb. 9: An Flügelpräparaten im aeroakustischen Windkanal gemessene skalierte Schalldruckpegel (Strömungsgeschwindigkeit ca. 12 m/s, Frequenzauflösung 12,5 Hz).



ter der nicht leise fliegenden Vögel. Die Flügel wurden so vor der Düse des Windkanals befestigt, dass verschiedene Anstellwinkel eingestellt werden konnten. Gleichzeitig wurden die aerodynamischen Kräfte mit Hilfe einer Windkanalwaage gemessen. Abbildung 8 zeigt eine Fotografie des Messaufbaus.

Als Beispiel zeigt Abbildung 9 den am Flügel einer Schleiereule gemessenen Schalldruckpegel im Vergleich zu dem am Flügel eines Sperbers gemessenen. Bei beiden Flügeln war die umströmte Fläche mit 448 cm^2 (Schleiereule) und 423 cm^2 (Sperber) etwa vergleichbar groß. Bei dieser Messung betrug die Strömungsgeschwindigkeit $12,3 \text{ m/s}$. Sie ist etwas höher als die Fluggeschwindigkeit der Eule unter realen Bedingungen, da akustische Windkanalmessungen bei noch niedrigeren Geschwindigkeiten aufgrund zunehmender Nebengeräusche schwierig sind. Die Schalldruckpegel wurden wie die in Abbildung 7 gezeigten mit der Strömungsgeschwindigkeit sowie auf einen Messabstand von 1 m skaliert. Auch diese Ergebnisse zeigen, dass das Geräusch bei niedrigen Frequenzen unterhalb von etwa 800 Hz bei beiden Vögeln vergleichbar ist. Mit steigender Frequenz liegt das am präparierten Eulenflügel gemessene Umströmungsgeräusch jedoch deutlich unter dem des Sperberflügels, mit Unterschieden von etwa 5 dB bei 2 kHz bis hin zu über 10 dB bei 10 kHz bei dieser Geschwindigkeit.

Somit zeigen sowohl die Überflugmessungen an lebenden Eulen als auch die Messungen an Flügelpräparaten im Windkanal eine deutliche Geräuschminderung gegenüber anderen, nicht leise fliegenden Vögeln. Diese lässt sich jedoch nur in einem Bereich höherer Frequenzen beobachten, in dem das Gehör der üblichen Beutetiere der Eule am sensibelsten ist. Aus evolutionsbiologischer Sicht ist das natürlich sinnvoll, da eine Geräuschminderung bei tiefen Frequenzen für die Jagdstrategie der Eule gar nicht notwendig ist. Ergänzend sei hier noch hinzuzufügen, dass die nachtaktiven Eulen nicht nur deshalb lautlos fliegen, um nicht von ihren Beutetieren gehört zu werden, sondern auch, damit das Geräusch der Beutetiere nicht von ihrem eigenen Fluggeräusch übertönt wird und sie somit ihre Beute auch im Flug akustisch orten können.

Hinweis

In den Untersuchungen wurden alle Belange des Tiereschutzes eingehalten.

Danksagung

Die Autoren danken Herrn T. Bachmann, Herrn T. Windisch und Herrn T. Drescher, den Falknerinnen des Wildparks Johannismühle sowie Herrn M. Päckert und Herrn J. Ziegler von den Senckenberg Naturhistorischen Sammlungen Dresden.

Literatur

- [1] Bachmann, T.; Mühlenbruch, G.; Wagner, H.: The barn owl wing: an inspiration for silent flight in the aviation industry? *Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication*, volume 7.975, page 79.750N. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [2] Wagner, H.; Weger, M.; Klaas, M.; Schröder, W.: Features of owl wings that promote silent flight. *Interface Focus*, 7(1):20160078, 2017.
- [3] Wang, Y.; Zhao, K.; Lu, X.-Y.; Song, Y.-B.; Bennett, G. J.: Bioinspired aerodynamic noise control: a bibliographic review. *Applied Sciences*, 9(11):2.224, 2019.
- [4] Clark, C. J.; LePiane, K.; Liu, L.: Evolution and ecology of silent flight in owls and other flying vertebrates. *Integrative Organismal Biology*, 2(1):obaa001, 2020.
- [5] Jaworski, J. W.; Peake, N.: Aeroacoustics of silent owl flight. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 52:395–420, 2020.
- [6] Neuhaus, W.; Bretting, H.; Schweizer, B.: Morphologische und funktionelle Untersuchungen über den "lautlosen" Flug der Eulen (*Strix aluco*) im Vergleich zum Flug der Enten (*Anas platyrhynchos*). *Biologisches Zentralblatt*, 92:495–512, 1973.
- [7] Alerstam, T.; Rosén, J.; Bäckman, M.; Ericson, P. G. P.; Hellgren, O.: Flight speeds among bird species: allometric and phylogenetic effects. *PLoS Biol*, 5(8):e197, 2007.
- [8] Ponitz, B.; Schmitz, A.; Fischer, D.; Bleckmann, H.; Brückner, C.: Diving-flight aerodynamics of a peregrine falcon (*falco peregrinus*). *PLoS One*, 9(2):e86506, 2014.
- [9] Lindhe Norberg, U. M.: Structure, form, and function of flight in engineering and the living world. *Journal of Morphology*, 252(1):52–81, 2002.
- [10] Geyer, T. F.; Sarradj, E.; Fritzsche, C.: Silent owl flight: comparative acoustic wind tunnel measurements on prepared wings. *Acta Acustica United with Acustica*, 99(1):139–153, 2013.
- [11] Taylor, I.: *Barn owls: predator-prey relationships and conservation*. Cambridge University Press, 2004.
- [12] Konishi, M.: How the owl tracks its prey: experiments with trained barn owls reveal how their acute sense of hearing enables them to catch prey in the dark. *American Scientist*, 61(4):414–424, 1973.
- [13] Ffowcs Williams, J. E.; Hall, L. H.: Aerodynamic sound generation by turbulent flow in the vicinity of a scattering half plane. *Journal of Fluid Mechanics*, 40(4):657–670, 1970.
- [14] Mascha, E.: Über die Schwungfedern. *Zeitschrift für wissenschaftliche Zoologie* 77, pages 606–651, 1904.
- [15] Graham, R. R.: The silent flight of owls. *The Aeronautical Journal*, 38(286):837–843, 1934.
- [16] Bachmann, T.; Wagner, H.: The three-dimensional shape of serrations at barn owl wings: towards a typical natural serration as a role model for biomimetic applications. *Journal of Anatomy*, 219(2):192–202, 2011.
- [17] Weger, M.; Wagner, H.: Morphological variations of leading-edge serrations in owls (*strigiformes*). *PloS one*, 11(3):e0149236, 2016.
- [18] Kroeger, R. A.; Grushka, H. D.; Helvey, T. C.: Low speed aerodynamics for ultra-quiet flight. Technical report, Tennessee Univ Space Inst Tullahoma, 1972.
- [19] Anderson, G. W.: An experimental investigation of a high lift device on the owl wing. Technical report, Master Thesis, Air Force Institute of Technology, Air University, 1973.
- [20] Muthuramalingam, M.; Talboys, E.; Wagner, H.; Brückner, C.: Flow turning effect and laminar control by the 3d curvature of leading edge serrations from owl wing. *Bioinspiration & Biomimetics*, 16(2):026010, 2020.
- [21] Geyer, T. F.; Claus, V. T.; Hall, P. M.; Sarradj, E.: Silent owl flight: the effect of the leading edge comb. *International Journal of Aeroacoustics*, 16(3), 115–134
- [22] Sarradj, E.; Fritzsche, C.; Geyer, T.; Giesler, J.: Acoustic and aerodynamic design and characterization of a small-scale aeroacoustic wind tunnel. *Applied Acoustics*, 70(8):1073–1080, 2009.
- [23] Herold, G.; Sarradj, E.: Open-source software for the application of microphone array methods. *Noise & Vibration Worldwide*, 48(3-4):44–51, 2017.
- [24] Hersh, A. S.; Soderman, P. T.; Hayden, R. E.: Investigation of acoustic effects of leading-edge serrations on airfoils. *Journal of Aircraft*, 11(4):197–202, 1974.
- [25] Wang, L.; Liu, X.; Li, D.: Noise reduction mechanism of airfoils with leading-edge serrations and surface ridges inspired by owl wings. *Physics of Fluids*, 33(1):015123, 2021.
- [26] Bachmann, T.; Wagner, H.; Tropea, C.: Inner vane fringes of barn owl feathers reconsidered: morphometric data and functional aspects. *Journal of Anatomy*, 221(1):1–8, 2012.
- [27] Lilley, G. M.: The prediction of airframe noise and comparison with experiment. *Journal of Sound and Vibration*, 239(4):849–859, 2001.
- [28] Oerlemans, S.; Fisher, M.; Maeder, T.; Kögler, K.: Reduction of wind turbine noise using optimized airfoils and trailing-edge serrations. *AIAA Journal*, 47(6):1470–1481, 2009.
- [29] Chong, T. P.; Vathylakis, A.; Joseph, P. F.; Gruber, M.: Self-noise produced by an airfoil with nonflat plate trailing-edge serrations. *AIAA Journal*, 51(11):2665–2677, 2013.
- [30] Herr, M.; Dobrzynski, W.: Experimental investigations in low-noise trailing edge design. *AIAA Journal*, 43(6):1167–1175, 2005.
- [31] Hertel, H.: *Struktur, Form, Bewegung*. Krausskopf-Verlag, 1963.
- [32] Chen, K.; Liu, Q.; Liao, G.; Yang, Y.; Ren, L.; Yang, H.; Chen, X.: The sound suppression characteristics of wing feather of owl (*bubo bubo*). *Journal of Bionic Engineering*, 9(2):192–199, 2012.
- [33] Nachtigall, W.; Klimbingat, A.: Messung der Flügelgeometrie mit der Profilkammethode und geometrische Flügelkennzeichnung einheimischer Eulen. *Biona-Report*, 3:45–86, 1985.
- [34] Liu, T.; Kuykendoll, K.; Rhew, R.; Jones, S.: Avian wings. In 24th AIAA aerodynamic measurement technology and ground testing conference, AIAA paper 2004–2186, 2004.
- [35] Müller, W.; Patone, G.: Air transmissivity of feathers. *Journal of Experimental Biology*, 201(18):2591–2599, 1998.
- [36] Geyer, T. F.; Sarradj, E.; Fritzsche, C.: Measuring owl flight noise. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, volume 249, pages 183–198. Institute of Noise Control Engineering, 2014.
- [37] Geyer, T. F.; Sarradj, E.; Fritzsche, C.: Measurement of the noise generation at the trailing edge of porous airfoils. *Experiments in Fluids*, 48(2):291–308, 2010.
- [38] Jaworski, J. W.; Peake, N.: Aerodynamic noise from a poroelastic edge with implications for the silent flight of owls. *Journal of Fluid Mechanics*, 723(2013):456–479, 2013.
- [39] Gruschka, H. D.; Borchers, I. U.; Coble, J. G.: Aerodynamic noise produced by a gliding owl. *Nature*, 233(5319):409–411, 1971.
- [40] Lilley, G.: A study of the silent flight of the owl. In 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA Paper 1998–2340, 1998.
- [41] Lorenz, K.: Beobachtetes über das Fliegen der Vögel und über die Beziehungen der Flügel- und Steuerform zur Art des Fluges. *Journal für Ornithologie*, 81(1):107–236, 1933.
- [42] Sarradj, E.; Fritzsche, C.; Geyer, T. F.: Silent owl flight: bird flyover noise measurements. *AIAA Journal*, 49(4):769–779, 2011.
- [43] Wei, Q.; Zhong, S.; Huang, X.: Experimental evaluation of flow-induced noise in level flight of the pigeon (*columba livia*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(1):EL57–EL63, 2013. ■

Dr.-Ing.
Thomas F. Geyer
*Brandenburgische
Technische Uni-
versität Cottbus-
Senftenberg*

Christoph Fritzsche
*Sächsisches Landes-
amt für Umwelt,
Landwirtschaft
und Geologie,
Dresden*

Prof. Dr.-Ing.
Ennes Sarradj
TU Berlin

Prof. Dr. rer.
**nat. habil. Her-
mann Wagner**
RWTH Aachen

Virtuelle akustische Welten in Forschung und Praxis

Michael Vorländer

Die Virtuelle Akustik befindet sich in einem rasanten Prozess der Weiterentwicklung von Simulationsverfahren, Klangsynthese- und Signalverarbeitungswerkzeugen und 3D-Audio-Wiedergabeverfahren. Computersimulationen und Auralisationen in Echtzeit bieten zahlreiche Möglichkeiten für neuartige Anwendungen in vielen Teilgebieten der Akustik. Daneben ist zu beobachten, dass die Virtual-Reality-Technologie ein Megatrend ist, der sich aufgrund der Verfügbarkeit von kostengünstigen VR-Brillen in den Consumer-Markt hinein ausweitet, wodurch auch die kopfhörerbasierte Binauraltechnik zum wiederholten Mal eine Renaissance erlebt. In diesem Artikel werden die historische Entwicklung von der Auralisation zur Virtuellen Akustik beschrieben sowie die Herausforderungen und die Arbeitsschritte bei der Schaffung akustischer virtueller Welten. Ob die virtuelle Umgebung als ausreichend genau empfunden wird oder nicht, hängt von vielen Wahrnehmungsfaktoren sowie von der Vorkonditionierung und dem Grad der Immersion des Benutzers in die multimodale virtuelle Umgebung ab. Eine Qualitätsbewertung kann daher nur in Zusammenarbeit zwischen Akustik und Psychologie erfolgen. Die größten Herausforderungen sind neben den computertechnischen Fragen auf der akustischen Seite fehlende Grundlagen und Datenschnittstellen zur räumlichen Charakterisierung von Schallquellen und zu akustischen Materialparametern. Anhand von Anwendungsbeispielen aus der Architektur, aus Rekonstruktionen historischer Szenen und mit Einblicken in größere Verbundinitiativen in der Hörforschung wird dargelegt, dass mit der Virtuellen Akustik neue Perspektiven in der Akustik-Forschung und -Praxis eröffnet werden können.

Einleitung

Man stelle sich vor, Zeitreisen wären möglich, und man könnte die Vergangenheit oder die Zukunft erleben, d. h. sehen und hören und möglicherweise auch mit anderen Sinnen (Tasten, Riechen, etc.) erfassen. Geht nicht, sagen Sie? Stimmt natürlich, wenn man es streng verstehen will. Geht aber doch, zumindest, wenn man die Möglichkeit, Virtuelle Realitäten zu erleben, auch in Betracht zieht. In Virtueller Realität kann eine quasi beliebige Umgebung erlebt werden, auch wenn sie in der Vergangenheit oder in der Zukunft liegt (siehe Abbildung 1).

Virtual acoustic worlds in research and practice

Virtual acoustics is undergoing a rapid process of development of simulation algorithms, sound synthesis and signal processing tools, and 3D audio reproduction techniques. Computer simulation and auralisation in real time offer numerous possibilities for novel applications in many subfields of acoustics. In addition, it can be observed that virtual reality technology is a megatrend that is expanding into the consumer market due to the availability of low-cost VR glasses, which also means that headphone-based binaural technology is experiencing a renaissance once again. This article describes the historical evolution from auralisation to virtual acoustics, as well as the challenges and steps involved in creating acoustic virtual worlds. Whether or not the virtual environment is perceived as sufficiently accurate depends on many perceptual factors as well as on the user's preconditioning and degree of immersion in the multimodal virtual environment. Thus, a quality assessment can only be done in cooperation between acoustics and psychology. On the acoustics side, the greatest challenges besides the computer-technical questions are the lack of basic principles and data interfaces for the spatial characterisation of sound sources and for acoustic material parameters. Using application examples from architecture, from reconstructions of historical scenes and with insights into larger collaborative initiatives in hearing research, it will be demonstrated that virtual acoustics can open up new perspectives in acoustics research and practice.

Es versteht sich von selbst, dass eine halbwegs korrekte Beschreibung der Umgebung eingebettet im Kontext der historischen und kulturellen Gegebenheiten eine sehr große Herausforderung darstellt. Aber wenn man all dies gelöst hat, bleibt immer noch die Aufgabe der technischen Realisierung. Dazu braucht man eine komplexe Technologie der Virtuellen Realität (VR), nämlich ein Wiedergabegerät für visuelle Präsentation („3D-Brille“) und eine 3D-Audiowiedergabetechnik („Binauraltechnik“). Der Punkt ist, dass beides, 3D-Sehen und 3D-Hören mit Technologie praktisch in jedem Haushalt verfügbar ist. Smartphones liefern

bereits rudimentäre Ansätze. Head-Mounted Displays (HMD) sind am Markt der Computerspiele angekommen und zu entsprechend erschwinglichen Preisen erhältlich. Binauralwiedergabe über Kopfhörer ist sowohl „ein alter Hut“ als auch erneut enorm im Fokus aktueller Forschung, wenn es um perfektionierte individualisierte Lösungen geht.

Die technischen Voraussetzungen für die Virtuelle Akustik wurden in den letzten Jahren massiv weiterentwickelt, auch getrieben durch Innovationen in der Computerspielindustrie und in der Audiobranche, alles im Zusammenhang mit global verbreiteten Smartphone- und Tablet-Technologien. Die Technik ist also prinzipiell mit immer besseren Komponenten verfügbar, aber was machen wir Akustikerinnen und Akustiker nun damit? Wo können wir die Beiträge liefern? Zuallererst in der Akustik in Forschung und Praxis und zudem in der interdisziplinären Forschung mit anderen Wissenschaften!

Vor der Einführung in die akustisch-technischen Grundlagen der Virtuellen Akustik hier noch ein Blick auf weitere Beispiele: Wir planen die Renovierung eines Büroraums und wollen nun in die Zukunft schauen. Personen, die in dem neuen Raum arbeiten werden, wollen sicherlich wissen, wie sie sein wird, die Zukunft in diesem Raum. Sie erwarten vermutlich verbesserte Arbeitsplatzbedingungen, angenehmere als vor der Renovierung. Eine Möglichkeit, sich den neuen Arbeitsbereich vorzustellen, besteht darin, mithilfe von VR ein virtuelles Büro zu erstellen (Abb. 2). Dies würde nicht nur die Renovierung des Raums, sondern auch die Schallquellen (z. B. Geräusche aus der Lüftungs- und Klimatechnik, Drucker, Kopierer, Tastaturklappern, Telefongespräche, Gespräche generell) enthalten, evtl. sogar den Stadtlärm, der über die Fenster eingetragen wird. Diese Darstellung des VR-Büros müsste gewisse Ansprüche aus Sicht der Architektur erfüllen und eine akzeptable Qualität besitzen und einfach handhabbar sein. Es müsste auch aus der akustischen Perspektive eine hinreichende Simulationsqualität besitzen. Derartige audiovisuelle Simulationen sind Standard bei aufwändigen Planungen von Innenräumen (Raumakustik) oder Innenstädten (Lärmkarten). Das ist computergestützte Planung, auch mit Auralisation, aber noch nicht Virtuelle Akustik oder Virtuelle Realität. Eines der wertvollsten Merkmale der VR ist nämlich, dass sich die Benutzerin oder der Benutzer im virtuellen Büro bewegen kann, wodurch der Realismus der Erfahrung deutlich erhöht wird. Das virtuelle Büro kann dann von allen Beteiligten (Planende, Bauherren, Nutzerinnen und Nutzer) partizipativ verwendet werden und als Grundlage für die Diskussion dienen sowie für Entscheidungen über die Auswahl des endgültigen Designs und der Materialien.

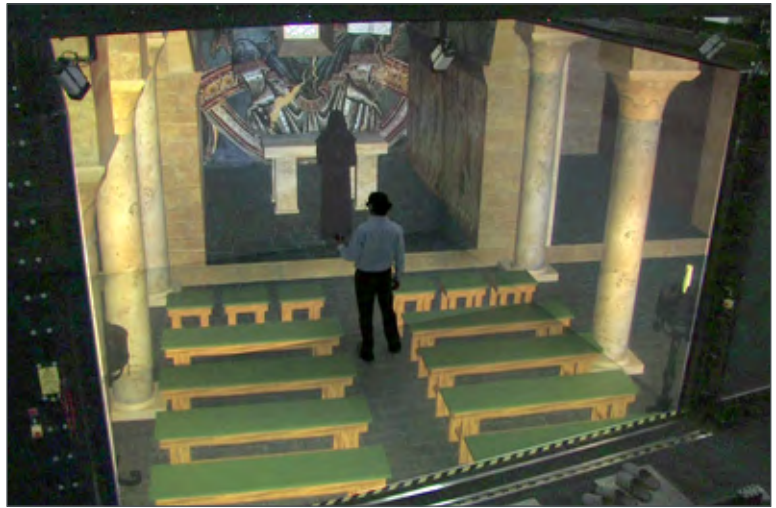


Abb. 1: Zeitreise ins 11. Jahrhundert – Einblicke in die Kunstgeschichte spanischer Kirchen und des Mozarabischen Gesangs [1].

Dieselbe Technologie ist einsetzbar, um Landebahnen oder Flugrouten in der Nähe von Flughäfen zu planen. Hierbei besteht die große Herausforderung, die Fluglärmmentstehung hinreichend genau zu charakterisieren und daraus Schallquellensignale zu generieren, die über Modelle der atmosphärischen Schallausbreitung bis zum Empfänger gelangen. Auf dieses Beispiel wird noch eingegangen werden.

Ein letztes Beispiel soll verdeutlichen, dass Virtuelle Akustik auch für die Forschung interessant ist. Die Untersuchung von Sprachverstehen ist ein sehr wichtiges Teilgebiet der Hörakustik, sowohl für so genannte Normalhörende als auch im Zusammenhang mit Hörhilfen, Kommunikationssystemen, automatischer Spracherkennung, etc. Die Fähigkeit, komplexe akustische Szenen zu analysieren, ist eine großartige Leistung des menschlichen Gehörs. Forschungsansätze in der Hörakustik sind unter Laborbedingungen gut etabliert, Testverfahren und Perzeptionsmodelle

Abb. 2: Studierenden-Arbeitsplätze im Institut für Hörtechnik und Akustik der RWTH Aachen.



weit entwickelt. Aber ist all dies auch für Alltagssituationen repräsentativ? Im Labor werden Situationen so dargestellt, dass sie bestmöglich reproduzierbar sind. Das ist eine der wichtigsten Bedingungen für publizierte Forschungsdaten, gelingt jedoch auch im Labor nicht immer (In einer vergleichenden Studie in der Psychologie konnten nur die Hälfte der Ergebnisse bestätigt werden, wenn Versuche nach Angaben der publizierten Verfahren nachgestellt wurden; <https://www.nature.com/news/over-half-of-psychology-studies-fail-reproducibility-test-1.18248>). Durch die gerade stattfindende Etablierung von Datenmanagementsystemen in Richtung „offene Daten“ wird darauf in Zukunft noch mehr Wert gelegt müssen. Die Diskussion um Laborbedingungen für Sprach- und Hörtests betrifft die quasi exakte Beschreibung von reflexionsarmen Räumen, von Hörkabinen oder Plätzen für die Anpassung von Hörgeräten, ganz abgesehen von der vollständigen Beschreibung der Versuchsdurchführung. Das mag die Reproduzierbarkeit steigern, aber all diese Laborsituationen sind künstlich und wenig „ökologisch valide“, d.h. wenig repräsentativ für entsprechende Situation im Alltag: Sprachverstehen bei Durchsagen aus einem Beschallungssystem in der so charakteristischen Schallszene einer U-Bahn-Station in Berlin („Zurückbleiben bitte!“), Kommu-

nikation zwischen zwei Menschen inmitten von Lärm in dieser U-Bahn-Station, Entwicklung und Qualitätsprüfung von Hörassistenzsystemen, usw. Will man diese Untersuchungen möglichst realitätsnah gestalten, bietet die Virtuelle Akustik großartige Möglichkeiten. Allerdings müssen angesichts der Komplexität des Kontextes auch hier die Vorgaben zur Herstellung der zu präsentierenden auditiv-visuellen Szene sowie die Beschreibungen der Versuchsbedingungen sauber dokumentiert sein, um Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Dies ist eine besondere Herausforderung, auf die ebenfalls noch eingegangen werden wird.

Es ist zu hoffen, dass das Lesen bis hierhin neugierig gemacht hat. In diesem Beitrag werden nun die Grundlagen der Virtuellen Akustik vorgestellt, einige Anwendungen anhand von Beispielen illustriert. Am Schluss wird diskutiert, worin der größte Entwicklungsbedarf zu sehen ist.

Von der Simulation zur Auralisation zur Akustischen Virtuellen Realität

Der Fortschritt der virtuellen Akustik über die letzten Jahrzehnte lässt sich in die Phasen der Entwicklung von Simulationstechniken, der Audiosignalverarbeitung, der 3D-Audiotechnologie und der Integration in die VR-Systemtechnik unterteilen. In



Norsonic

Schallpegelmesser Nor145

Schallimmissionsschutz

- Internes GPS, WLAN und 4G-Modem
- Steuerung über das Webportal NorCloud (Monitoring)
- Anschluss des NoiseCompass Nor1297 (Richtungserkennung)

Bauakustik / Raumakustik

- Interne Berechnung von $R'w$, $L'n,w$, etc. nach ISO 16283
- Interne Mittelung der Nachhallzeiten nach ISO 3382

Tippkemper norsonic

www.norsonic.de
tippkemper@norsonic.de
Tel. 02529 9301-0

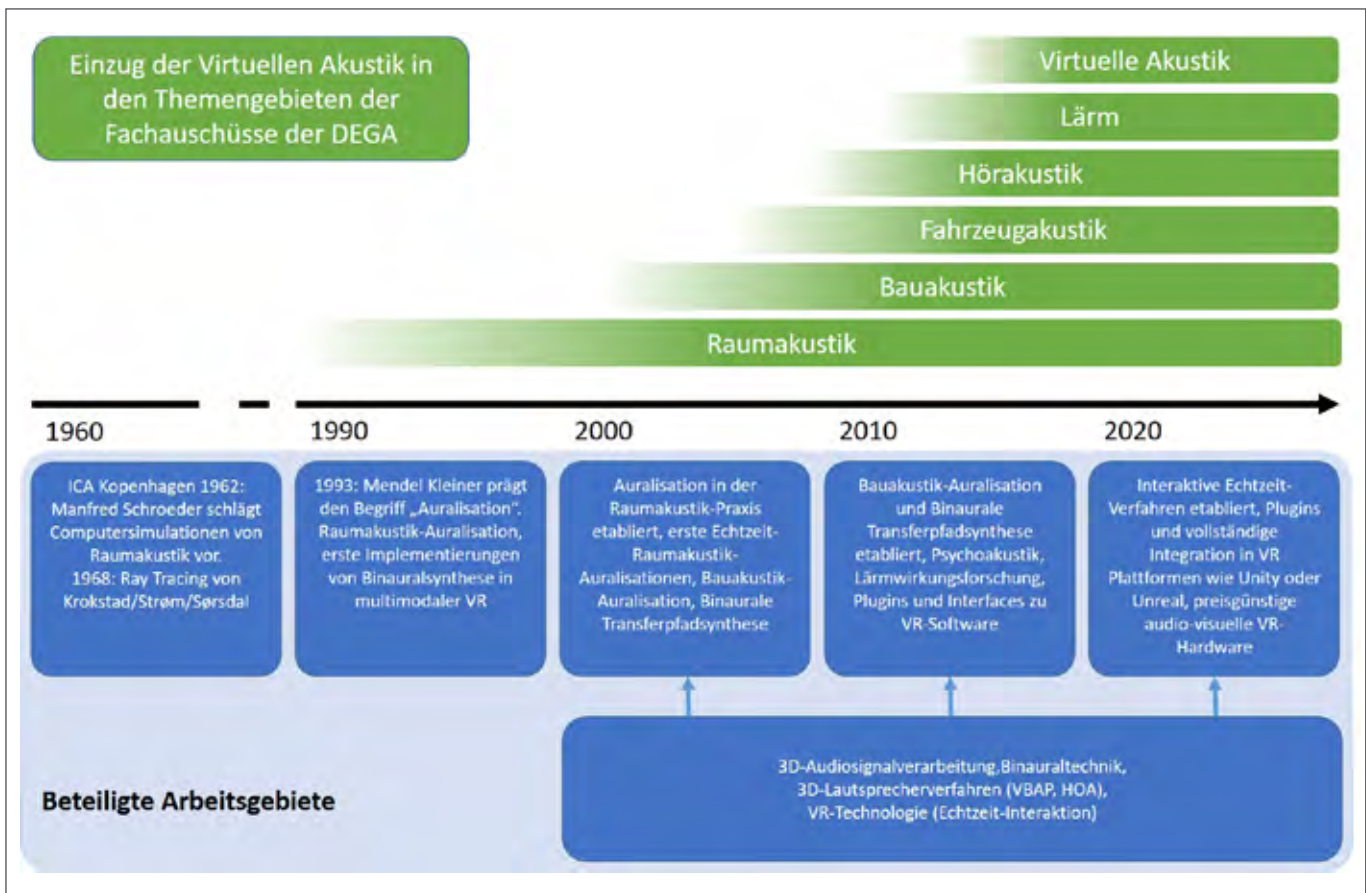


Abb. 3: Zeitliche Entwicklung der Virtuellen Akustik mit Gründung des Fachausschusses „Virtuelle Akustik“ der DEGA im Jahre 2015.

den Fachgebieten der Akustik erfolgten die ersten Schritte in der Raumakustik, dann in Bauakustik und Fahrzeugakustik, woraus durch Verallgemeinerung von Komponenten und Arbeitsschritten modulare Ansätze geschaffen wurden, die heute praktisch in allen Anwendungen von hörbarem Schall zum Einsatz kommen können, siehe Abbildung 3.

Raumakustische Simulationen

Manfred Schroeder formulierte bereits 1962 eine Vision von raumakustischen Computersimulationen, die dann später von Asbjørn Krokstad [2] tatsächlich vorgestellt wurden. Diese Verfahren wurden schließlich in den 1990er Jahren so weit entwickelt, dass auf Standard-PCs (die ja auch erst da in großer Verbreitung aufkamen) Ergebnisse in großem Detail schon nach wenigen Minuten oder Stunden erzielt werden konnten, zur Not „über ein Wochenende“. Typischerweise wurden die klassischen raumakustischen Kenngrößen, die in diesem Zeitraum auch in der ersten Fassung der ISO 3382 von 1997 genormt wurden, auf Farbkarten in der Publikumsfläche angezeigt. Diese Programme stellten eine sehr nützliche Ergänzung zur Modellmesstechnik dar, die auch ihre Vorzüge hat, aber nicht gerade eine einfache Handhabbarkeit zur schnellen Vorhersage raumakustischer Kenngrößen in flächendeckender Form.

Auralisation

Die Reproduktion einer Aufnahme einer Schallquelle in einer Umgebung sollte im Idealfall genau dasselbe Hörerlebnis liefern, wie es beim direkten Hören der Quelle in dieser Umgebung vorläge. Dies ist zwar keine Auralisation, stellt aber eine gute Referenz für Validierungen von Auralisationen dar. Der entscheidende Unterschied zur Auralisation ist, dass hierbei Quelle und Übertragungs Umgebung getrennt voneinander betrachtet werden. Dadurch können beispielsweise mit vorliegenden Audiofiltern, die die Schallausbreitung repräsentieren, verschiedene Schallquellen angehört werden, ohne dass all diese zuvor in der betreffenden Übertragungs Umgebung aufgenommen wurden. Oder eine Quelle kann in verschiedenen Umgebungen angehört werden.

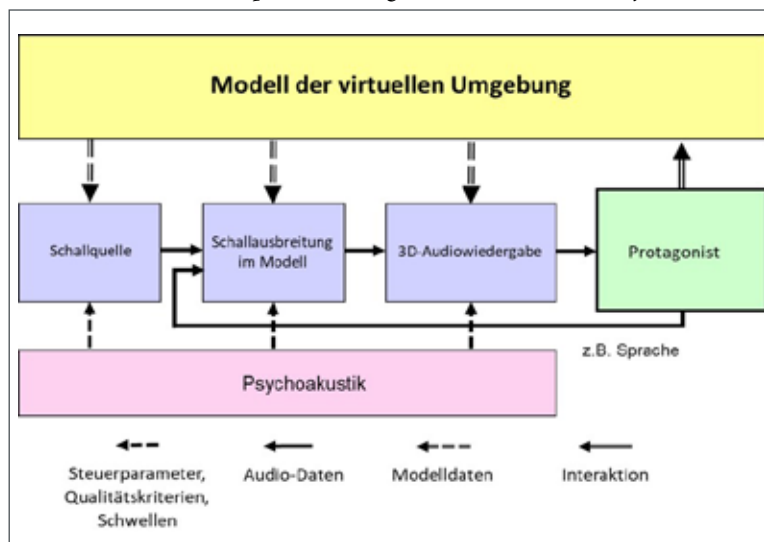
Nun ist es so, dass Impulsantworten eine zentrale Bedeutung bei der Auralisation haben. Sie können mehr oder weniger unmittelbar auch als Audiofilter verstanden werden. Impulsantworten beschreiben die Schallausbreitung in der betreffenden Umgebung vollständig, sofern man von linearen und zeitinvarianten Bedingungen ausgehen kann. Sie können real oder im Modellmaßstab gemessen oder im Computer simuliert werden. Bei letzterem wird noch ein weiterer Vorteil offensichtlich, denn nun sind auch die Komponenten der Schallausbreitung im Computer-

modell (Raumgeometrie, Flächenbeschaffenheiten, Luftdämpfung, usw.) separierbar. Insofern wird bei einer vollständig computerbasierten Auralisation die Schallausbreitung von der Quelle über die Ausbreitung bis zum Empfänger in Komponenten zerlegt, die somit nun austauschbar und damit exzellent für die Anwendung im Hinblick auf Entwurfsprozesse wie für das Großraumbüro (Abb. 2) einsetzbar sind. Es werden in diesem Kontext zuweilen auch die englischen Begriffe der „Sonification“ oder „Audibilization“ verwendet, die unglücklicherweise parallel in anderen Wissenschaften geprägt wurden und zu Verwechslungen führen können. Diese Anwendungen betreffen meistens die Audiowiedergabe wissenschaftlicher Daten, z. B. Hörbarmachungen von Gravitationswellen aus einem Sternenkollaps oder von neurophysiologischen oder informationstechnischen Vorgängen, was immer dann interessant ist, wenn man die enorme Empfindlichkeit und Selektivität des Gehörs nutzen will, um Muster in Daten zu erkennen.

Virtuelle Akustik

Die Auralisation besteht also aus einem modularen Ansatz in Separation von Schallquelle, Schallausbreitungskomponenten und Empfänger [3]. Das Ergebnis ist ein hörbares Schallereignis. Alle Teile sind im Prinzip austauschbar, so dass man in Zuge einer Variation der Komponenten den resultierenden Effekt auf das Hörereignis unmittelbar wahrnehmen kann. Zur Integration in die Systemtechnik der Virtuellen Realität ist es jetzt nur noch ein kleiner Schritt. Den zu gehen, dauerte allerdings 30 Jahre, eher gab es viele kleine Schritte von den ersten multimodalen interaktiven VR-Implementierungen wie „SCATIS“ 1992–1995 [4] und „DIVA“ [5] bis zu den heute etablierten VR-Systemen wie „TASCAR“ [6] (siehe <https://github.com/gisogrimm/tascar>) oder „VA“ [7]

Abb. 4: Schema einer Implementierung eines akustischen VR-Systems.



(siehe <http://virtualacoustics.org/>). Interessanterweise standen in beiden der frühen VR-Systeme multimodale Untersuchungen von Haptik und Akustik im Vordergrund, während die visuelle Komponente nur rudimentäre Bedeutung hatte. Das ist so zu erklären, dass damals die 3D-Computergrafik ebenfalls noch am Anfang ihrer Entwicklung stand.

Heute ist neben der Haptik die Computergrafik die wichtigste Komponente der VR-Technologie und klar in der Mehrzahl der VR-Anwendungen und der Publikationen auf dem Gebiet. Die Akustik spielt aber eine immer größer werdende Rolle, zumal das Gefühl des Eintauchens in die virtuelle Welt („Immersion“) mit einer plausiblen 3D-Akustik-Simulation enorm gesteigert wird. Es sei daran erinnert, dass die Kernmerkmale der Virtuellen Realität die Echtzeit-Simulation und die Interaktion sind, damit realitätsnahe multimodale Erfahrung der virtuellen Umgebung ermöglicht werden. Dies ist immer dann erforderlich, wenn akustische Szenen „ökologisch valide“, d. h. mit einem Aspekt des „Eintauchens“ (Präsenz) repräsentativ für entsprechende Situationen im Alltag dargeboten werden sollen. Dies ist der grundlegende Unterschied zu vorausberechneten Hörbeispielen.

VR-Werkzeuge zur Herstellung von dynamischen dreidimensionalen virtuellen Welten sind mittlerweile in Forschung und Entwicklung ein fester Bestandteil. Ein Überblick der Systemkomponenten ist in Abbildung 4 dargestellt. Das Modell der Umgebung enthält alle Eingangsdaten, die für die Simulation benötigt werden, und genau wie bei der Auralisation sind das Schallquellenposition, Schallleistung, Ausrichtung, Richtcharakteristik, etc. sowie alle Eingangsdaten für die Umgebungen, sei es im Innen- oder im Außenraum. Der Empfänger muss ebenfalls platziert werden, auch bezüglich der Blick-/Hörrichtung. Die akustische virtuelle Realität muss dann in „Echtzeit“ so hergestellt und präsentiert werden, dass sie als quasi-echt wahrgenommen wird. Und dies in Synchronisation mit den Simulationen für die anderen Sinneswahrnehmungen in der virtuellen Realität (visuell, haptisch, taktil, olfaktorisch), von denen nicht immer alle, aber doch möglichst viele zusammenspielen sollten, um eine vollständige Immersion zu erzielen. Die Psychoakustik liefert an dieser Stelle wertvolle Informationen zu Wahrnehmungsschwellen von Details in spektralem, zeitlichem und räumlichem Schall, frei nach dem Motto „Simuliere nur so weit komplex und exakt, wie der Mensch Unterschiede auflösen kann“.

Herausforderungen der akustischen virtuellen Realität – Interaktion in Echtzeit

Ein paar Sätze zu Computerspielen: Diese sind im Moment der wichtigste kommerzielle Treiber der VR-Technologie. In Computerspielen werden Szenen

von teilweise hoher Interaktion präsentiert, auf welche die spielende Person reagieren muss. Eine physikalisch korrekte akustische Szene ist dabei von untergeordneter Bedeutung, so lange plausible Schalle in angemessenen Lautstärken und Richtungen erzeugt werden. Angemessene akustische Effekte reichen daher für diesen Zweck völlig aus. Ein akustischer Effekt-Mischer ist dann viel effizienter als eine korrekte Abbildung der Schallausbreitungsphysik in der betreffenden Umgebung, auch gerade auf kleineren Rechnerstrukturen wie Smartphones oder Tablets. Ein wichtiges Merkmal von VR ist, dass die virtuelle Umgebung in dreidimensionaler Form dargestellt wird. Die anwendungsspezifischen Inhalte können so in die Szene eingebettet werden, so dass man als Nutzer in der Szene agieren, evtl. kommunizieren kann, ja auch die Szene selbst ändern kann, während man sich in ihr aufhält. Ein 3D-Kinofilm wies auch viele dieser Merkmale auf, jedoch nicht die Interaktion. Dementsprechend gibt es Anforderungen an die Rechengeschwindigkeit der Simulation und der Audiosignalverarbeitung.

Auf rechen-technische Effizienz wird ab hier in diesen Artikel das Hauptaugenmerk gelegt werden müssen. Die zweite Anforderung ist nämlich die Interaktion in Echtzeit. Hier müssen Anpassungen an Änderungen der Szene, beispielsweise eine Bewegung der Quelle und/oder des Empfängers, Änderungen in der Ausrichtung von einem oder beiden und/oder es wird etwas in der virtuellen Umgebung geändert. Dies kann der Fall sein, wenn beispielsweise eine Tür geöffnet und ein anderer Raum betreten wird, oder man ändert spielerisch die Eigenschaften der Umgebung durch Ausrichten von Flächen oder Belegung von Flächen mit akustisch wirksamen Materialien oder Formen.

Die Updates der Audiosignalverarbeitung im System (siehe Abb. 4) müssen also quasi instantan und synchron mit den visuellen und haptischen Simulationen erfolgen. Die Schwelle für die Wahrnehmung von Verzögerungen (durch Rechenzeiten für Simulation und Signalverarbeitung), sog. Latenzen, in einer Hörpräsentation hängt stark von der Art des Schallereignisses ab. Im Allgemeinen erachtet man auf Grundlage von Ergebnissen aus der Kognitionspsychologie Update-Raten von mehr als 20 Hz (oder Latenzen von weniger als 50 ms) als ausreichend, um ein unmittelbares und ruckelfreies Klangbild zu erzielen.

Arbeitsschritte zur Schaffung virtueller akustischer Szenen

Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass nicht nur „Schalleffekte“, sondern physikalisch-basierte virtuelle akustische Szenen geschaffen werden sollen. Je nach Anwendung ist zu entscheiden, welche psychoakustischen Kriterien dabei besonders wich-

tig sind und in welchen Komponenten die Auralisation besonders präzise angelegt werden muss. Es ist ja durchaus so, dass jede Auralisation aufgrund technischer Einschränkungen nur eine Illusion schafft, aber niemals ein echtes Abbild der Realität (Eine Diskussion der Gründe dafür würde diesen Artikel sprengen. Es sei auf die Literatur verwiesen, z.B. Brinkmann [8], in der Plausibilität und Authentizität ausführlich untersucht wird.), selbst wenn eine existierende Umgebung vermeintlich exakt reproduziert werden soll. Diese Überlegung bringt uns zur Frage der Validierung an Vergleichen zwischen Realität und Virtueller Realität, doch dazu später mehr. Zuerst müssen Datensätze für Schallquellen und Empfänger in geeigneter Form erstellt werden. Dies bedeutet eine Berücksichtigung zeitlicher und spektraler Eigenschaften, aber auch der räumlichen (Richt-)Wirkungen.

Schallquellen-Charakterisierung

Die Arbeitsschritte in der Virtuellen Akustik beginnen mit der Aufnahme oder der Synthese von Schallsignalen. Hier ist allerdings eine wichtige Bedingung zu berücksichtigen: Beispiele für in 3D aufgenommene Musikstücke sind Mehrkanalaufnahmen und -simulationen (z.B. [9]), die auch auf tonabhängige Abstrahlcharakteristiken anwendbar sind. Bei Klarinetten beispielsweise würde das Abstrahlverhalten (Richtcharakteristik) tonabhängig sein, weil die jeweils geöffneten und geschlossenen Klappen eine komplexe Linienquelle darstellen. Bei Blechblasinstrumenten hingegen kann man davon ausgehen, dass die richtungsabhängige spektrale Abstrahlung für jeden gespielten Ton konstant ist, wodurch dann der gespielte Ton als Eingangssignal von der Abstrahlung separiert werden kann. Dasselbe gilt im Prinzip für die Stimme. Die Richtcharakteristik hängt von der Geometrie des Beugungskörpers der Quelle (Mund an Kopf und Torso) ab. Hierbei wäre jedoch zu fragen, ob es Situationen gibt, in denen die Mundstellung bei verschiedenen Lauten einen Einfluss hat. In wieweit davon abhängige Richtcharakteristiken relevant sind, ist noch nicht abschließend geklärt [10,11].

In dem anderen, einfacheren Ansatz unter Annahme statischer räumlicher Abstrahlung haben Behler et al. [12] Musikinstrumente-Richtcharakteristiken gemessen, die später von Shabtai et al. [13] optimiert und für „Open Access“ veröffentlicht wurden, siehe Abbildung 5 auf der folgenden Seite. Dabei wird die ton- oder phonem-abhängige Abstrahlung vernachlässigt. Wichtiger sind vermutlich dynamische Effekte von Quellsbewegungen für den musikalischen Ausdruck [14].

Die Quellencharakterisierung von Musikinstrumenten und der menschlichen Stimme ist also weit mehr



Abb. 5: Messung der Richtcharakteristik einer Tuba mit einem 32-kanaligen Mikrofonarray.

als eine einfache „Aufnahme“ wie in einem Musikstudio. Viele weitere Faktoren sind zu bedenken, z. B. geeignete Datenformate in hinreichenden Auflösungen in räumlicher und spektraler Dimension.

Nun wäre es schön, wenn dasselbe Konzept mit einem umhüllenden Mikrofonarray generell anwendbar wäre. Leider ist dies bei bewegten Quellen, deren Schallabstrahlung im normalen Betrieb erfasst werden soll, nicht möglich. Wie denken dabei an Verkehrslärmquellen wie Fahrzeuge, Züge oder Flugzeuge. Hier müssen theoretische Quellenmodelle, Computersimulationen oder experimentelle Verfahren eingesetzt werden, auch in Kombination, um zumindest näherungsweise die spektralen Einhüllenden der Teil-Schallleistung von stochastischen Rauschkomponenten (Strahlärm, Reifengeräusche, Windgeräusche, etc.) zu schätzen. Aus diesen Daten können in einem Syntheseschritt vormals neutrale Rauschsignale (weiß, rosa) parametrisch so gefiltert werden, dass die spektralen und richtungsabhängigen Schallintensitäten denen der Verkehrsquellen entsprechen. Die Signalkomponenten aus periodischen oder rotatorischen Vorgängen bei Maschinen oder Motoren sowie bei Rollgeräuschen kann durch eine Synthese hinzugefügt werden, die mithilfe von Umdrehungsdaten pro Minute gesteuert wird. Dies wurde beispielsweise von Pieren et al. [15] für eine Schienenlärmsimulation durchgeführt sowie wie im Überblick von Rizzi [16] beschrieben für die Fluglärmsimulation, zuletzt auch von Dreier und Vorländer [17] für die Auralisation von Verkehrsflugzeugen. Da nun die Quellsignale zumindest in angenäherter Form vorliegen, kann man sich nun die Frage stellen, wie sich der Schall in die Umgebung ausbreitet. Auch hierbei gibt es einfache Fälle und Situationen mit extremen Herausforderungen. Um den Inhalt in diesem Artikel nicht zu sprengen, sollen im Weiteren nur

klassische Luftschallquellen betrachtet werden, wo die abgestrahlte Leistung unabhängig von der Umgebung ist. Dies ist bei Körperschall-Primärquellen überhaupt nicht generell gegeben, aber bei den allermeisten Luftschallquellen durchaus. Man müsste bei der Anregung von Strukturen erst von der an der Quelle erzeugten Kraft über die Kontaktimpedanz zur Körperschallschnelle rechnen, daraus eine Wellenausbreitung in mehreren Freiheitsgraden bestimmen und am Ende evtl. eine Abstrahlung in Luft, die zu einem hörbaren Schallereignis führt. Dieser Fragestellung widmen sich die Kolleginnen und Kollegen bei der Auralisation über die Luftschall-/Körperschall-Transferpfadsynthese z. B. im Automobilbereich.

Schallausbreitungsmodelle

Es soll nun von einer idealen Schnellequelle ausgegangen werden. Die von der Quelle abgestrahlten primären Schallwellen breiten sich durch die Umgebung zum Hörer aus. Im Zusammenhang mit der Auralisation und der virtuellen Akustik ist die Funktion zwischen der Anregung an der Quelle und dem, was beim Hörer empfangen wird, eine Impulsantwort oder eine Übertragungsfunktion, die anschließend in der Audiosignalverarbeitung als „Filter“ verwendet wird. Hierbei ist wichtig, die Auflösung in Zeit- und Frequenzbereich der Quellsignale sowie die Verarbeitungszeit (Latenz) zu berücksichtigen.

Am eingangs genannten Beispiel eines Großraumbüros soll verdeutlicht werden, welche Aspekte hier wichtig sind. Bis zu diesem Punkt haben wir alle Schallquellen (Geräusche aus der Lüftungs- und Klimatechnik, Drucker, Kopierer, Tastaturklappern, Telefongespräche, Gespräche generell) erfasst. Einige dieser Quellen könnten sich bewegen, z. B. Personen, die telefonieren. In der virtuellen Umgebung werden sich alle Schallwellen auf direktem Wege sowie über Reflexionen, Beugungen und Streuungen ausbreiten und schließlich beim Empfänger als Gemisch eintreffen. Die jeweiligen Schallanteile werden mit den spezifischen Impulsantworten gefiltert (gefaltet). So weit, so gut. Nur ist die Grundvoraussetzung für die Faltungsoperationen ein lineares und zeitinvariantes System. Sobald es bei Quelle, Umgebung oder Empfänger Bewegungen gibt, ist die Zeitinvarianz verletzt. Gerade das jedoch soll ja den Unterschied bei der Virtuellen Realität machen!

Die Lösung ist eine stückweise zeitinvariante Verarbeitung mit adaptiven Filtern. Solange die Bewegungen langsam im Vergleich zur Schallgeschwindigkeit sind, ist das ein gut fundierter Lösungsansatz. Bei schneller bewegten Quellen, wie beispielsweise Straßen- oder Schienenfahrzeugen oder Flugzeugen, muss der Dopplereffekt berücksichtigt werden. Aber auch das kann durch variable Verzögerungsleitungen

und spezielle Abtastverfahren geleistet werden [7]. Im Allgemeinen muss die Simulation der Impulsantworten alle relevanten Einwirkungen auf die Schallwellenausbreitung beinhalten, wie beispielsweise Reflexion, Streuung, Transmission, Beugung, Brechung, Dämpfung, Windgeschwindigkeiten und Temperaturprofile in der Atmosphäre, usw.

Nominell „exakte“ Wellenausbreitungsmodelle wie FEM und BEM sind gute Kandidaten, aber sie weisen zu hohe Rechenzeiten auf. Dennoch sind sie in Einzelfällen notwendig, wenn es auf die Simulation von Welleneffekten ankommt, für die geometrische Verfahren nicht anwendbar sind. Die Ergebnisse aus rechenstechnisch „teuren“ Modellen müssten vorausberechnet werden und in Datenbanken so abgelegt werden, dass im Echtzeitbetrieb die passenden Filter aus „Look-Up Tables“ gewählt werden.

Eleganter ist die direkte Lösung mit Simulationsverfahren, die Ergebnisse in Echtzeit, also innerhalb von rund 50 Millisekunden liefern. In der Büroszene beispielsweise könnte die VR-Nutzerin oder der VR-Nutzer sich umschauen oder „herumlaufen“, ebenso können Schallquellen sich bewegen, wodurch die Notwendigkeit entsteht, immer neue Impulsantworten zu berechnen. Erst recht trifft das für eine virtuelle Szene mit Fluglärm zu, wobei sich die Quelle sehr

schnell bewegt, während man sich in der virtuellen Umgebung umschaut. Impulsantwort-Berechnungen in Echtzeit sind jedoch nur mit Hilfe von Näherungen möglich, die substantielle Beschleunigungen der Berechnungsdauer nach sich ziehen. Dies betrifft insbesondere die „Geometrische Akustik“ zu [18]. Diese ist u.a. in Formen von Spiegelschallquellen-Verfahren und vom Ray Tracing bekannt. In der geometrischen Akustik werden Schallpfade konstruiert, indem der Quellpunkt und der Empfangspunkt mit einer geraden Linie verbunden werden, die „Strahlen“ als Pendant zu Wellen (Strahl/Partikel-Welle-Dualismus) betrachtet werden, genau wie in der Strahlenoptik. Nicht so allgemein bekannt ist, dass auch gekrümmte Pfade berechnet werden können, nämlich im Falle der Brechung in geschichteten Medien wie der Atmosphäre [19]. Für die Schallausbreitung neben der direkten Sichtverbindung zwischen Quellen und Empfänger, also über Reflexion, Streuung und Beugung muss der Computer in Windeseile die relevanten Strahlpfade finden. Auf spezielle Algorithmen soll hier nicht eingegangen werden, aber es sei gesagt, dass es parallel zur historischen Entwicklung der virtuellen Akustik eine rasante Entwicklung von numerischen Verfahren gab, von denen einige für Echtzeitanwendungen bestens geeignet sind [18].

MBBM
MÜLLER-BBM GROUP

Beratung | Dienstleistungen | Produkte



Besuchen Sie uns
auf der DAGA 2021
in der Online-Ausstellung
www.daga2021.eu

Kompetenz in Akustik und Schwingungen

Schallschutz | Sound Design | Raum- und Bauakustik | Messtechnik | Bauphysik | Forschung
Industriekustik | Lärmbekämpfung | Messungen | Schwingungsreduktion
Psychoakustik | Prüfeinrichtungen | Medientechnik | Strukturdynamik | Schallschutzsysteme

Messung | Analyse | Lösung | Innovation

www.mbbm.de

Das größere Problem in diesem Zusammenhang, im Grunde das Problem schlechthin bei allen Berechnungen in der Akustik, ist das der Unsicherheit der Eingabedaten. Akustische Randbedingungen in Innen- und Außenräumen, von Gegenständen und Materialien, usw. sind mit Unsicherheiten behaftet, sowohl bei gemessenen Impedanzen oder Absorptionsgraden als auch bei berechneten Werten. Generell kommt hinzu, dass die tatsächliche Wirkung von beispielsweise Absorbern nicht nur von den nominellen Materialdaten abhängt, sondern auch vom Schallfeld an dem Ort, wo sich der Absorber befindet. Das Schallfeldmodell und die Materialdaten müssten generell anwendbar sein. Das gilt für einige „akademische“ Fälle recht gut, aber was ist mit der nicht-lokal reagierenden Impedanz auf dem Oberflächenmesh eines Fahrersitzes in einem PKW, mit dem Absorptionsgrad einer „Akustikdecke“ oder eines Ackerbodens bei streifendem Schalleinfall, was ist die richtige Wahl der Impedanz für ein verschraubtes Element im Leichtbau? Im Allgemeinen können hier keine exakten Lösungen erwartet werden. Glücklicherweise reichen Näherungen meist völlig aus, wobei die wichtigste Frage bleibt, ob diese Auswirkungen dieser Unsicherheiten hörbar sind. Vorländer zeigte [20], dass Unsicherheiten der Absorptionsgrade aus Hallraummessungen in der Raumakustik so groß sind, dass sie bei Auralisationen über den Hörbarkeitsschwellen für raumakustische Wahrnehmungen liegen. Das wiederum hat zur Konsequenz, dass bei sehr präzisen Vergleichen von gemessenen und simulierten Räumen die Eingangsdaten „angepasst“, d.h. manipuliert werden, bis die Auralisation mit der Messung oder Aufnahme gut übereinstimmt. Insofern darf man von vornherein von einer „blinden“ Auralisation keine absolut exakten Ergebnisse erwarten. Das Fazit an der Stelle lautet, dass wir sehr gute Schallausbreitungsmodelle haben, aber nach wie vor großer Bedarf besteht an mehr Forschung zu akustischen Materialmodellen und Testverfahren!

Nun sind also Quelldaten und Schallausbreitungsmodelle verfügbar, mit denen man das Schallfeld am Empfangspunkt simulieren kann. Der Empfänger ist aber nun kein mathematischer Punkt mehr. Da steht jemand, und diese Person hört das virtuelle Schallergebnis in einem dreidimensionalen Raum.

3D-Hören und -Sehen in virtuellen Welten

Wiedergabetechnologie für „3D-Audio“ ist ein wesentlicher Bestandteil von VR-Systemen, die in der Lage sein müssen, hohe Qualitätsstandards hinsichtlich der psychoakustisch relevanten Wahrnehmungsaspekte zu erfüllen. Details können von einer VR-Anwendung zur nächsten unterschiedlich sein. Einige Anwendungen erfordern eine genaue Lokalisierung, während für andere monaurale Spektral-

merkmale wie die Wiedergabe mit exakter Lautheit und Klangfarbe wichtiger sind.

In visueller Analogie liefern moderne „Shutterbrillen“ auf Basis von Polarisationsfiltern oder Grün-Rot-Filtern in Verbindung mit hochauflösenden Videodisplays recht gute stereoskopische Bilder, genauso wie die heute immer populärer werdenden Head-Mounted-Displays (HMD) oder „VR Goggles“. HMDs verfügen über zwei kleine Videodisplays, die in Brillen oder einen Helm integriert sind. Zwei leicht verschobene Bilder für das linke und das rechte Auge werden für die Illusion von Tiefe im Video erstellt, ähnlich wie bei alten stereoskopischen Geräten. Bei der Betrachtung von Objekten in der Nähe erlaubt das binokulare Sehen eine Schätzung von Richtungen und Entfernungen. Mit dem rechten Auge sehen wir ein nahegelegenes Objekt, das auf einen anderen Teil der Netzhaut projiziert wird als das linke, und dieser Unterschied wird bedeutender, wenn sich das Objekt in der Nähe befindet. Insofern sind Technologien für das räumliche Sehen bereits in qualitativ guten Lösungen verfügbar. Das ist bei der 3D-Audiotechnik mittlerweile auch der Fall.

Ein 3D-Audiowiedergabesystem für VR-Anwendungen in der Forschung sollte nicht mit Surround-Sound-Systemen in der Unterhaltungselektronik verwechselt werden. Der Hauptunterschied besteht darin, dass VR-Anwendungen auf physikalischen Modellen und einem möglichst hohen Grad an Realismus in den Komponenten Schall- und Schwingungserzeugung, -übertragung und -wiedergabe fußen. Dies ist ein anderes Ziel, als es von einem Toningenieur für eine Musikproduktion verfolgt wird. Selbst bei Live-Aufnahmen verwendet er oder sie Aufnahmetechniken und Strategien für die ästhetische Optimierung und räumliche Platzierung von Instrumenten, um das beste Ergebnis für eine Lautsprecheranordnung in heimischer Umgebung zu erzielen, die dann Stereo- oder 5.1-Signale wiedergeben.

3D-Audioverfahren, die infrage kommen, sind die Binauraltechnik mit Kopfhörer oder „transauralen“ Lautsprechern [21]. Kopfhörer sind trotz einiger Nachteile bei der individuellen Kalibrierung und der Abbildungstreue die einfachste Lösung. Transaurale Stereo-Lautsprecher liefern Schalldrucksignale am Trommelfell, die Kopien der binauralen Signale in der virtuellen Szene sind. Dabei muss sichergestellt werden, dass das Übersprechen vom rechten Kanal auf das linke Ohr unterbunden wird, und umgekehrt. Diese Technik findet sich in den üblichen „Soundbars“ für Fernsehgeräte.

In beiden Fällen, Kopfhörer- und Lautsprecherbeschallung müssen einige Koordinatensysteme festgelegt werden. Das erste ist das Koordinatensystem der Abhörposition und der Blickrichtung bezüglich

der Lautsprecher im Abhörraum, das zweite ist dies bezüglich der Position und Blickrichtung in der virtuellen Szene. Bei der Kopfhörertechnik ist sofort einzusehen, dass das Schallereignis sich mit einer Kopfdrehung der Person mit dreht, was bedeutet, dass sich die virtuelle akustische Szene mit dreht. Um die virtuelle akustische Szene im 3D-Wahrnehmungsraum der Person zu fixieren, muss eine Adaption der Auralisation und der Wiedergabe-Bezugsrichtungen erfolgen. Dies geschieht über sogenanntes „Head-Tracking“, mit dem die Kopfausrichtungen unter Verwendung von Vorrichtungen wie Trägheits- oder Infrarotsensoren bestimmt und in den Koordinatensystemen von Abhörraum und virtuellen Raum die Winkelbezüge zu den optischen und akustischen Objekten hergestellt werden.

Korrekte Winkelbezüge zwischen Schalleinfallrichtungen und der Kopfrichtung sind also essentiell. In der Binauraltechnik gehen diese Winkel unmittelbar in die Auswahl der kopfbezogenen Übertragungsfunktionen (head-related transfer function, HRTF) ein. Demgegenüber sind bei Mehrkanal-Lautsprecherverfahren die Winkel zwischen der Abhöranlage und den zuhörenden Personen nur einmalig einzustellen, nämlich beim Bezug zwischen der Abhöranlage und dem Koordinatensystem der virtuellen Szene. Das liegt daran, dass die Lautsprecher die Zuhörenden idealerweise vollständig umgeben und Wellenfelder erzeugen, die von den virtuellen Objekten stammen. „Ambisonics“ ist ein Beispiel für ein solches Surround-Sound-Format, das Signale nicht nur in der horizontalen Ebene, sondern in Elevation erzeugen kann (siehe Abb. 6). Es wurde von Gerzon (1985) eingeführt [22]. Es ist mittlerweile eine ziemlich weit verbreitete Technologie für 3D-Audio-Aufnahme und -Wiedergabe. Das mathematische Konzept für Ambisonics basiert auf sphärischen Harmonischen (SH), einer orthogonalen Funktionenbasis, die eine Lösung der Wellengleichung in Kugelkoordinaten sind. Dieses Verfahren ermöglicht Zerlegung der virtuellen Schallobjekte in ebene Wellen, aus der die Lautsprecheransteuerungen so berechnet werden, dass in Summe der Lautsprecher-schalle eine Welle mit der gewünschten Schalleinfallrichtung des virtuellen Objekts generiert wird. Ein „Objekt“ in diesem Sinne ist eine jede Teil-Welle in einer Simulation, sei es ein Direktschall, eine Reflexion, usw.

3D-Eindrücke mit Ambisonics gelingen in einem gewissen Bereich (sweet spot) im Zentrum der Lautsprecheranordnung und für tiefe Frequenzen gut, außerhalb sind jedoch weder Lokalisation noch andere akustische Wahrnehmungen korrekt. Ambisonics-Systeme höherer Ordnung (Higher-Order Ambisonics, HOA), d. h. mit mehr Kanälen, liefern bessere



Abb. 6: Versuchsperson mit 3D-Brille in einem HOA-Lautsprecherarray.

Ergebnisse im Sinne größerer Sweet Spots, auch für Bereiche, in denen mehrere Personen an der virtuellen Schallszene teilhaben können sowie für eine korrekte Wiedergabe auch für höhere Frequenzen.

Andere Lautsprecher-basierte Techniken sind das „Vector-Basis Amplitude Panning“ (VBAP) und die Wellenfeldsynthese, beide unter Verwendung von Mehrkanalanlagen [23, 24].

Anwendungsbeispiele

Über Anwendungen von Virtueller Akustik zu lesen, ist höchst ineffizient. Daher wird hier auf umfangreiche weitere Ausführungen verzichtet. Der Punkt ist doch, dass man diese virtuellen Welten erleben und nicht nur darüber lesen muss. Unter den unten angegebenen Links sind einige Beispiele zu finden, die man sich als audiovisuelle Beispiele anhören und ansehen kann.

Es sei hier über die besonderen Herausforderungen bei der Herstellung der virtuellen Szenen berichtet. Die Beispiele sind eine subjektive Auswahl des Autors und erheben nicht an den Anspruch auf eine vollständige Abdeckung der Aktivitäten in der Virtuellen Akustik.

Beratungsprojekte im Bauwesen

Sofern eine architektonische Umgebung (Raumakustik, Bauakustik, Stadtplanung, Raumplanung) bereits existiert, kann sie als Referenz dienen, und das virtuelle Modell kann zunächst an dieser Referenz ausgerichtet und validiert werden. Jede Modifikation der Umgebung kann anschließend implementiert und bewertet werden, auch beispielsweise in Soundscape-Untersuchungen. Ein Beispiel findet sich am Ende des Artikels im Abschnitt „Multimedia-Beispiele“.

Sofern die architektonische Umgebung noch nicht



Abb. 7: Computermodelle zur Visualisierung des Gebäudes des Instituts für Hörtechnik und Akustik.

existiert, muss die virtuelle Umgebung „blind“ erstellt werden. Hier stellt sich typischerweise das Problem der Unsicherheit der akustischen Eingangsdaten zur Charakterisierung von Oberflächen, was nur mit Akustik-Expertise und -Erfahrung geleistet werden kann. Der Vergleich am Ende des Prozesses, zwischen der realen Umgebung und der Vorab-Auralisation, ist dann ein spannender Moment.

Mit Architektur-Software können mittlerweile fotorealistische Bilder erzeugt werden, die in Auflösung, Detailtreue und Beleuchtung quasi ununterscheidbar von der Realität sind (siehe Abbildung 7). Ein Dilemma in der Praxis der 3D-Modellierung ist, dass dabei Anforderungen aus diversen Disziplinen zu einem geschlossenen Szenario zusammengeführt werden müssen. Erst wenn Verbindungen zwischen den einzelnen Modellelementen geschaffen wurden, ermöglicht dies die gestalterische Optimierung zwischen verschiedenen Modalitäten auf verschiedenen Detailebenen (siehe auch: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4629715>, <https://doi.org/10.5281/zenodo.4629759>) [25].

Entwicklungsprozesse in der Industrie („Virtual Prototyping“)

Die Virtuelle Produktentwicklung am Computer wurde im Zuge von schnelleren Modellzyklen in den letzten Jahren immer wichtiger. Produkte in diesem Sinne können alle Fahrzeuge, Maschinen oder Geräte sein, für die produktspezifische oder sogar firmenspezifische Geräusche und Klänge entwickelt werden sollen oder für die Grenzwerte einzuhalten sind. Hierbei handelt es sich meistens um Weiterentwicklungen von Vorgängerserien, die sich in ihrem

Schwingungsverhalten oder der Schallabstrahlung vermessen lassen können. Virtuelle Prototypen, d. h. Computersimulationen und Auralisationen der Produkte der nächsten Generation können zumindest teilweise an diesen Messungen validiert werden, jedenfalls solange bei der Konstruktion nicht völlig neue Richtungen eingeschlagen werden. Insofern sind die Herausforderungen teilweise gut beherrschbar. Die ganze Komplexität eines Fahrzeugs in allen Betriebszuständen in Interaktion in Fahrsimulatoren virtuell darzustellen, erfordert zwar einen großen Aufwand, ist aber durchaus noch kostengünstiger und vor allem viel flexibler als eine Reihe von Prototypen zu bauen. Beispiele finden sich in den Akustik-Abteilungen aller größeren Automobilhersteller sowie bei NVH-Consulting-Dienstleistern.

Historische Szenen

Eine Zeitreise ins Mittelalter ist doch nicht so einfach herzustellen, wie man zunächst denkt. Natürlich wäre es faszinierend, im Aachen des 9. Jahrhunderts in der Innenstadt spazieren zu gehen und den Aachener Dom zu besuchen. Das Szenario müsste mit Geräusch-Kakophonie in der Stadt beginnen, mit ratternden Ochsenkarren, laut gestikulierenden Menschen, Hammerschläge von einem Schmied, und viele andere Schalle, die heute niemand in einer Innenstadt erwarten würde. Was tun? Historiker müssten erst einmal sorgfältiges Quellenstudium betreiben, den sozio-kulturellen Hintergrund bestimmen und die akustisch und optisch relevanten Vorlagen für die Erstellung der virtuellen Umgebung liefern. Danach käme die Aufgabe, die Schallquellen

zu identifizieren bzw. die Schallsignale zu beschaffen, beispielsweise die Hammerschläge von einem Schmied oder die Vorbeifahrt einer Pferdekutsche auf Kopfsteinpflaster. Hier wird deutlich, dass der Blickwinkel aus der Akustik zwar wichtig ist, aber längst nicht vollständig. Wir stehen mitten in einer interdisziplinären Fragestellung. In ähnlicher Weise haben Pedrero et al. [1] eine Kirche in Spanien aus dem elften Jahrhundert rekonstruiert (Abb. 1). Ziel war, einen typischen Raum für den so genannten „Mozarabischen Gesang“ zu untersuchen. Die virtuell modellierte Kirche ist San Juan de Baños in Baños de Cerrato (Castilla y León, Spanien) in der Nähe von Valladolid. Dementsprechend wurden verschiedene Szenarien aus historischen Dokumenten und aus Gemälden in VR rekonstruiert, um den akustischen Effekt auf die Singstimmen zu untersuchen. Dieser Gesang musste aber zunächst nach alten Dokumenten erforscht und von einem Chor, der darauf spezialisiert ist, aufgenommen werden, so gut es eben ging, um die vermutlich im elften Jahrhundert geübte Praxis nachzubilden.

Forschung und Lehre

Für jede Anwendung ist eine sorgfältige Betrachtung der ganzen Simulationskette von der Quelle bis zum Empfänger sowie des Versuchsdesigns erforderlich. Genau das unterscheidet die Virtuelle Akustik in akustischer Forschung und Praxis vom 3D-Sound in Computerspielen, in denen zwar beeindruckende 3D-Szenarien dargestellt werden, auch hochgradig interaktiv, aber eben ohne Bezug zu den physikalisch realen Bedingungen in der jeweiligen Szene.

Die Nutzung von Virtueller Akustik in Laborumgebungen ist bereits gut etabliert und wird im Sinne einer reproduzierbaren Forschung zunehmend eingesetzt. Beispiele finden sich in fast jeder Ausgabe wissenschaftlicher Zeitschriften oder in Tagungsbänden im Bereich der Akustik. Hierbei sind Arbeiten zur Vergleichbarkeit zwischen der „Realität“ und der „virtuellen Realität“ oft im Fokus, in denen untersucht wird, ob die simulierten Szenen plausibel oder gar authentisch sind. Aktuelle Beispiele dafür aus dem Bereich der Bau- und Raumakustik sind für Musikräume [26], für die Luftschalldämmung in Gebäuden [27] sowie für Klassenräume [28].

Noch realitätsnäher eingebettet sind psychoakustische Experimente, wenn sie in der eigenen Wohn- oder Arbeitsumgebung durchgeführt werden können. Auch dies ist in einer rasanten Entwicklung. Über Online-Hörversuchskonzepte wurde kürzlich von Gallun berichtet [29]. Die zusätzlichen Herausforderungen hierbei sind dann die Sicherstellung der Qualität der Audiowiedergabegeräte vor Ort, deren Verhalten bei der 3D-Wiedergabe nicht nur hinsicht-

lich der Pegelkalibrierung, sondern auch hinsichtlich der Klangfarben- und Lokalisationstreue zu bedenken, je nachdem, was für das jeweilige Versuchsparadigma relevant ist.

Abschließende Bemerkungen – wo geht die Reise hin?

Die menschliche Fähigkeit, dynamische akustische Situationen zu verarbeiten, ist ein wesentlicher Bestandteil für die Kommunikation und Orientierung im Alltag. Dennoch sind zahlreiche Hörversuchsmethoden der gegenwärtigen Praxis noch weit von realistischen Bedingungen entfernt. Studien mit Hilfe von multimodaler Virtueller Realität werden zunehmend an Bedeutung gewinnen, da virtuelle Umgebungen so flexibel sind, dass sich völlig neuartige Möglichkeiten für Fortschritte in der Lärmbewertung und in der psychoakustischen Forschung anbieten, ferner in Hördiagnose und -rehabilitation, um nur einige Beispiele zu nennen.

Ein prominentes Beispiel für ein aktuelles Forschungsnetzwerk an der Schnittstelle zwischen Akustik, Psychologie und Informatik ist das DFG-Schwerpunktprogramm 2236 „Auditive Kognition in interaktiven virtuellen Umgebungen“ (AUDICTIVE, siehe <http://www.spp2236-audictive.de/>, Leitung: Janina Fels), welches das Ziel verfolgt, Beiträge zum Verständnis komplexer audiovisueller Szenen und neue tri-direktionale Synergieeffekte zwischen Akustik, Psychoakustik und zur Informatik zu liefern. Hier muss allerdings genauso wie in der Laborpraxis auf sorgfältige Dokumentation und Reproduzierbarkeit höchsten Wert gelegt werden. Nicht ohne Grund ist in AUDICTIVE ein größerer Projektanteil mit dem Forschungsdatenmanagement befasst.

An dieser Stelle treffen wir auf die enorme Komplexität einer akustischen Virtuellen Umgebung. Die Quelle muss in nachhaltig verfügbaren Standardformaten beschrieben werden, die Umgebungsmodelle ebenso. Es bieten sich diverse Formate an, insbesondere aus Architekturprogrammen wie AutoCAD, Rhinoceros3D, Blender, 3ds Max, Maya oder SketchUp. „Gaming“-Softwarepakete wie Unity oder UnrealEngine bieten ebenfalls Schnittstellen zu Akustiksimulationen. Die Wiedergabetechnik kann kopfhörerbasiert oder lautsprecherbasiert sein. In allen Komponenten dieser Kette können Entscheidungen für bestimmte Varianten große Einflüsse auf die Ergebnisse und damit auf die Reproduzierbarkeit haben. Die langfristige Verfügbarkeit von technischen Formaten für die Aufnahme und Wiedergabe von Audiodaten ist damit ebenfalls nicht sicher beantwortet. Die Technik wandelt sich ständig. Wer kann heutzutage noch Tonwalzen abspielen? Oder Musikkassetten mit dem Rauschunterdrückungssys-

tem „High Com“? In der digitalen Welt scheint dies zwar einfacher in der Handhabbarkeit zu sein, aber das ist nicht unbedingt so, zumindest nicht ohne sehr sorgfältige Klärung von Standards.

Ein weiteres Beispiel für diese Problematik ist die Diskussion über die Austauschbarkeit von Forschungsdaten für Virtuelle Szenen im Kontext für Hörversuche im DFG-Sonderforschungsbereich 1330 „Hörakustik: Perzeptive Prinzipien, Algorithmen und Anwendungen“ (HAPPAA, siehe <https://uol.de/sfb1330>, Leitung: Volker Hohmann), in dem Forscherinnen und Forscher der Universität Oldenburg mit Kolleginnen und Kollegen der TU München und der RWTH Aachen für drei Szenarien Modellimplementierungen in mehreren VR-Systemen mit nominell identischem 3D-Erlebnis erarbeiten. Dies erfolgt zunächst parallel und mit vielen systemspezifischen Einstellungen „per Hand“. Warum geht das nur so? Weil es noch keinen Standard für akustische VR-Daten gibt, der eine solide und nachhaltige Basis bereitstellt. Bis das nicht verfügbar ist, bleibt bei jedem Vergleich zwischen der Realität und der Virtuellen Realität oder zwischen zwei Implementierungen Virtueller Realitäten die Frage, woher die Unterschiede in der Wahrnehmung stammen: Von Quelle, Simulationsmodell oder Wiedergabetechnik? Man mache sich klar, dass in jeder der drei Komponenten eine Vielzahl weiterer Faktoren verborgen sind, zu denen auf jeder DAGA ganze Sitzungen veranstaltet werden z. B. zur Optimierung von HRTF, zur Arraytechnologie, zur Quellcharakterisierung, zu Schallausbreitungsmodellen, etc. Und das ist gut so! Hier findet sich ein sehr großer Bedarf und eine große Motivation für die Weiterentwicklung der Grundlagenforschung in der Akustik. Dies aufzugreifen und über geeignete Standardformate für die Virtuelle Akustik nachzudenken, ist folgerichtig eine wichtige Aufgabe für den Fachausschuss „Virtuelle Akustik“ der DEGA.

Fazit

Vielleicht haben Sie beim Lesen schon mal kurz daran gedacht. Wir sind im Grunde auf dem Weg zu so etwas wie dem „Holodeck“ von Star Trek (siehe <https://bit.ly/2OCHfZe>). Das Holodeck ist ein Raum, in dem der Benutzer eine virtuelle Welt erleben kann, einschließlich der Interaktion mit virtuellen Objekten und/oder virtuellen Lebensformen. VR ist ein sehr leistungsfähiges Computerwerkzeug, mit dem man auf 3D-Geräten auditiv-visuelle Eindrücke erleben kann. Die VR-Technologie begann mit aufwändiger und teurer Hardware in Konfigurationen von CAVE-ähnlichen Umgebungen, die bereits mit dem Holodeck verglichen werden können, was in der Fernsehserie „StarTrek“ gezeigt wurde. Ein Holodeck dieser Art liegt noch weit in der Zukunft.

Aber wir erleben gerade eine rasante Weiterentwicklung von mobilen Endgeräten wie Head-Mounted Displays (HMD) und Kopfhörern, mit denen audiovisuelle Präsentationen für jedermann erschwinglich werden und somit sehr schnell weiter in Unterhaltung, Gaming, und soziale Netzwerken etabliert werden. Warum dann nicht diese Technik auch für Forschung, Entwicklung, Lehre und Praxis in der Akustik nutzen?

Danksagung

Der Autor dankt den ehemaligen und heutigen Mitgliedern der VR-Arbeitsgruppe am Institut für Hörtechnik und Akustik der RWTH Aachen: Lukas Aspöck, Christian Dreier, Anne Heimes, Simon Kersten, Michael Kohnen, Tobias Lentz, Josep Llorca-Bofí, Imran Muhammad, Sönke Pelzer, Philipp Schäfer, Oliver Schmitz, Dirk Schröder, Jonas Stienen und Frank Wefers sowie der VR-Gruppe in der Fachgruppe Informatik geleitet von Prof. Torsten Kühlen. Die Arbeit von Michael Vorländer und seiner Gruppe wurde hauptsächlich von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt.

Ein Artikel mit ähnlichem Inhalt wurde 2020 in „AcousticsToday“ veröffentlicht (<https://acoustics-today.org/are-virtual-sounds-real-michael-vorlander/>)

Multimedia-Beispiele

- Virtuelle Akustik am IHTA der RWTH Aachen University: <https://bit.ly/36ZlqUw>
- Park und Kongresszentrum: <https://bit.ly/33L4foW>
- Fluglärm: <https://bit.ly/33KzgcB>
- Interaktive Szene in einem Park: <https://bit.ly/2peKdnE>
- Ein Blick in eine Sportarena: <https://bit.ly/2X8CxQs>
- Die Interaktion mit „Virtual Humans“: <https://bit.ly/373l0hd>
- Parkszenen mit eingebettetem Fluglärm: <https://bit.ly/3cyLCva>

Literatur

- [1] Pedrero, A.; Díaz-Chyla, A.; Pelzer, S.; Pollow, M.; Díaz, C.; Vorländer, M.: Auralization of Mozarabic chant in a pre-romanesque church. Proc. Tenciacustica, Valladolid, Spain, 1.448, 2013.
- [2] Krokstad, A.; Strøm, S.; Sørsdal, S.: Calculating the acoustical room response by the use of a ray-tracing technique. J. Sound Vib. 8, 118, 1968.
- [3] Vorländer, M.: Auralization – Fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality. 2nd edition. Springer Nature Switzerland AG 2020. (383 pages)
- [4] Blauert, J.; Lehnert, H.; Sahrhage, J.; Strauss, H.: An Interactive Virtual-Environment Generator for Psychoacoustic Research. I: Architecture and Implementation. Acta Acustica united with Acta Acustica 86, 94, 2000.
- [5] Savioja, L.; Huopaniemi, J.; Lokki, T.; Väinänen, R.: Crea-

- ting Interactive Virtual Acoustic Environments. *J. Audio Eng. Soc.* 47, 675, 1999.
- [6] Grimm, G.; Luberadzka, J.; Herzke, T.; Hohmann, V.: Toolbox for acoustic scene creation and rendering (TASCAR): Render methods and research applications. *Proc. Linux Audio Conference*, 9, 2015.
- [7] Wefers, F.; Vorländer, M.: Flexible data structures for dynamic virtual auditory scenes. *Virtual Reality* 22(4), 281, 2018.
- [8] Brinkmann, F.: Binaural processing for the evaluation of acoustical environments. Doctoral Thesis, TU Berlin. 2019. <https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/9454>
- [9] Rindel, J. H.; Otondo, F.; Christensen, C. L.: Sound source representation for auralization. *Proc. International Symposium on Room Acoustics: Design and Science*, Awaji, Japan, April 11–13, 2004.
- [10] Bellows, S. D.; Leishman, T. W.: High-Resolution Analysis of the Directivity Factor and Directivity Index Functions of Human Speech. *Proc. 146th AES Convention* (Dublin, Ireland). 2019.
- [11] Ehret, J.; Stienen, J.; Brozdowski, C.; Bönsch, A.; Mittelberg, I.; Vorländer, M.; Kuhlen, T.: Evaluating the Influence of Phoneme-Dependent Dynamic Speaker Directivity of Embodied Conversational Agents' Speech. *Proc. 20th ACM International Conference on Intelligent Virtual Agents – ACM New York, NY, USA*, 1, 2019.
- [12] Behler, G. K.; Pollow, M.; Vorländer, M.: Measurements of musical instruments with surrounding spherical arrays. *Proc. Acoustics 2012, 11th Congrès Français d'Acoustique*, Nantes, France, 761, 2012.
- [13] Shabtai, N. R.; Behler, G. K.; Vorländer, M.; Weinzierl, S.: Generation and analysis of an acoustic radiation pattern database for forty-one musical instruments. *J. Acoust. Soc. Am.* 141, 1.246, 2017.
- [14] Ackermann, D.; Böhm, C.; Brinkmann, F.; Weinzierl, S.: The acoustical effect of musicians' movements during musical performances. *Acta Acustica united with Acustica* 105(2), 356, 2019.
- [15] Pieren, R.; Heutschi, K.; Wunderli, J. M.; Snellen, M.; Simons, D. G.: Auralization of railway noise: Emission synthesis of rolling and impact noise. *Applied Acoustics* 127, 34, 2017.
- [16] Rizzi, S. A.: Toward reduced aircraft community noise impact via a perception-influenced design approach. *Proc. Internoise, Hamburg, Germany*, 220, 2016.
- [17] Dreier, C.; Vorländer, M.: Aircraft noise – Auralization-based assessment of weather-dependent effects on loudness and sharpness. *J. Acoust. Soc. Am.* 145, 3.565, 2021.
- [18] Savioja, L.; Svensson, U. P.: Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *J. Acoust. Soc. Am.* 138(2), 708, 2015.
- [19] Wilson, D. K.: Outdoor Sound Propagation Calculator. In V. E. Ostashev and D. K. Wilson, *Acoustics in Moving Inhomogeneous Media* (Second Edition). Taylor & Francis, 2015. https://www.routledge.com/downloads/Y105698/Y105698_Web_Download.zip
- [20] Vorländer, M.: Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties. *J. Acoust. Soc. Am.* 133(3), 1.203, 2013.
- [21] Blauert, J.: *Spatial Hearing: the psychophysics of human sound localization*. 2nd edition MIT Press Cambridge MA. 1996.
- [22] Gerzon, M. A.: Ambisonics in multichannel broadcasting and video. *J. Audio Eng. Soc.* 33, 859, 1985.
- [23] Pulkki, V.: Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning. *J. Audio Eng. Soc.* 45, 456, 1997.
- [24] Berkhout, A. J.: A holographic approach to acoustic control. *J. Audio Eng. Soc.* 36, 977, 1988.
- [25] Llorca-Bofi, J.; Vorländer, M.: Multi-Detailed 3D Architectural Framework for Sound Perception Research in Virtual Reality. *Front. Built Environ.* 7:687237, 2021. DOI: 10.3389/fbuil.2021.687237
- [26] Brinkmann, F.; Aspöck, L.; Ackermann, D.; Lepa, S.; Vorländer, M.; Weinzierl, S.: A round robin on room acoustical simulation and auralization. *J. Acoust. Soc. Am.* 145 (4), 2.746, 2019.
- [27] Imran, M.; Vorländer, M.; Schlittmeier, S. J.: Audio-video virtual reality environments in building acoustics: An exemplary study reproducing performance results and subjective ratings of a laboratory listening experiment. *J. Acoust. Soc. Am.* 146, EL310–EL316, 2019.
- [28] Blau, M.; Budnik, A.; Fallahi, M.; Steffens, H.; Ewert, S., van de Par, S.: Toward realistic binaural auralizations – perceptual comparison between measurement and simulation-based auralizations and the real room for a classroom scenario. *Acta Acustica* 5, 8, 2021.
- [29] Gallun, F.: Flipping the lab: Portable automated rapid testing (PART) systems for psychological acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.* 148(4), 2020. <https://doi.org/10.1121/1.5147343> ■



Prof. Dr. rer. nat.
Michael Vorländer
RWTH Aachen
University

HBK SOLUTION DAYS 2021

Der perfekte Mix aus Learning und Networking

Auf Sie warten diese Thementage: Schall & Schwingung im Fokus,
Structural Testing 360°, eMobility und Dehnungsmessstreifen kompakt.

München: 26. - 28. Oktober 2021

Darmstadt: 16. - 19. November 2021

Jetzt kostenlos anmelden



Mit Feuchtigkeit gegen die Schalltransmission

Marcus Hermes

Einschalige Bauteile finden sich häufig in Gebäuden aller Nutzungsarten. Gegenüber mehrschaligen Konstruktionen weisen sie einen einfacheren Aufbau mit weniger Materialschichten auf. Dadurch erscheinen sie häufig kosteneffizient und Baustoffressourcen-optimiert. Zahlreiche Einflussgrößen prägen die akustischen Eigenschaften einschaliger, plattenförmiger und trockener Bauteile. Hierzu gehören die Masse, die Biegesteifigkeit, die Lage der Koinzidenzgrenzfrequenz und der Gesamtverlustfaktor genauso wie die anregende Frequenz des Luftschalls, der Schalleinfallswinkel oder die Kennimpedanz der Luft. Jeder mineralische Wandbildner besitzt eine eigene produktspezifische Porenstruktur. Gerade in diesen Baustoffporen erfolgt eine hygrothermisch bedingte, stetige Anpassung des Feuchtegehalts. Das eingelagerte Porenwasser verändert die Masse des Bauteils und damit die Luftschalldämmung. Neben diesem bekannten Masseeffekt erhöht ein weiterer Mechanismus die Luftschalldämmung: Je kleiner die Porengrößen, desto größer sind die mechanischen Wirkkräfte, die durch eingelagertes Porenwasser entstehen. Die bestehenden Gleichungen berücksichtigen dies nicht. Beim neuen Rechenansatz wird der Wandbaustoff als poröses Medium mit festen und flüssigen Anteilen betrachtet. Er ermöglicht die Berechnung des Luftschalldämm-Maßes für einschalige Trennwände unter hygrischer Belastung für gesättigte und teilgesättigte Feuchtezustände mit hoher Genauigkeit. Die Berechnungsergebnisse liefern wertvolle Informationen für die Planung und die Produktentwicklung von neuen Baustoffen.

Einführung

Der gesunde Mensch hört mit seinen Ohren vierundzwanzig Stunden täglich. Das Hören selbst findet nahezu ohne Zeitverzögerung statt. Dem einmal Gehörten kann der menschliche Körper nicht mehr entfliehen. Gleichzeitig sieht er sich einem zunehmend (hör-)reizüberfluteten beruflichen und privaten Umfeld ausgesetzt. Als Gegenreaktion wächst unweigerlich das Bedürfnis regelmäßig „abzuschalten“, denn Wohlbefinden und Gesundheit sind ohne Ruhepausen stark gefährdet. Doch das gelingt insbesondere in einer dicht besiedelten urbanen Umwelt immer weniger. Dadurch steigen nicht zuletzt auch die sozialen Spannungen, was sich in der wachsen-

With moisture against sound transmission

Single-leaf partitions are recommended in buildings of all types of use, not least for reasons of cost efficiency and possible resource optimisation. Numerous factors influence the acoustic properties of single-leaf, plate-shaped and dry partitions. These include the mass, the bending stiffness, the position of the critical frequency and the total loss factor as well as the stimulating frequency of the airborne sound, the sound incidence angle or the characteristic impedance of the air. Each mineral wall-building material has its own product-specific pore structure. It is precisely in these building material pores that a hygrothermal, continuous adjustment of the moisture content takes place. The stored pore water changes the mass of the building component and thus the airborne sound insulation. In addition to this well-known mass effect, a further mechanism increases the airborne sound insulation: the smaller the pore sizes, the greater the mechanical forces caused by stored pore water. The existing equations do not take this into account. In the new calculation approach, the wall building material is considered as a porous medium with solid and fluid components. It allows the calculation of the airborne sound reduction index for single-leaf partitions under hygric load for saturated and partially saturated moisture conditions. The calculation results provide valuable information for the product development of new building materials.

den Zahl von Fällen widerspiegelt, in denen sich Gerichte mit Lärmfragen auseinandersetzen. Es scheint, als entwickle sich „Ruhe“ unaufhaltsam zu einem Luxusgut. Folglich werden Wohn- und Arbeitsräume, aber auch mobile Räume in Verkehrsmitteln, zunehmend als Rückzugsraum verstanden. Der dort erhoffte „Ruhe-Insel“-Effekt greift allerdings nur, wenn die den Raum umgebenden Trennbauteile geeignet hohe Schalldämmwerte aufweisen. Diese wiederum stehen in Abhängigkeit zu anderen bauphysikalischen Eigenschaften, wie zum Beispiel den thermischen oder den hygrischen.

Der vorliegende Aufsatz vertieft folgende altbekannte Frage: „Wie beeinflusst der Feuchtegehalt eines

Bauteils aus einem mineralischen Baustoff tendenziell dessen Schalldämmung?“ Die ebenso bekannte Antwort lautet: „Ein zunehmender Feuchtegehalt führt zu einer Zunahme der Bauteilmasse. Dadurch erhöht sich auch die Schalldämmung des betreffenden Bauteils.“ Und tatsächlich: Systematische Untersuchungen an einschaligen Wänden im Labor bestätigen eine Zunahme der Luftschalldämmung im nassen Baustoffzustand. So erzielt zum Beispiel der für die Wärmedämmung optimierte Baustoff Porenbeton nahezu eine Verdopplung seiner Trockenmasse, wenn der überwiegende Anteil der vorhandenen Luftporen nach freier Sättigung wassergefüllt ist. Bei der Verdopplung der Masse eines einschaligen plattenförmigen Bauteils steigert sich dessen Luftschalldämmung um sechs Dezibel. Berger hat diese bereits von Lord Rayleigh gefundene Masseabhängigkeit vor genau 110 Jahren messtechnisch überprüft und 1911 veröffentlicht. Aktuelle Laborergebnisse zur Luftschalldämmung feuchtebelasteter Bauteile bestätigen das bekannte Bergersche Massegesetz bei einschaligen Wänden aus Porenbeton. Sollte dieses Gesetz auch auf feuchte Wände aus anderen Wandbaustoffen zu übertragen sein? Zum Beispiel auf eine einschalige Trennwand aus Kalksandstein? Da dieser Werkstoff traditionell für statische und schallschutztechnische Aufgaben konzipiert und nicht für die Wärmedämmung optimiert ist, besitzt er deutlich kleinere Porenräume und daher eine höhere Rohdichte. Dies zeigt sich im gegenüber Porenbeton deutlich reduzierten Wasseraufnahmevermögen. Der wasserbedingte Massezuwachs nach freier Wassersättigung beträgt bei Kalksandstein gerade einmal um die 15 Prozent. Nach Berger erfährt eine entsprechend nasse Kalksandsteinwand einen massebedingten Zuwachs der Luftschalldämmung von etwas mehr als einem Dezibel. Entsprechende Laborergebnisse sollten diese geringe Verbesserung der Luftschalldämmung an einer einschaligen Kalksandsteinwand auch bestätigen.

Aber genau das tun sie nicht! Vielmehr steigert sich die Luftschalldämmung bei der untersuchten Kalksandsteinwand nach Abschluss der freien Wassersättigung ebenfalls um bis zu sechs Dezibel je nach Frequenz. Über den geringen Massezuwachs ist die Erhöhung der Schalldämmwerte nicht mehr zu erklären! Offensichtlich übernehmen beim nassen Kalksandstein zusätzliche Mechanismen bei der Beeinflussung der Luftschalldämmung eine tragende Rolle. Es geht somit um die grundlegende Frage, welcher andere Effekt überwiegend dafür verantwortlich ist, dass trotz geringem Massezuwachs durch Wassersättigung kleiner Porenräume Luftschalldämmwerte erreicht werden, die in ihrer Höhe nicht durch das Bergersche Massegesetz erfasst werden.

Im vorliegenden Aufsatz wird ein solcher zusätzlicher Effekt und die Feuchteabhängigkeit der Luftschalldämmung nasser Trennwände in einer Gleichung mathematisch formuliert. Es werden die Effekte und Parameter genannt, die die Luftschalldämmung von nassen einschaligen Wänden im Wesentlichen beeinflussen und in welchem Maße sie diese verändern. Hierzu werden zunächst einige Grundlagen zur Luftschalldämmung einschaliger plattenförmiger Trennbauerteile ebenso gesichtet, wie einige Eckdaten der Porenstruktur der verwendeten Baustoffe. Gerade die Porenstruktur mit ihren verschiedenen Porengrößenanteilen und Porenformen beeinflussen die Einlagerung von Wasser in der Baustoffmatrix wesentlich. Nach den Grundlagen der porösen Medien erfolgt die Betrachtung des zunächst wassergesättigten Baustoffs in zwei Komponenten: in einen Feststoff- und einen Fluid-Anteil. Beide Bestandteile sind durch mechanische Kopplungseffekte eng miteinander verbunden. Der Ausgangspunkt für die Entwicklung einer um die hygrischen Effekte erweiterten Biegewellengleichung liefert einen Ansatz aus der Literatur, der ursprünglich die tieffrequente Schwingungsanregung einer im Erdreich liegenden Bodenplatte beschreibt. Ein dortiges Gleichungssystem, bestehend aus zwei Bewegungsgleichungen, bildet den Schlüssel für die Herleitung einer auch für hygrische Belange geeigneten Biegewellengleichung. Daraus entwickelt sich eine neue Gleichung zur Bestimmung des Luftschalldämmmaßes einschaliger, feuchter Trennbauerteile. Dabei erfährt eine bekannte, typische Formelbeziehung für einschalige Trennbauerteile eine Erweiterung in Form eines neuen hygrischen Einflussterms, in dem sich alle relevanten feuchtetechnischen und mechanischen Einflüsse bündeln. Dabei berücksichtigt die neue „Porenfluidzahl“ sowohl Effekte aus dem Feststoffgerüst, wie auch aus dem Wasser im Porenraum. Mit Hilfe des gewonnenen neuen Rechenansatzes für hygrisch belastete Trennbauerteile werden die theoretisch erzielbaren Luftschalldämm-Maße ermittelt.

Zur Gewinnung von Messwerten werden zuvor akustische und hygrische Messungen und solche zur Ermittlung der Porengrößenverteilung und Porenform durchgeführt. Dabei bilden transportable, knapp zwei Quadratmeter große einschalige Mauerwerksverbände aus mineralischen Baustoffen den Kern der messtechnischen Untersuchungen. Beginnend vom wassergesättigten Baustoffzustand erfolgt eine schrittweise Trocknung der Trennbauerteile, die gravimetrisch ermittelt wird. Bei jeder Feuchtegehaltstufe erfolgt nacheinander die Messung der Luftschalldämmung, der Körperschallnachhallzeit und der Impuls-Laufzeit. Zur Absicherung der gewonnenen Verlustfaktorwerte finden ergänzend Untersuchungen an Baustoffstäben aus der jeweils gleichen Produktions-

charge mittels des Resonanzverfahrens statt. Dabei stehen die Baustoffe Kalksandstein und Porenbeton im Mittelpunkt. Untersuchungen an diesen beiden Materialien mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops, der Computertomografie und dem Heliumpyknometer eröffnen wesentliche Einblicke in die jeweilige Porenstruktur. Alle gewonnenen Messergebnisse bilden die Grundlage für den abschließenden Vergleich mit den ermittelten Rechenergebnissen. Obwohl dauerhaft nasse Wände nach heutigem Wissensstand thermisch und hygrisch nicht erwünscht sind, lohnt sich dennoch die Analyse, um die Mechanismen kennenzulernen und quasi „vom Wasser zu lernen“.

Grundlagen

Im Mittelpunkt aller Überlegungen im Rahmen des vorliegenden Aufsatzes steht eine einschalige gemauerte Trennwand, die zwei Räume voneinander trennt. Im ersten Raum wird Luftschall erzeugt, der ebenfalls auf diese Wand trifft. Dadurch wird die Trennwand zu Biegeschwingungen angeregt. Je nachdem wie gut die Wand die Schallenergie dämmt, zeigen sich die Biegeschwingungen auf der rückseitigen Wandoberfläche im zweiten Raum mehr oder weniger stark ausgeprägt. Die senkrecht auf der Wandoberfläche stehenden Schwingungskomponenten sorgen für eine Anregung des an der Trennwand anliegenden Luftpolsters. Dies führt im zweiten Raum zu mehr oder weniger stark hörbarem Schall aus dem Nachbarraum. Umgangssprachlich wird so „Schall durch die Wand hindurch gelassen“.

Schalldämmkurven

Der typische Verlauf von Schalldämmkurven einschaliger plattenförmiger Bauteile in Abhängigkeit von der Frequenz zeigt sich in der durchgezogenen Linie in Abbildung 1. Dieser lässt sich in drei Frequenzbereiche A, B und C unterteilen [1–2]:

- A: Im unteren Frequenzabschnitt folgt der Kurvenverlauf dem Bergerschen Massegesetz nach Gleichung (1) mit einem Anstieg von 6 dB pro Oktave.
- B: Im Koinzidenzfrequenzbereich erfährt die Schalldämmung einen Einbruch, die in der Koinzidenzgrenzfrequenz sein Minimum findet (rechter Rand des Bereichs B in Abb. 1).
- C: Oberhalb der Koinzidenzfrequenz steigt die Schalldämmkurve nach Gleichung (2) mit 7,5 dB pro Oktave wieder deutlich an. In diesem Frequenzbereich hängen die schalldämmenden Eigenschaften zusätzlich vom Verlustfaktor ab.

Die gestrichelte Linie in den beiden Frequenzbereichen B und C in Abbildung 1 gibt vergleichend den theoretischen Schalldämmkurvenverlauf an, wenn das Bergersche Massegesetz auch hier gelten würde.

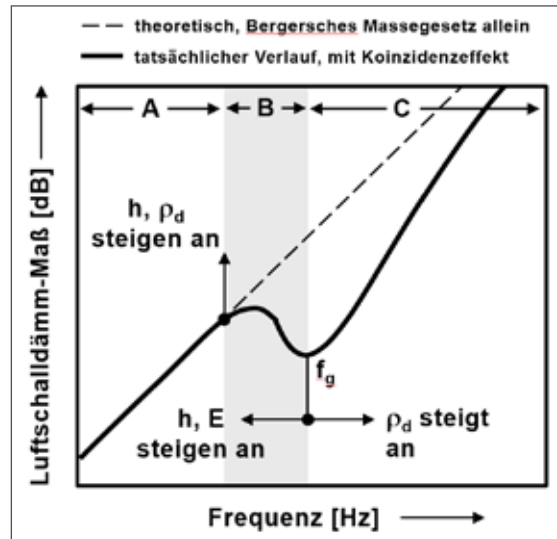


Abb. 1: Prinzipieller Verlauf des Luftschalldämm-Maßes von einschaligen homogenen Trennbauanteilen in Abhängigkeit von der Frequenz. Darstellung in Anlehnung an [1; 2]

A, B, C Frequenzbereiche unterhalb, in der Nähe, oberhalb von f_g

E Elastizitätsmodul [N/m^2]

h Trennbauanteildicke [m]

f_g Koinzidenzgrenzfrequenz [Hz]

ρ_d Rohdichte der trockenen Wand [kg/m^3]

Die Höhe des Schalldämm-Maß-Niveaus wird nach Abbildung 1 maßgebend von den Einflussfaktoren Plattendicke h und Rohdichte ρ und damit der flächenbezogenen Masse des einschaligen Trennbauanteils bestimmt. Bei gleichbleibender Dicke wächst die Koinzidenzgrenzfrequenz bei zunehmender Baustoffrohichte. Ein ansteigendes Elastizitätsmodul wirkt diesem Effekt entgegen.

Luftschalldämmung unterhalb der Grenzfrequenz

Für die Höhe der Luftschalldämmung R im Bereich A (siehe Abb. 1) gilt das bekannte Bergersche Massegesetz [3, 4]:

$$R = 20 \lg \left(\frac{m'' \omega}{2 Z_L} \right) - 3 \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

R = Luft-Schalldämmmaß [dB]

Z_L = Wellenwiderstand der Luft mit $Z_L = \rho_L c_L$ [Ns/m^3]

lg = dekadischer Logarithmus

m'' = flächenbezogene Masse [kg/m^2]

ω = Kreisfrequenz [$1/\text{s}$]

Es besagt, dass der Anstieg der Luftschalldämmung bei einer Verdopplung der Masse 6 dB beträgt. Auch bei einer Verdopplung der das Einfachbauteil anregenden Frequenz, und damit bei jedem Oktavsprung, wird im Bereich unterhalb der Grenzfrequenz eine Erhöhung der Luftschalldämmung um 6 dB erzielt.

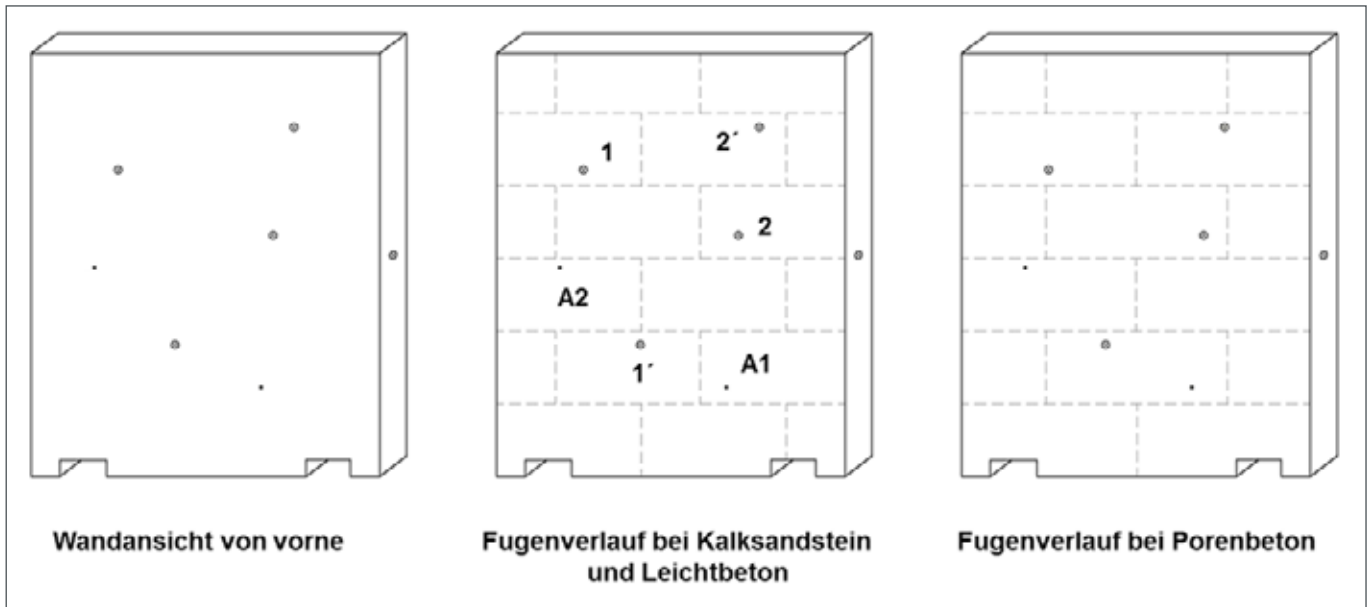


Abb. 2: Transportable Prüfwände mit Transportaussparungen an der Unterseite, maßstabsgetreue Darstellung der 120 cm breiten, 145 cm hohen und 11,5 cm dicken Prüfwände [2].

Luftschalldämmung oberhalb der Grenzfrequenz

Für den Bereich C (siehe Abb. 1) oberhalb der Grenzfrequenz gilt die folgende Beziehung für das Luftschalldämm-Maß R [5–7]

$$R = 10 \lg \left(\frac{m'' \omega}{2 Z_L} \right)^2 + 5 \lg \left(\frac{f}{f_g} \right) + 10 \lg(2\eta) \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

f = Frequenz der das Trennbauteil anregenden

Schallwelle [Hz]

η = Verlustfaktor [-]

Diese häufig kurz auch als „Heckl-Gleichung“ bezeichnete Gleichung (2) besagt, dass der Anstieg der Luftschalldämmung von einschaligen Trennbauteilen bei Frequenzen oberhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz neben der flächenbezogenen Masse, wie in Gleichung (1) und (2) eingeführt, nun auch vom

Verlustfaktor η abhängt. Der Anstieg oberhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz erfolgt dabei mit 7,5 Dezibel pro Oktave steiler als unterhalb davon.

Poroelastische Platten

Poroelastische Platten im Rahmen dieses Aufsatzes sind in Anlehnung an [8] Kirchhoff-Platten aus mineralischen Baustoffen mit einer baustoffspezifischen Porenstruktur. Die betreffenden Porenräume sind im trockenen Baustoffzustand gasgefüllt. Bei zunehmender Baustofffeuchte befindet sich darin Gas und Wasser in den dem Feuchtegehalt entsprechenden Anteilen. Bei gesättigten Baustoffen sind die Porenräume schließlich wassergefüllt. Durch das eingelagerte Wasser erhöht sich die Masse des einschaligen Trennbauteils, wodurch eine Erhöhung der Luftschalldämmung gegenüber dem trockenen Bauteil zu erwarten ist.

Allerdings fällt eine massebedingte Steigerung der Luftschalldämmung, verursacht durch einen erhöhten Feuchtegehalt, geradezu moderat aus. Beispielsweise liegt die erreichbare Erhöhung bei einer wasserbedingten Masseerhöhung um 10 % bis 60 % gemäß den Gleichungen (1) und (2) zwischen 0,4 dB und 2,0 dB. Diese Ergebnisse stehen allerdings im Widerspruch zu den durchgeführten messtechnischen Untersuchungen bei Porenbeton und Kalksandstein-Wänden im trockenen, feuchten und wassergesättigten Zustand.

Messtechnische Untersuchungen

Zur Gewinnung von Messwerten werden akustische und hygrische Messungen und solche zur Ermittlung der Porengrößenverteilung und Porenform durchgeführt. Dabei bilden transportable, knapp zwei

Abb. 3: Wägeeinrichtung und Trockenplatz für die einzelnen Trennwände.



Quadratmeter große und 115 mm dicke einschalige Mauerwerksverbände aus mineralischen Baustoffen den Kern der messtechnischen Untersuchungen. Die plattenförmigen Prüfkörper (siehe Abb. 2) bestehen aus Kalksandstein (Trockenrohdichte 1.890 kg/m^3) und Porenbeton (571 kg/m^3). Vor dem Bau der Wände lagerten die Einzelsteine bis zur freien Sättigung unter Wasser. Die Wände wurden anschließend gemäß den produktspezifischen Verarbeitungsvorgaben mit Dünnbettmörtel aufgebaut. Ein auf der vorderen und rückseitigen Wandoberfläche verspachtelter jeweils 2 mm dünner Gipsputz bildete das Oberflächenfinish der Sichtflächen. Stirnseitig erfolgte ein Versiegelungsanstrich mit einer Dichtschlämme, um ein vorzeitiges Austrocknen der Wände über die Stirnseiten deutlich zu minimieren. Neben dem jeweiligen unter Putz liegenden Fugenverlauf der Kalksandstein- und Porenbetonwand zeigt Abbildung 2 noch die Positionen für die bei der Messung der Körperschallnachhallzeit verwendeten Beschleunigungsaufnehmer mit den Nummern 1, 1', 2 und 2' sowie die Shaker-Positionen A1 und A2. Ebenso finden sich an den jeweiligen seitlichen Wandflächen die Impuls-Anrege-Stellen, bei denen an einer Seite der Impuls mit einem Impulshammer ausgelöst und an der jeweils gegenüber liegenden Wandseite von einem auf gleicher Höhe positionierten Beschleunigungsaufnehmer empfangen wird.

Beginnend vom wassergesättigten Baustoffzustand erfolgt eine schrittweise Trocknung der Trennbauerteile (siehe Abb. 3). Bei jeder Feuchtegehaltstufe erfolgt nacheinander die Messung der Luftschalldämmung, der Körperschallnachhallzeit und der Impuls-Laufzeit. Dabei stehen die Baustoffe Kalksandstein und Porenbeton im Mittelpunkt, deren Verlustfaktoren vergleichend auch an stabförmigen Prüflingen mittels des Resonanzverfahrens bestimmt werden. Zusätzliche Untersuchungen, wie beispielsweise mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops (siehe Abb. 4), eröffnen wesentliche Einblicke in die jeweilige Porenstruktur der beiden Baustoffe.

Porengrößenverteilung

Eine Aussage über das Vorkommen bestimmter Porengrößen liefert Abbildung 5 für die beiden Baustoffe Kalksandstein und Porenbeton als Ergebnis von Quecksilberdruckporosimetrie-Messungen [2].

Abbildung 5 verdeutlicht den hohen Anteil an Nanoporen unterhalb einer Porenradiusgröße von 100 nm bei Kalksandstein. Die niedrigste gemessene Porengröße lag bei 6 nm. Wie Abbildung 6 (siehe folgende Seite) verdeutlicht, liegen bei Kalksandstein 55 % des Porenvolumens im Mikroporen-Bereich bis zu 100 nm. Bei Porenbeton hingegen zählen nur 27 % des Porenvolumens zu den Mikroporen.

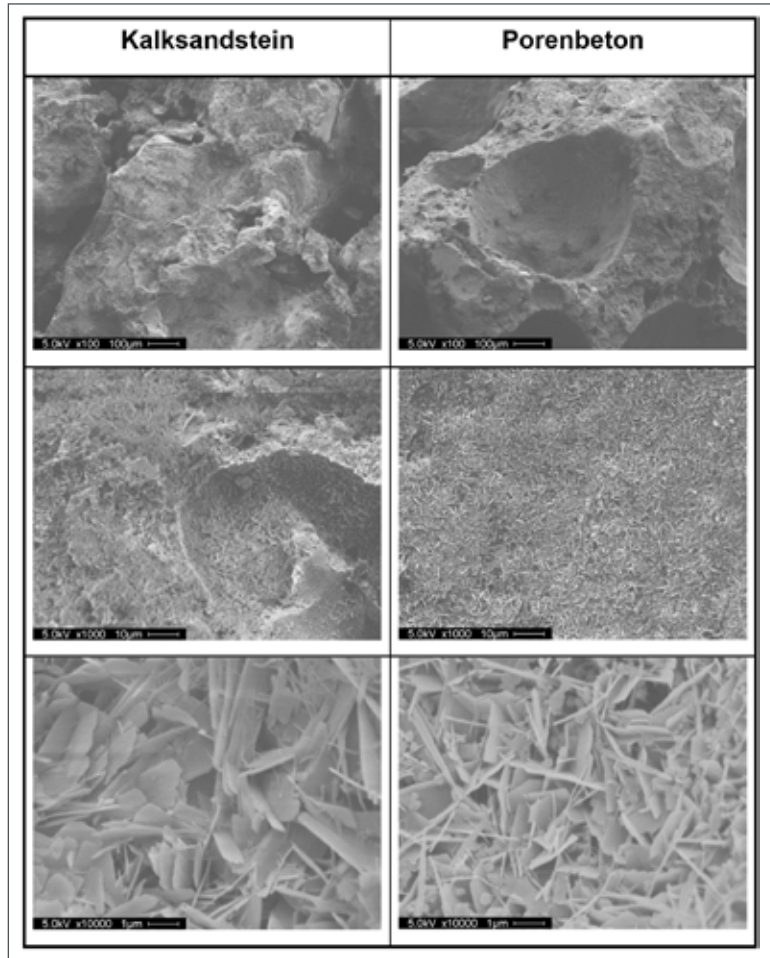
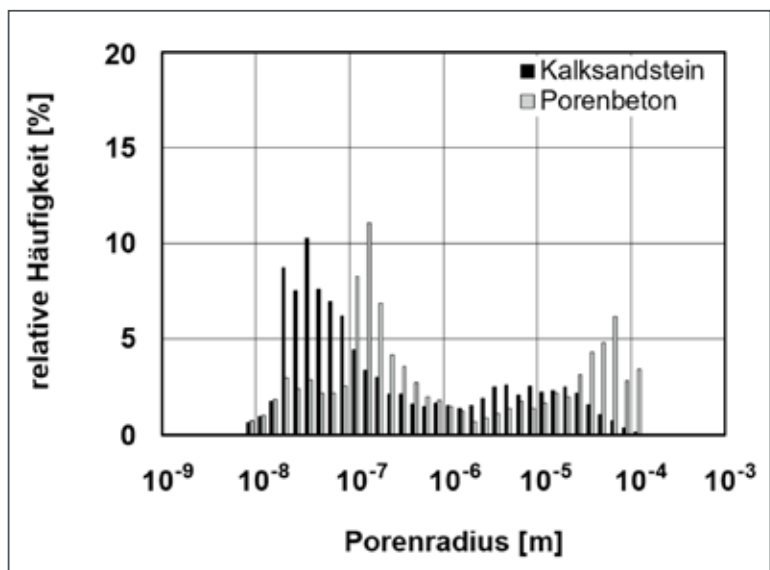


Abb. 4: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen des verwendeten Kalksandsteins und des Porenbetons in 100-facher (oben), 1.000-facher (mittig) und 10.000-facher Vergrößerung (unten) [2].

Abb. 5: Relative Häufigkeit der Porengrößen der untersuchten Kalksandstein- und Porenbeton-Proben [2].



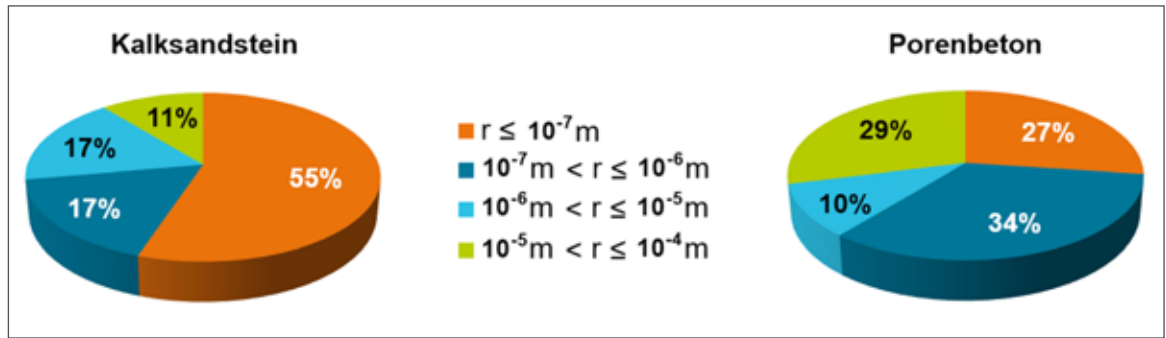


Abb. 6: Vergleichende Darstellung der kumulierten Porenhäufigkeit in vier Größenbereichen von Kalksandstein und Porenbeton; r = Porenradius [m].

Luftschalldämm-Maße

Kalksandstein

Eine Auswahl an Messergebnissen der Luftschalldämmung für die Kalksandsteinwand sind terzweise in Abbildung 7 dargestellt. Dort zeigen sich zwei Kurvenverläufe, die im unteren Frequenzbereich bis zu etwa 500 Hz eng beieinanderliegen und sich im Mittel nur bis zu 2 dB und maximal bis zu 4 dB in den entsprechenden Terzen unterscheiden. Oberhalb dieser Frequenz findet eine deutliche Auffächerung der Kurvenverläufe statt. Dabei staffelt sich die Höhe der Schalldämmwerte nach dem Feuchtegehalt der Wand. Der trockene Wandzustand besitzt die niedrigsten Schalldämmwerte, die nasse Wand erreicht oberhalb von 500 Hz im Mittel 5 dB und in einigen Terzen zwischen 6 dB und 7 dB höhere Luftschalldämm-Maße.

Porenbeton

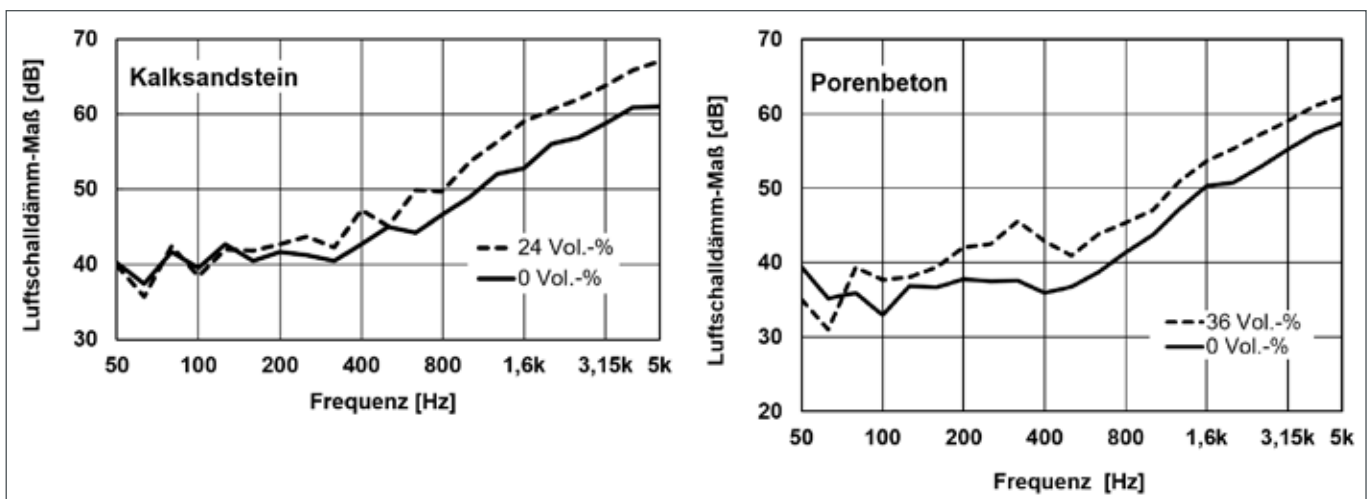
Für die Porenbetonwand zeigen sich die Ergebnisse der Messung der Luftschalldämmung terzweise in Abbildung 8. Die Höhe der Schalldämmwerte hängt auch hier deutlich vom Feuchtegehalt der Wand ab. Der trockene Wandzustand besitzt die niedrigsten

Schalldämmwerte, die gesättigte Wand erreicht oberhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz um die 315 Hz im Mittel 4,2 dB höhere Luftschalldämmmaße. Im Unterschied zu den Kalksandstein-Messergebnissen aus Abbildung 7 erzeugt der anregende Luftschall im Bereich der Koinzidenzgrenzfrequenz um die 315 Hz die höchsten Differenzen zwischen dem trockenen und dem nassen Baustoffzustand.

Bewertung der Messergebnisse

Die Messergebnisse dokumentieren eine deutliche Zunahme des Luftschalldämm-Maßes bei zunehmendem Wassergehalt in den Poren. Insbesondere beim Trennbauteil aus Kalksandstein lässt sich durch die bloße Massezunahme aufgrund der Wassereinlagerung in den Porenräumen der Anstieg der Schalldämmwerte nicht vollständig mit den bisherigen Formeln erklären. Je nach Frequenzbereich, der das Bauteil anregenden Luftschallwelle, beträgt die Erhöhung des Luftschalldämmmaßes bis zu sieben Dezibel. In der in [2] gesichteten Literatur findet sich weder eine Erklärung zu diesem Phänomen, noch eine Rechenmethode zur Vorhersage der Luftschalldämm-Maße solch hygriisch belasteter einschaliger

Abb. 7 (links) und 8 (rechts): Luftschalldämm-Maß der Kalksandsteinwand und der Porenbetonwand für den trockenen und den nassen Zustand in Abhängigkeit von der Frequenz



Wände, insbesondere im Frequenzbereich oberhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz.

Erweiterter Rechenansatz

Ausgangspunkt

Zur Herleitung eines erweiterten Rechenverfahrens zur Berechnung des Luftschalldämm-Maßes wird als Ausgangspunkt der mineralische feuchte Wandbaustoff als poröses Medium nach [9; 10] angesehen.

Durch diesen Modellansatz teilt sich die nasse Wand in zwei Komponenten auf: in einen Feststoff- und einen Fluid-Anteil. Hinter dem Feststoff verbirgt sich das elastische Strukturgerüst des Festkörpers, hinter dem Fluidanteil die hauptsächlich mit Wasser gefüllten Porenräume. Durch die Anhaftung des eingelagerten Porenwassers an den Porenwandungen entsteht eine mechanische Kopplung der beiden Bestandteile (siehe Abb. 9).

Dadurch übertragen sich die bei einer Schallanregung erzeugten Schwingungen des Feststoffgerüsts direkt auf das in den Porenräumen eingelagerte Wasser. Das in Schwingung versetzte Porenwasser wiederum wirkt umgekehrt auf das schwingende Feststoffgerüst ein. Bei diesem Wechselspiel bewirken viskose Reibungseffekte und bei ansteigenden Frequenzen auch zunehmend die Trägheitseffekte der Porenwassermasse eine Dämpfung der Schwingung im Trennbauteil. Dieser hygrysch bedingte zusätzliche Dämpfungseffekt trägt zu einer Erhöhung des Verlustfaktors im Wandbaustoff bei.

Verlustfaktor

Dies bestätigen auch die Messergebnisse in Abbildung 10. Dort werden die Verlustfaktoren aus den Untersuchungen mit dem Resonanzverfahren an Baustoffstäben und denen aus den Körperschall-

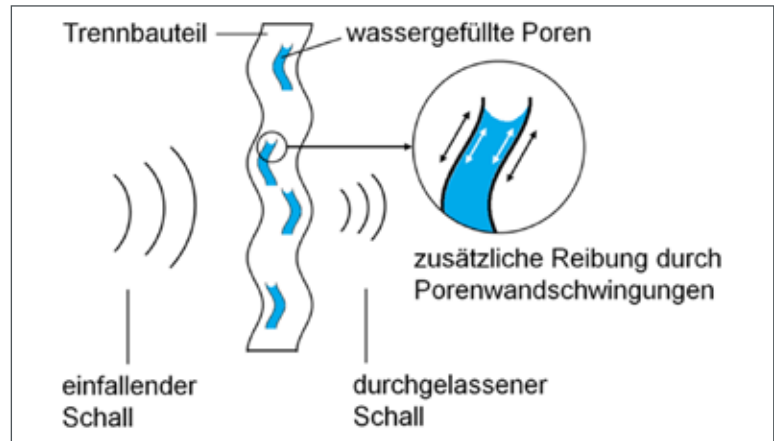
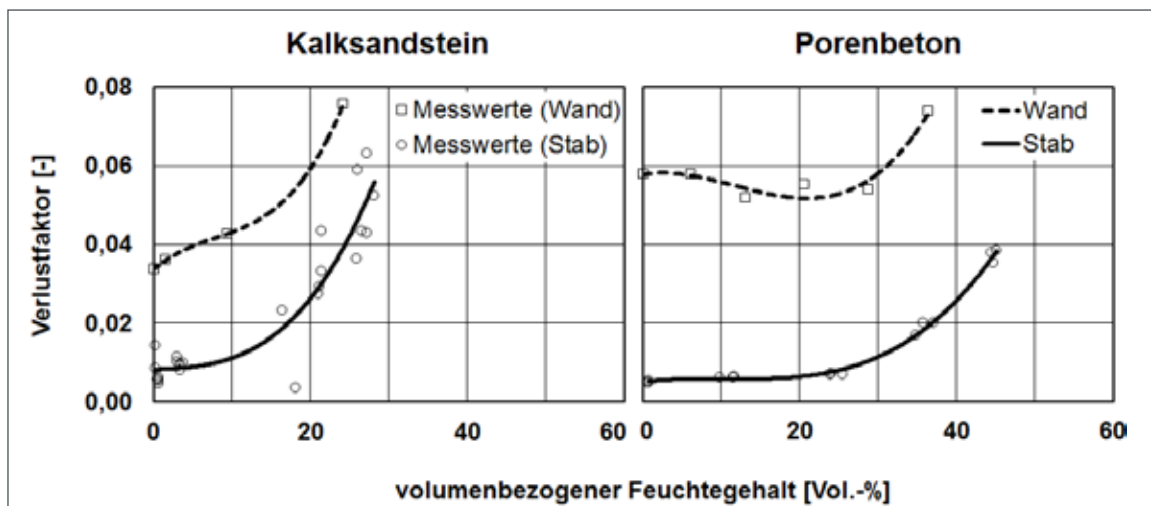


Abb. 9: Schematische Darstellung eines zu Schwingungen angeregten hygrysch belasteten einschaligen Trennbauteils.

nachhallzeit-Messungen an den Trennwänden für Kalksandstein und Porenbeton gegenübergestellt. Generell zeigen die Verläufe der Verlustfaktoren über dem Feuchtegehalt trotz zweier völlig unterschiedlicher Messverfahren und Prüflingen für beide Baustoffe eine deutliche Verwandtschaft auf. Dies zeigt sich besonders im ähnlichen Verlauf der Kurvenanstiege mit zunehmendem Feuchtegehalt in Abbildung 10. Unabhängig vom Messverfahren bestätigt sich, dass mit zunehmend feuchteren Baustoffen der jeweilige Verlustfaktor gleichermaßen ansteigt, wenn auch auf unterschiedlich hohem Werte-Niveau.

Offensichtlich zeigen bei den Prüfwänden zusätzliche Einflusskomponenten wie die endliche Wandgröße mit den kompakten Abmessungen, die Fugenausgestaltung in der Prüföffnung oder auch den im Mauerwerksverbund vorhandenen Inhomogenitäten durch Steinfugen, Grifflöcher sowie den unterschiedlichen Materialien wie dem Dünnbettmörtel und dem Gipsputz eine verlustfaktor erhöhende

Abb. 10: Verlustfaktor in Abhängigkeit des volumenbezogenen Feuchtegehalts. Dargestellt sind die einzelnen Messwerte. Die angegebenen Verlustfaktoren der Wände repräsentieren Mittelwerte aus dem Frequenzbereich zwischen 250 Hz und 5 kHz [2].



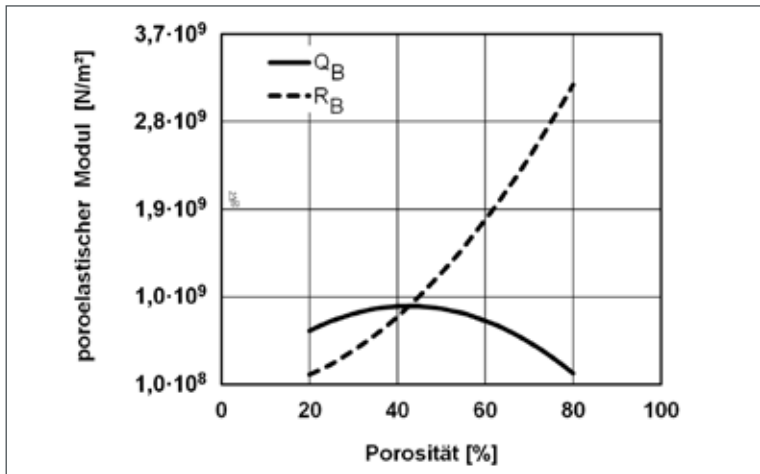


Abb. 11: Poroelastische Module Q_B und R_B in Abhängigkeit von der Porosität, Auswertungen der Gleichungen (5) und (6).

Wirkung. Das unterschiedliche Niveau der absoluten Verlustfaktorwerte zwischen den Messverfahren stellt für die Untersuchungen jedoch keine Beeinträchtigung dar, da es hier in erster Linie um das generelle Anstiegsverhalten vom trockenen hin zum wassergesättigten Baustoff geht.

Feststoff- und Fluidanteil

Die getrennte Betrachtung von Feststoff- und Fluid-

anteil führt mit der Feststoffdichte ρ_s und der Fluid-dichte ρ_f unter Beachtung der zwischen 0 und 1 liegenden Porosität σ zur gesamten Rohdichte ρ des porösen Materials [9]:

$$\rho = (1 - \sigma)\rho_s + \sigma\rho_f \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3)$$

Daraus ergibt sich für die flächenbezogene Masse m_h des nassen Bauteils mit der Dicke h [2]:

$$m_h = ((1 - \sigma)\rho_s + \sigma\rho_f)h \quad [\text{kg/m}^2] \quad (4)$$

Poroelastische Module

Zusätzlich treten in der Theorie nach [9] die beiden poroelastischen Module Q_B und R_B gemäß den Gleichungen (5) und (6) als grundlegende Einflussgrößen auf. Sie dienen zur Quantifizierung der bei einer äußeren Belastung entsprechend auftretenden Druckverhältnisse in den Porenräumen. Wie in [2] gezeigt, gilt für das Feststoff-bezogene Modul Q_B im Rahmen dieser Untersuchung abhängig von der Porosität σ :

$$Q_B = \frac{\sigma(0,08533 - \sigma)}{2,0127 \cdot 10^{-10}} \quad [\text{N/m}^2] \quad (5)$$

Das Fluid-bezogene Modul R_B errechnet sich nach [2] zu:

Schallschutz- und Akustiklösungen weltweit



für Medizin und Gesundheit, Testeinrichtungen für die Industrie, Gebäudeakustik, Studios

deutschland@iac-gmbh.de
www.iac-gmbh.de

$$R_B = \frac{\sigma^2}{2,0127 \cdot 10^{-10}} \quad [\text{N/m}^2] \quad (6)$$

Mit zunehmender Porosität nähert sich beispielsweise das Modul R_B dem Wert für das Elastizitätsmodul von Porenbeton an und unterstreicht damit, dass die poroelastischen Module in der Theorie nach [9] nicht zu vernachlässigen sind (siehe Abb. 11).

Erweiterte Gleichung

Ein in [8] vorhandener Ansatz für die tieffrequente Schwingungsanregung einer im Erdreich liegenden Bodenplatte liefert ein gekoppeltes System zweier Bewegungsgleichungen zur Beschreibung der darin ausgelösten Biegeschwingungen. Dieses Gleichungssystem aus [8] bildet den Ausgangspunkt für die Herleitung einer um die hygrischen Effekte erweiterten BiegeWellengleichung.

Daraus entwickelt sich in [2] schließlich eine erweiterte Gleichung für das Luftschalldämm-Maß einschaliger, poröser und feuchter Trennbauteile oberhalb der Grenzfrequenz. Nach [2] gilt:

$$R = 10 \lg \left(\frac{m^2 \omega}{2Z_L} \right) + 5 \lg \left(\frac{f}{f_g} \right) + 10 \lg(2\eta) + 10 \lg(1 + C_h \lambda_{Bh}^2) \quad [\text{dB}] \quad (7)$$

Der gegenüber Gleichung (2) zusätzliche Term in Gleichung (7) formuliert die feuchtebedingte Erhöhung des Verlustfaktors. Neben der quadrierten BiegeWellenlänge λ_{Bh} des feuchten Bauteils findet sich darin auch die „Porenfluidzahl C_h “ aus Gleichung (8). Sie setzt sich aus Komponenten zusammen, die sowohl das Feststoffgerüst, wie auch das im Porenraum eingelagerte Wasser betreffen. Für C_h gilt in der vereinfachten Form mit nur reellwertigen Termen [2]:

$$C_h = \frac{\nu}{R_B} \left[\frac{1}{\lambda} \left(\frac{Q_B + R_B}{R_B} - 1 \right) \omega^2 Q_B \sigma \rho_f \frac{2\mu}{(2\mu + \lambda)} \right] + \omega^2 \left[\sigma \rho_f - \frac{Q_B \sigma \rho_f (Q_B + R_B)}{(2\mu + \lambda) R_B} - \frac{Q_B \sigma \rho_f}{(2\mu + \lambda)} \right] \quad [1/\text{m}^2] \quad (8)$$

Bei μ und λ handelt es sich um die bekannten Lamé-Konstanten aus der Mechanik, ν ist die Querkontraktionszahl. Insgesamt zählt die Porenfluidzahl ein Dutzend Einflussfaktoren [2]. Dabei entfalten die vier nachfolgenden Basisgrößen ihre größte Wirkung:

- Frequenz
- Porosität
- Fluiddichte
- Viskosität der Porenraumfüllung

Da die Porosität eines Baustoffs aus der jeweiligen Baustoffmatrix hervorgeht, spielt die Porenstruktur eine zusätzliche wesentliche Rolle. Die Porenstruktur bildet so eine weitere einflussreiche Basisgröße

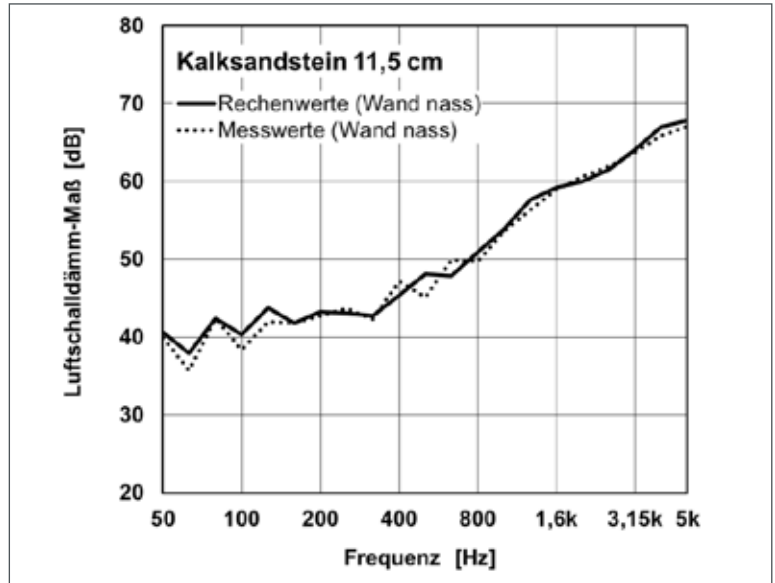


Abb. 12: Rechnerische Vorhersage der Luftschalldämm-Maße der nassen Kalksandsteinwand unter Berücksichtigung der Porenfluidzahl C_h auf Grundlage der Messwerte der trockenen Wand im Vergleich zu den tatsächlichen Messwerten der nassen Wand aus Kalksandstein.

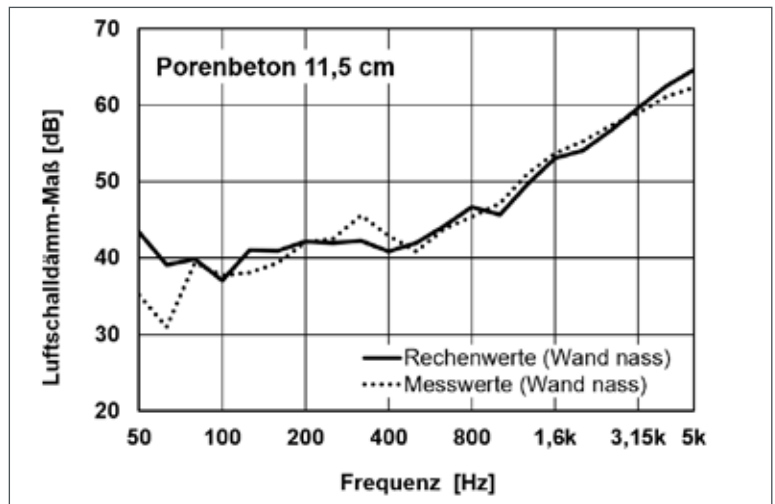


Abb. 13: Rechnerische Vorhersage der Luftschalldämm-Maße der nassen Porenbetonwand unter Berücksichtigung der Porenfluidzahl C_h auf Grundlage der Messwerte der trockenen Wand im Vergleich zu den tatsächlichen Messwerten der nassen Wand aus Porenbeton.

und wird im Folgenden über den Formfaktor berücksichtigt.

Vergleich und Interpretation

Messung und Rechnung

Die berechneten Werte der nassen Wand basieren auf den Messwerten der trockenen Wand. So kann direkt überprüft werden, ob mit der Erweiterung durch den hygrischen Einfluss in Gleichung (7) eine Annäherung an die Messwerte der nassen Wand erzielt werden kann.

Die Vergleiche in Abbildung 12 und Abbildung 13 bestätigen eine hohe Übereinstimmung der berech-

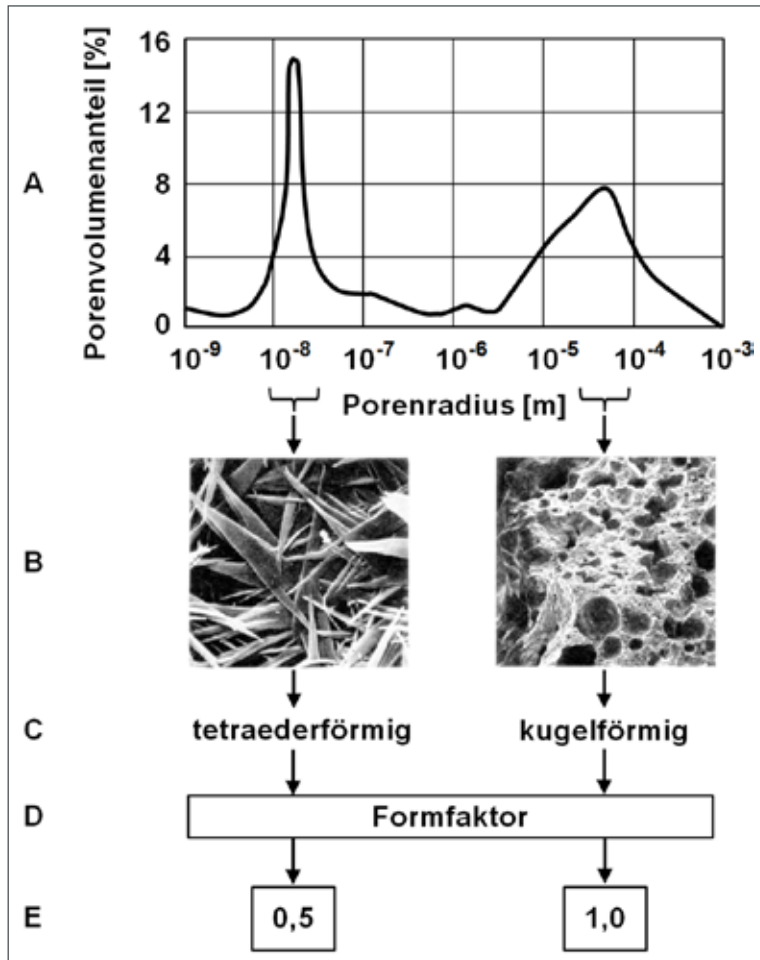


Abb. 14: Schema zur Feststellung des Formfaktors nach [2]:
A: Porengrößenverteilung, B: REM-Aufnahme im jeweiligen Bereich der Häufigkeitsmaxima, C: Feststellung der vorherrschenden Porenform, D: Ermittlung des Formfaktors, E: Formfaktorergebnis

neten Luftschalldämm-Maße mit den tatsächlich gemessenen Ergebnissen der feuchten Bauteile. Die hohe Übereinstimmung ergibt sich, wenn der hygrische Einflussterm in Gleichung (7) zusätzlich mit dem Porenstruktur-Formfaktor gewichtet wird. Dieser Formfaktor wird in [2] ausführlich beschrieben und kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Hierbei wird die überwiegende Formgebung der zumeist kugelförmigen Makroporen und der zumeist tetraederförmigen Mikroporen gemäß Abbildung 14 entsprechend der Theorie nach [9; 10] berücksichtigt. Mit den beiden Informationen über die Porengrößenverteilung beziehungsweise der vorherrschenden Porengeometrie einer Baustoffmatrix lässt sich nach Abbildung 14 ein statistisch zweidimensionales Porenmodell angeben. Hierbei zeigt sich am Beispiel Porenbeton, dass die Poren der beiden häufigsten Größenbereiche unterschiedliche vorherrschende Formen aufweisen. Bei den häufigsten kleinsten Porengrößen bewirken die auftretenden nadelförmigen Tetraeder der Calcium-Silikat-Phasen im Baustoff einen Formfaktor in Höhe von 0,5. Bei den häufigs-

ten Poren im oberen Größenbereich begründet die vorherrschend kugelförmige Porenform einen Porenstrukturfaktor von 1,0. Bei Kalksandstein führt der hohe Anteil an Mikroporen gemäß Abbildung 6 mit häufig engen Kapillaren, die als vornehmlich zylinderförmig anzusehen sind, zu einem zusätzlich niedrigen Porenstrukturfaktor von 0,2, der insbesondere bei anregenden Frequenzen oberhalb von 2 kHz wirkt [2].

Teilgesättigte Baustoffe

Bei der Berechnung der teilgesättigten Baustoffzustände wird das porenraumfüllende Fluid gemäß seines Feuchtegehalts in einen Wasser- und einen Luftanteil zweigeteilt. Unter Berücksichtigung der anteilmäßigen Dichte- und Viskositäts-Werte liefern die rechnerischen Ergebnisse unter Beibehaltung des Porenstrukturfaktors ebenfalls eine hohe Übereinstimmung mit den Messwerten der entsprechenden einschaligen und unterschiedlich teilgesättigten Bauteile. Zudem ergibt die Berechnung unter Annahme vollständig luftgefüllter Porenräume folgerichtig wieder den Schalldämmwerteverlauf des trockenen Baustoffzustands.

Am Beispiel der Porenbetonwand zeigt Abbildung 15 die Ergebnisse der rechnerischen Vorhersage der Luftschalldämm-Maße im Vergleich zu den gemessenen bei unterschiedlichen Feuchtegehalten im Baustoff.

Die entsprechenden Vergleichswerte der Kalksandsteinwand bei unterschiedlich starker Befüllung der Porenräume mit Wasser stimmen ebenfalls sehr gut überein und sind in [2] dargestellt.

Vergleich von klassischer und erweiterter Gleichung

Bei den bisherigen Vergleichen zwischen den Kurvenverläufen ergeben sich die berechneten Luftschalldämm-Maße der Trennbauteile bei den unterschiedlichen Feuchtegehaltstufen durch die Addition des jeweiligen rechnerisch bestimmten hygrischen Einflusses und den gemessenen Ergebnissen der trockenen Bauteile. Wie zuvor dargestellt, führt dies zu einer hohen Übereinstimmung der entsprechenden Kurvenverläufe. Ergänzend hierzu sollen die Ergebnisse der Luftschalldämm-Maße-Ermittlung der beiden einschaligen Trennbauteile aus Kalksandstein und Porenbeton nach Gleichung (7) ohne Berücksichtigung des Verlaufs der Schalldämm-Messwerte der trockenen Trennbauteile erfolgen. Dies führt zu einer generellen Betrachtung der Luftschalldämm-Maße in gleichzeitiger Abhängigkeit von Baustofffeuchtegehalt und der Frequenz, wie sie in Abbildung 16 und Abbildung 17 (siehe übernächste Seite) dargestellt ist. Dabei wird der Bereich oberhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz betrachtet.

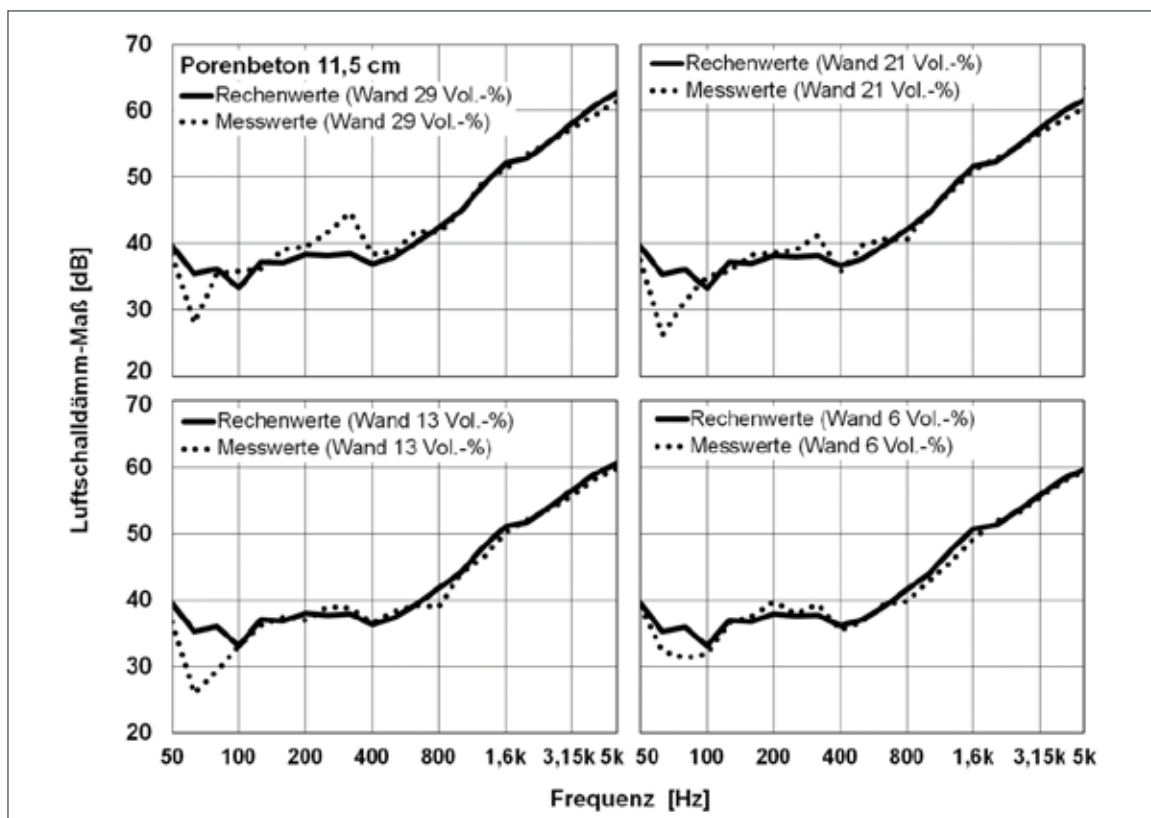


Abb. 15: Luftschalldämm-Maß der Porenbetonwand bei unterschiedlichen Feuchtegehalten in Abhängigkeit von der Frequenz

WIE MACHT MAN EFFIZIENTEN SCHALLSCHUTZ MÖGLICH?

Antworten erhalten Sie auf unserer neuen Webseite.

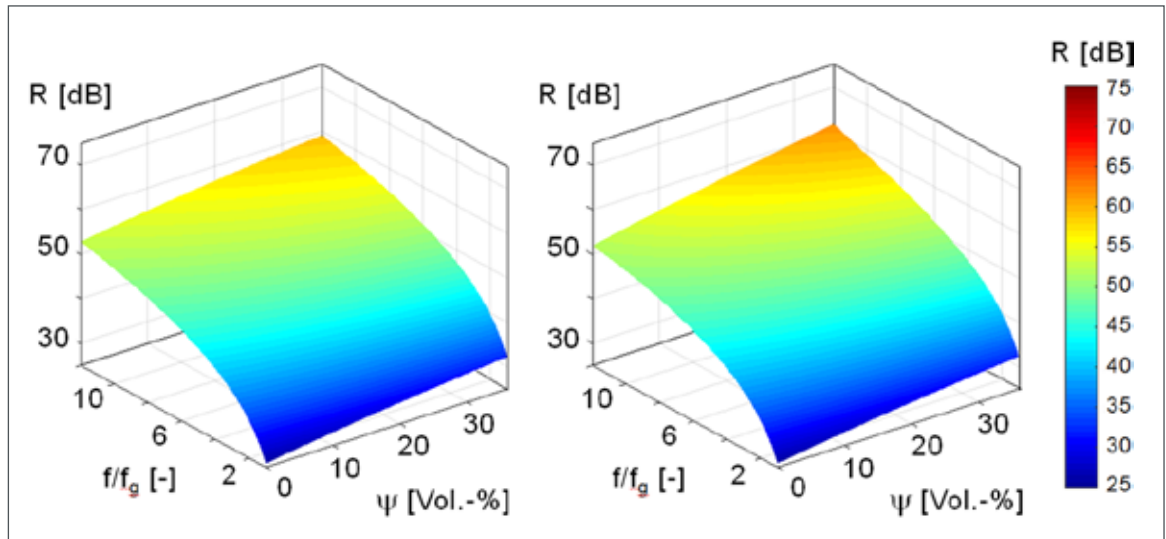


Abb. 16: Luftschalldämmung in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt (ψ) und der Frequenz (f/f_g) für das einschalige Trennbauteil aus Porenbeton; Diagramm links: Auswertung der Gleichung (2), Diagramm rechts: Auswertung der Gleichung (7).

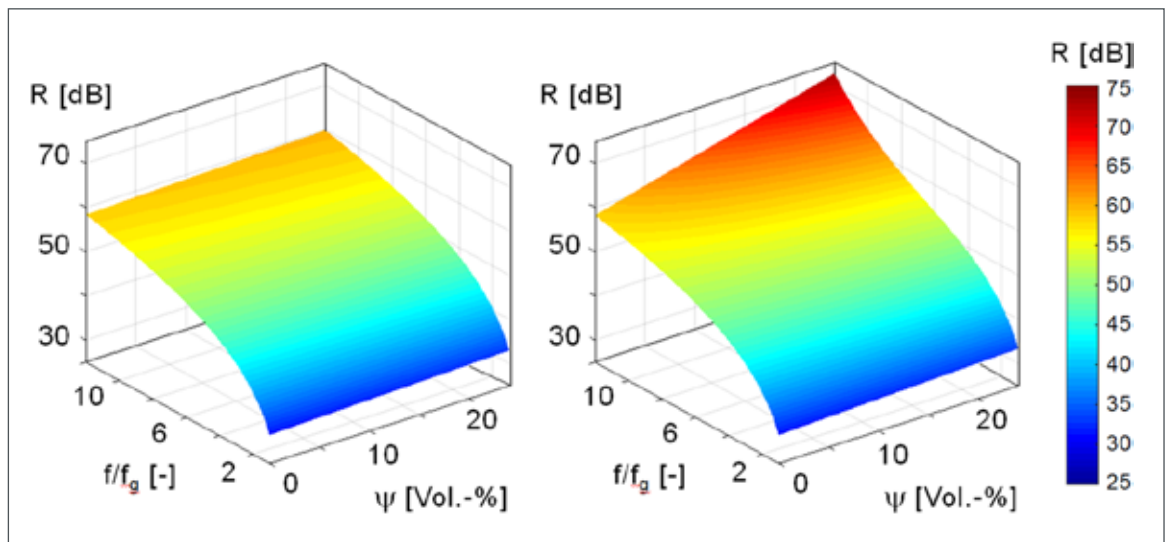


Abb. 17: Luftschalldämmung in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt (ψ) und der Frequenz (f/f_g) für das einschalige Trennbauteil aus Kalksandstein; Diagramm links: Auswertung der Gleichung (2), Diagramm rechts: Auswertung der Gleichung (7).

Abbildung 16 zeigt die Veränderung des Luftschalldämm-Maßes der Porenbetonwand in Abhängigkeit vom Baustoff-Feuchtegehalt zwischen 0 Vol.-% und 36 Vol.-% im linken Diagramm nach Gleichung (2) bereits deutlich auch ohne Berücksichtigung des hygrischen Zusatzterms aus Gleichung (7). Der deutliche Anstieg ergibt sich aus der Massezunahme der in den Makroporen des Porenbetons eingelagerten Wassermasse. Die feuchteabhängigen Maximalwerte für das Luftschalldämm-Maß erreichen beim Frequenzenquotient $f/f_g = 12$ demnach rund 52 dB bis 59 dB. Im rechten Diagramm aus Abbildung 16 ist zusätzlich die Wirkung der Porenfluidzahl mitberücksichtigt. Es ist erkennbar, dass die Luftschalldämm-Maße bei hohen Feuchtegehalten im Baustoff

oberhalb von rund 25 Vol.-% gegenüber dem linken Diagramm nochmalig etwas ansteigen und den Maximalwert so auf rund 62 dB erhöhen. Dieser Wert wird bei 36 Vol.-% erreicht, was dem wassergesättigten Zustand der einschaligen Trennwand aus Porenbeton entspricht.

Kalksandstein

Abbildung 17 liefert abschließend die entsprechenden Diagramme für das einschalige Trennbauteil aus Kalksandstein. Im linken Diagramm zeigt sich wiederum die Änderung des Luftschalldämm-Maßes in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt und der Frequenz nur durch die Massezunahme aufgrund des in den Poren eingeschlossenen Wassers. Dadurch, dass bei

Kalksandstein die Massezunahme nur 13 % beträgt, verläuft der Anstieg der Maximalwerte bei $f/f_g = 12$ kaum merklich von gut 58 dB auf rund 60 dB. Wird jedoch die zusätzliche hygrische Wirkung des in den Poren eingelagerten Wassers über die Porenfluidzahl berücksichtigt, so ergibt sich im rechten Diagramm von Abbildung 17 eine deutliche Zunahme der Luftschalldämmung bei den höheren Feuchtegehalten der Kalksandsteinwand.

Bedingt durch die besondere Porenstruktur des Kalksandsteins, bei der sich über die Hälfte des gesamten Porenraumvolumens aus Mikroporen zusammensetzt, herrschen höhere innere Kräfte, die über die Porenfluidzahl im rechten Diagramm von Abbildung 17 ihre Berücksichtigung finden. Es zeigt somit deutlich, dass die Erhöhung der Luftschalldämmung einschaliger Trennbauteile aus Baustoffen mit hohem Mikroporenanteil nicht über den Massezuwachs erfolgt, sondern schlussendlich über die inneren Kräfte, die in wassergefüllten Kapillaren mit Radien unterhalb von 100 Nanometer wirken.

Schalldämmkurvenverlauf

In Abbildung 18 erweitert sich der prinzipielle Verlauf der Luftschalldämmung bei einschaligen Wänden aus Abbildung 1 um die wesentlichen zusätzlichen Einflüsse bei hygrisch belasteten porösen Baustoffen. Es zeigt sich, dass die Porenstruktur des Baustoffs mit seiner Porosität und der Anteile von Makro- und Mikroporen entscheidend das Luftschalldämm-Maß beeinflussen.

Generell zeigt sich, dass das Bergersche Massegesetz für den Frequenzbereich deutlich unterhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz auch für einschalige hygrisch belastete Trennbauteile seine Gültigkeit behält, wenn bei der Anwendung von Gleichung (1) die flächenbezogene Masse des trockenen Bauteils um den entsprechenden Betrag der eingelagerten Wassermasse erhöht wird.

Fazit

Feuchtigkeit reduziert wirksam die Schalltransmission!

Als wesentliches Ergebnis der Untersuchungen lässt sich herausstellen, dass sich die Erhöhung des Luftschalldämm-Maßes im Frequenzbereich oberhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz durch Wassereinlagerung nicht alleine auf den Mechanismus der Massezunahme, sondern auch auf die Wirkung mechanischer Kräfte durch eingelagertes Wasser in den Porenräumen zurückführen lässt. Je kleiner die Porengrößen, desto größer die mechanischen Wirkkräfte und desto höher der Verlustfaktor. Baustoffe mit einem ähnlichen Mikro-/Nanoporenanteil im Baustoffinnern, wie beim vorliegenden Kalksandstein, dürften sich in Be-

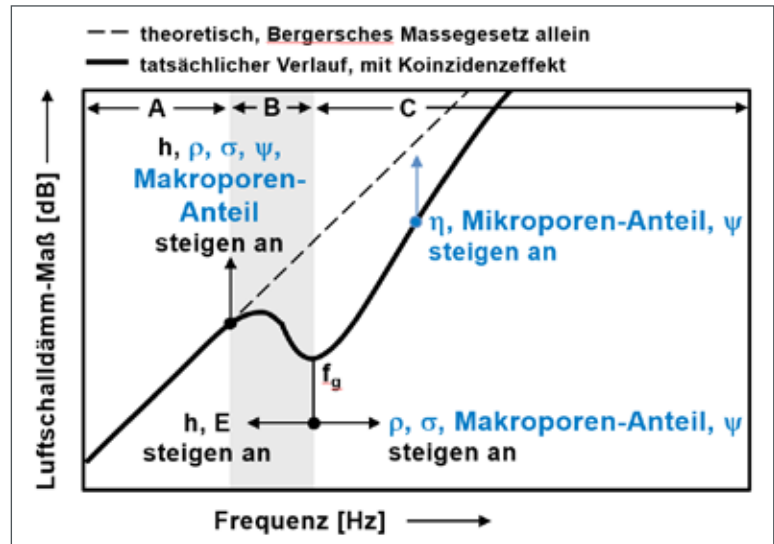


Abb. 18: Prinzipieller Verlauf des Luftschalldämm-Maßes von einschaligen hygrisch belasteten Trennbauteilen in Abhängigkeit von der Frequenz (die hygrisch relevanten Einflüsse sind gegenüber Abbildung 1 in blauer Farbe angegeben); ρ = Rohdichte des nassen Baustoffs [kg/m^3].

zug auf die Veränderung der Luftschalldämmung bei Wassereinlagerung ähnlich verhalten.

Da generell feuchte oder gar nasse Wände aus anderen Gründen bauphysikalisch zumeist weniger erwünscht sind, wären auch Alternativen zu Wasser in den Porenräumen denkbar. Diese Eckpunkte führen zu einer Reihe möglicher Ansätze für zukünftige Untersuchungen und Entwicklungen in den unterschiedlichsten Bauproduktbereichen, wie zum Beispiel bei der Optimierung von Porengeometrien oder der Konzeption neuartiger Trennwandkonstruktionen.

Literatur

- [1] Mehra, S.-R.: Berechnung der Luftschalldämmung von einschaligen Trennbauteilen endlicher Abmessung. Dissertation, Universität Stuttgart, 1995.
- [2] Hermes, M.: Luftschalldämmung hygrisch belasteter einschaliger Trennbauteile. Dissertation, Universität Stuttgart, 2020.
- [3] Berger, R.: Über die Schalldurchlässigkeit. Dissertation, T.H. München, 1911.
- [4] Kuttruff, H.: Akustik. Stuttgart, S. Hirzel Verlag, 2004.
- [5] Cremer, L.; Heckl, M.: Körperschall. Berlin, Springer-Verlag, 1996.
- [6] Heckl, M.: Die Schalldämmung von homogenen Einfachwänden endlicher Fläche. *Acustica* 10, S. 98–108, 1960.
- [7] Möser, M.: Technische Akustik. Berlin, Verlag Springer Vieweg, 2012.
- [8] Theodorakopoulos, D.D.; Beskos, D.E.: Flexural vibrations of poroelastic plates. *Acta Mechanica* 103, S. 191–203, 1994.
- [9] Biot, M.A.: Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Volume 28, Nr. 2, S. 168–178, 1956.
- [10] Biot, M.A.: Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Volume 28, Nr. 2, S. 179–191, 1956. ■



Dr.-Ing. Marcus Hermes

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart



THE **NEW** ONE FOR ALL

Unser Beitrag zur Optimierung von Geräusch-
unterdrückung, Sprach- und Klangqualität.

www.head-acoustics.com   

Ehrungen der DEGA

Preisträgerinnen und Preisträger 2021

Die DEGA verleiht im Rahmen der Jahrestagung DAGA 2021 die folgenden Preise:

- die **Helmholtz-Medaille** an
Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. nat. h.c. mult.
Karlheinz Brandenburg
für sein herausragendes Lebenswerk
zur akustischen Signalverarbeitung,
insbesondere zur Audio-Kompression,
- den **Lothar-Cremer-Preis** an
Dr.-Ing. Anita Schulz
für ihre innovativen und wegwei-
senden Arbeiten in der Strömungs-
akustik, insbesondere bei der
Erforschung von absorbierenden
Wandauskleidungen,

- zwei **DEGA-Studienpreise** an
Dipl.-Ing. Kaspar Müller
für seine Masterarbeit „Variable-
Perspective Rendering of Virtual
Acoustic Environments based on
Distributed First-Order Room Impul-
se Responses“ an der Universität für
Musik und darstellende Kunst Graz,
und an *M.Sc. Vincent Radmann*
für seine Masterarbeit „Auswirkung
von unscharfen Parametern auf die
Rollgeräuschsimulation bei Schie-
nenfahrzeugen“ an der Technischen
Universität Berlin.

Die Preisverleihungen finden im
Anschluss an die Eröffnung der DAGA
2021 am

Montag, den **16. August 2021**
um **9:00 Uhr**

im **Plenarsaal der Messe Wien**
statt.

Ausführliche Informationen zu den
Preisträgerinnen und Preisträgern und
ihren DAGA-Vorträgen werden Sie ab
Juni 2021 im Tagungsprogramm der
DAGA 2021 finden. ■

Menschen

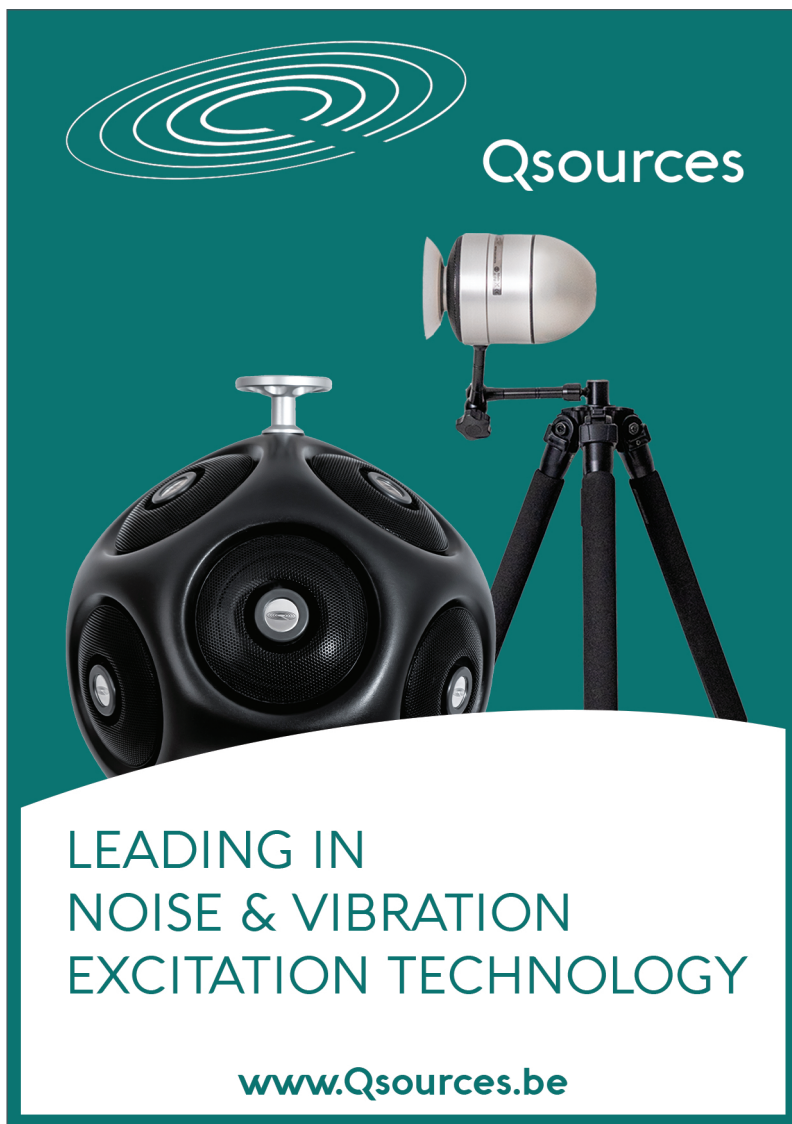
Gratulationen und Personalien

■ Wir gratulieren

zum 70. Geburtstag (März. 2021):
Prof. Dr. Schew-Ram Mehra,
ehem. Leiter des Fachausschusses
Lehre der Akustik, Leitung der Tagung
DAGA 2007 ■

■ Verstorben

Prof. Dr. Ludwig Schreiber,
Gründungsmitglied und (seit 2019)
Ehrenmitglied der DEGA ■



Qsources

LEADING IN
NOISE & VIBRATION
EXCITATION TECHNOLOGY

www.Qsources.be

Veranstaltungen

■ Veranstaltungshinweise

15.–18.08.2021

DAGA 2021

47. Jahrestagung für Akustik



Herzliche Einladung in die sommerliche Musikhauptstadt Wien im August 2021

Liebe Kolleginnen und Kollegen,
wir laden Sie herzlich ein, sich für die DAGA 2021 zu registrieren – vor Ort im schönen Wien oder auch virtuell.

Die DAGA findet ungewohnt sommerlich vom 15.–18. August 2021 statt. Wir planen die DAGA als Hybrid-Veranstaltung, mit fester Absicht, uns persönlich zu treffen, vor Ort und auch virtuell zu diskutieren und zu netzwerken.

Wir freuen uns auf Ihre rege Beteiligung!

Mit herzlichen Grüßen,
Holger Waubke und Peter Balazs, Tagungsleiter
und das gesamte DAGA Team

Anmeldung zur Tagung

Die DAGA ist als Hybrid-Veranstaltung geplant. Teilnehmende können bei der Anmeldung und auch später über ihren Registrierungs-Account entscheiden, ob sie eine Vor-Ort- oder Online-Teilnahme favorisieren:

<https://www.daga2021.eu/registrierung>

Veranstaltungsort in Wien



Reed Messe Wien GmbH
Messeplatz 1
1021 Wien

<https://www.messecongress.at>

Der vor-Ort-Teil der hybriden DAGA findet in der Reed Messe Wien statt, die uns großzügige moderne Räumlichkeiten bietet und ein umfangreiches Hygienekonzept ermöglicht. Das Congress Center liegt zentral sowie unweit des berühmten Wiener Praters und dessen grüner Umgebung.

Aktuelle Reiseinformationen haben wir hier zusammengestellt:
<https://www.daga2021.eu/tagungsort/reiseinformationen>

Online-Teilnahme

Für die Online-Teilnehmer*innen wird ein Konferenzportal bereitgestellt, in dem sie sich übersichtlich und flexibel durch die Tagung, deren Sitzungen, den Online-Teil der Poster- und Firmenausstellung und weitere Inhalte navigieren können. Zum Netzwerken wird ein virtueller Pausenraum bereitgestellt, der die Möglichkeit für fachbereichsbezogene Stammtische bietet. Über die integrierten Zoom-Veranstaltungen können Online-Teilnehmer*innen einfach per Klick an den Sitzungen aktiv teilnehmen, sich mit weiteren Teilnehmenden zu Gesprächen und Chats zusammenfinden und vieles mehr.

Termine und Deadlines

- bis 30. Juni: Bewerbung für Student Grants
- bis 1. Juli: Einreichung eines Late Posters
- bis 8. August: Einreichung für den Posterpreis
- **NEU!** Bis 11. August: Einreichung der Posterdatei für alle Poster-Autor*innen
- **NEU!** Bis 11. August: Vortragsvideo-Einreichung für Online-Vortragende
- **NEU!** Bis 11. August: Präsentations-Einreichung für vor-Ort-Vortragende
- bis 15. September: Manuskript-Einreichung

Hinweise für Autorinnen und Autoren

Die hybride DAGA eröffnet uns allen zusätzliche Möglichkeiten. Beispielsweise können Vorträge mit Einverständnis der Autor*innen auch nach dem Live-Vortrag verfügbar bleiben. Sie erfordert daneben auch besondere Abläufe. Daher bitten wir alle Autor*innen, unseren Hinweisen zur Vorbereitung ausgiebige Beachtung zu schenken: <https://www.daga2021.eu/autoren>

Plenarvorträge

- Karlheinz Brandenburg: Von mp3 zu PARty: Wie digitale Signalverarbeitung, Psychoakustik und maschinelles Lernen zusammenfinden
- Maria Hoeschele: Tierstimmen und die Biologie der Musik
- Sabine Langer: Akustikgerechtes Design statt Lärmbekämpfung – Zukunft der Akustikforschung?
- Anita Schulz: Herausforderungen und Fortschritte bei der Beschreibung überströmter Schallabsorber – von Lothar Cremer bis heute

Strukturierte Sitzungen zur DAGA 2021

Neben den allgemeinen Sitzungen zu verschiedensten Themen der Akustik werden zur DAGA 2021 speziell organisierte Sitzungen angeboten. In diesem Jahr konnten wir – besonders zahlreich – 38 strukturierte Sitzungen gewinnen:

<https://www.daga2021.eu/vortraege-und-poster>

Vorkolloquien

Die Vorkolloquien finden am Sonntag, 15.08.2021 nachmittag kostenfrei statt:

- Zeit-Frequenz-Methoden in der Akustik (Peter Balazs)
- Strömungsakustik (Manfred Kaltenbacher)
- Spatial hearing: from binaural processing to cognition and applications (Piotr Majdak)

Abendveranstaltungen

(Sofern im Rahmen der Pandemie durchführbar)

- Begrüßungsempfang im Wiener Rathaus
- Geselliger Abend in der WU-Mensa:

<https://www.daga2021.eu/programm/rahmenprogramm>

Fachexkursionen

(Sofern im Rahmen der Pandemie durchführbar)

Wir planen Fachexkursionen zu diesen Wiener Orten:

<https://www.daga2021.eu/programm/fachexkursionen>

Ausstellung und Sponsoring

Aussteller und Sponsoren können Ihre Produkte und Dienstleistungen auf der DAGA sowie in den zahlreichen DAGA Medien präsentieren – sowohl vor Ort zur Tagung, als auch mit einem virtuellen Stand für alle Online-Teilnehmer*innen.

Unsere Vorschläge für Werbung und Sponsoring sowie die

letzten freien Ausstellungsflächen finden Sie unter

<https://www.daga2021.eu/ausstellung>

Programm für Begleitpersonen sowie für einen erweiterten Wien-Aufenthalt

Empfehlungen für Ihre Begleitung und Familie finden Sie

unter <https://www.daga2021.eu/programm/begleitpersonen>

Kontakt und Information

Teresa Lehmann und Julia Schneiderheinze

E-Mail: tagungen@dega-akustik.de

Webseite: <https://www.daga2021.eu>

Tel: 030 / 340 60 38 03 oder -04 oder 0176 / 56 84 55 64 ■

MACHEN SIE SCHALL SICHTBAR

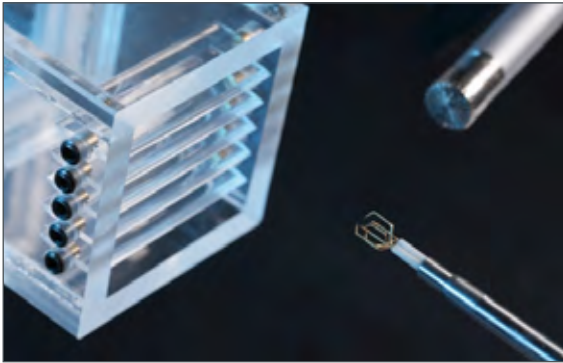


ERKENNEN SIE DIE URSACHEN AKUSTISCHER PROBLEME – SCHNELL UND EFFEKTIV.

Mit Sound Scannern von Seven Bel können Sie Schallquellen effektiv orten und visuell darstellen. Die akustischen Bilder helfen bei der Problemfindung und sparen wertvolle Zeit, die Sie in die Entwicklung zielgerichteter Lösungen investieren können.

www.sevenbel.com

 **sevenbel**
EFFECTIVE SOUND IMAGING

28.09.–29.09.2021**DEGA-Akademie****Kurs „Strömungsakustik 1 – Grundlagen, Auslegungen und Anwendungen“**

Nach mehreren erfolgreichen Akademie-Kursen bietet die diesjährige DEGA-Akademie zur Strömungsakustik ein neues überarbeitetes Konzept, das aus 2 Kursen besteht:

- Strömungsakustik 1 – Grundlagen, Auslegungen und industrielle Anwendungen
- Strömungsakustik 2 – Theorie, numerische Berechnungsverfahren und Anwendungen

Der Kurs 1 findet am 28. und 29. September 2021 in Erlangen und online (hybrid) statt.

Er lehrt die Strömungsakustik von den Grundlagen zu den Anwendungen in kompakter und praxisnaher Form. Er richtet sich an alle Interessierten, die sich mit diesem Themenkomplex intensiv auseinandersetzen bzw. beschäftigen wollen.

Leitung und Referenten:

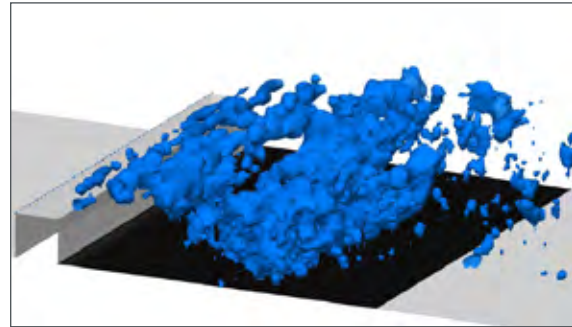
- Prof. Dr.-Ing. Stefan Becker, Universität Erlangen (Leitung)
- Prof. Dr.-techn. Manfred Kaltenbacher, TU Graz (Leitung)
- Prof. Dr.-Ing. Ennes Sarradj, TU Berlin
- Dr.-Ing. Alexander Lodermeier, Universität Erlangen
- Dr.-techn. Stefan Schoder, TU Graz

Veranstaltungsort:

Universität Erlangen-Nürnberg,
Cauerstr. 4,
Kurssaal II,
91058 Erlangen

Programm, Leistungen, Gebühren und Anmeldung:

siehe <https://www.dega-akustik.de> ■

30.09.–01.10.2021**DEGA-Akademie****Kurs „Strömungsakustik 2 – Theorie, numerische Verfahren und Anwendungen“**

Wie links beschrieben, bietet die diesjährige DEGA-Akademie zur Strömungsakustik ein neues überarbeitetes Konzept, das aus 2 Kursen besteht:

- Strömungsakustik 1 – Grundlagen, Auslegungen und industrielle Anwendungen
- Strömungsakustik 2 – Theorie, numerische Berechnungsverfahren und Anwendungen

Der Kurs 2 findet am 30.09. und 01.10.2021 in Erlangen und online (hybrid) statt.

Er ergänzt den Kursteil 1 und ist eine Erweiterung und Vertiefung der bisherigen Akademie-Kurse zur Strömungsakustik. Er lehrt die Theorie der Strömungsakustik und gibt einen intensiven Einblick in die CAA-Berechnungsverfahren. Es wird der momentane Entwicklungsstand in der Behandlung strömungsakustischer Fragestellungen aufgezeigt.

Der Kurs richtet sich speziell an alle Interessierten, die schon auf dem Gebiet der Strömungsakustik arbeiten, Erfahrungen auf diesem Gebiet haben und sich mit diesem Themenkomplex auseinandersetzen wollen.

Leitung und Referenten:

- Prof. Dr.-Ing. Stefan Becker, Universität Erlangen (Leitung)
- Prof. Dr.-techn. Manfred Kaltenbacher, TU Graz (Leitung)
- Prof. Dr.-Ing. Jan Delfs, DLR, Braunschweig
- Prof. Dr.-Ing. Lars Enghardt, DLR, Berlin
- Prof. Dr. rer. nat. Claus-Dieter Munz, Universität Stuttgart
- Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schröder, RWTH Aachen
- Dr.-Ing. Roland Ewert, DLR, Braunschweig
- Dr.-techn. Stefan Schoder, TU Graz
- M. Sc. Felix Czwiolong (Universität Erlangen)
- M. Sc. Andreas Renz (Universität Erlangen)

Veranstaltungsort:

Universität Erlangen-Nürnberg,
Cauerstr. 4,
Kurssaal II,
91058 Erlangen

Programm, Leistungen, Gebühren und Anmeldung:

siehe <https://www.dega-akustik.de> ■

08.10.2021

DEGA-Akademie

Kurs „Raumakustik kompakt“

Der Kurs „Raumakustik kompakt“ findet zum zweiten Mal am 8. Oktober 2021 in Braunschweig statt.

Im Fokus steht die Raumakustik von den Grundlagen zu den Anwendungen in kompakter und zugleich sehr praxisnaher Form. Er richtet sich an Beratungsbüros, Behörden und Baufirmen (insbesondere aus Architektur, Bauingenieurwesen etc.) und an alle weiteren Interessierten, die sich mit dem Themenkomplex der Raumakustik intensiver beschäftigen wollen.

Leitung und Referent:

- Prof. Dr.-Ing. Alfred Schmitz, TU Braunschweig / TAC-Technische Akustik, Grevenbroich (Leitung)

Veranstaltungsort:

Haus der Wissenschaft Braunschweig,
Pockelsstraße 11,
38106 Braunschweig
<http://www.hausderwissenschaft.org>

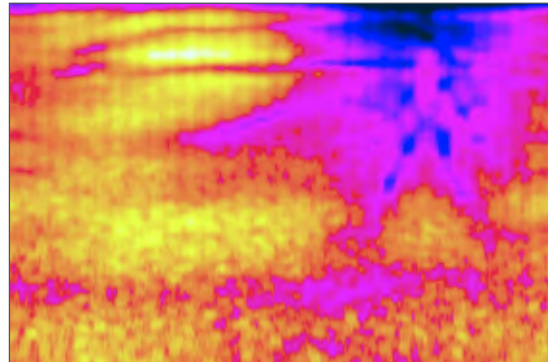
Programm, Leistungen, Gebühren und Anmeldung:

siehe beiliegendes Faltblatt und <https://www.dega-akustik.de/akademie-raumakustik-kompakt>

Auf dieser Webseite finden Sie auch die Ingenieurkammern, die den Kurs als Fortbildungsveranstaltung anerkennen. ■

11.10.–13.10.2021

DEGA-Akademie

Kurs „Psychoakustik – Grundlagen und Anwendungen“

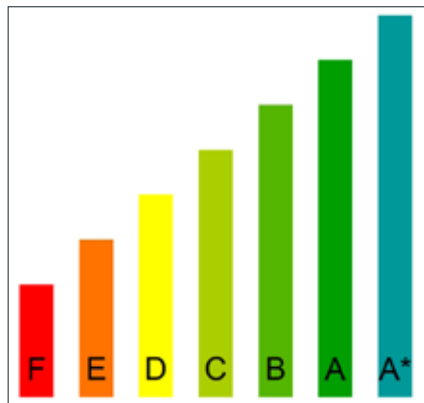
Der Kurs „Psychoakustik – Grundlagen und Anwendungen“ findet zum dritten Mal vom 11. bis 13. Oktober 2021 online statt. Er richtet sich an alle, die Kenntnisse im Bereich der Wahrnehmung und Beurteilung von Geräuschen erlangen oder vertiefen möchten. Dabei sollen durch die Vermittlung der Grundlagen der Psychoakustik und deren Anwendung in Bereichen wie Produktgeräuschoptimierung, Umweltgeräuschbewertung und Soundscape, Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus Wissenschaft, Verwaltung und Industrie gleichermaßen adressiert werden.

Leitung und Referent*innen:

- Prof. Dr. Brigitte Schulte-Fortkamp, HEAD-Genuit-Stiftung, Potsdam/Herzogenrath
- Prof. Dr. Klaus Genuit, HEAD acoustics GmbH, Herzogenrath
- Prof. Dr. André Fiebig, TU Berlin, Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik

Programm, Leistungen, Gebühren und Anmeldung:

siehe <https://www.dega-akustik.de> ■

12.11.2021**DEGA-Akademie****Kurs „DEGA-Schallschutzausweis“**

Der Kurs „DEGA-Schallschutzausweis“ findet das nächste Mal am 12. November 2021 als Online-Kurs statt.

Er richtet sich an alle Interessierten, die ihre Fachkenntnis zur Anwendung bzw. Ausstellung von DEGA-Schallschutzausweisen (<https://www.dega-schallschutzausweis.de>) erweitern wollen und sich über Details zur überarbeiteten DEGA-Empfehlung 103 informieren möchten.

Leitung und Referent:

- Dipl.-Ing. Christian Burkhardt, Akustikbüro Schwarzenberger und Burkhardt, Pöcking

Programm, Leistungen, Gebühren und Anmeldung:

siehe beiliegendes Faltblatt und <https://www.dega-akustik.de/akademie-schallschutzausweis>

Auf der genannten Webseite finden Sie auch diejenigen Ingenieurkammern, die den Kurs als Fortbildungsveranstaltung anerkennen. ■

12.11.–13.11.2021**14. DEGA-Symposium****Interaktive Simulation und Auralisation von Räumen**

Das 14. DEGA-Symposium findet vom 12.–13. November 2021 in Berlin statt.

Raumakustische Simulationen und Auralisationen haben heute zahlreiche Einsatzbereiche über die klassischen Anwendung in der raumakustischen und elektroakustischen Planung hinaus. Dazu gehört etwa die digitale Rekonstruktion historischer Szenarien, die Musik- und Medienpsychologie, Game Audio sowie Virtual und Augmented Reality Anwendungen jeder Art.

Das Symposium gibt einen Überblick über den Stand der Technik bei Simulationsalgorithmen und bei der Kopfhörer- und Lautsprecher-basierten Wiedergabe akustischer Szenen. Es zeigt neue Anwendungen in der Hörforschung und im generativen akustischen Design und diskutiert den Einsatz von Simulationsprogrammen mit Experten aus der raumakustischen Planung.

Akustische Demonstrationen finden im neu eingerichteten Mixed Reality Labor von TU und UdK Berlin statt.

Verantwortlich für das Programm ist der Fachausschuss Virtuelle Akustik der DEGA.

Veranstaltungsort:

TU Berlin

Programm und Anmeldung:

siehe beiliegendes Faltblatt und <https://www.dega-akustik.de> ■

■ Vorschau

21.–24.03.2022

DAGA 2022

48. Jahrestagung für Akustik



Herzliche Einladung

Wir freuen uns sehr, Sie zur 48. Jahrestagung für Akustik DAGA 2022 in Stuttgart begrüßen zu dürfen.

Die Landeshauptstadt von Baden-Württemberg hat ein besonderes Profil. Automobilstadt, Medienstadt, Kulturstadt, Sportstadt – das sind nur einige der zahlreichen Facetten. Auch die Akustik gehört zu Stuttgart: Nach 1972, 1985 und 2007 ist 2022 bereits die vierte DAGA im Ländle.

Als Ausrichter können die Universität Stuttgart und das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP aber nicht nur auf Erfahrungen zurückgreifen, sondern auch auf die tatkräftige Unterstützung der Hochschule für Technik, der Hochschule der Medien sowie von namhaften Unternehmen und Institutionen zählen. Gemeinsam gestalten wir für Sie eine erlebnis- und erkenntnisreiche DAGA 2022 Veranstaltung.

Im Namen aller Beteiligten darf ich Sie sehr herzlich in Stuttgart willkommen heißen.

Ihr Tagungsleiter
Philip Leistner

Veranstaltungsort



Universität Stuttgart
Campus Stuttgart-Vaihingen
<https://www.uni-stuttgart.de>

Anmeldung und Gebühren

Ab Herbst 2021 unter <https://www.daga2022.de/registrierung>

Beitragsanmeldung

Vorträge und Poster können ab September bis zum 1. November 2021 über diese Seite eingereicht werden:

<https://www.daga2022.de/autoren>

Zentrale Termine

- Ab September 2021: Anmeldung zur Teilnahme und Einreichung von Poster- und Vortragsanmeldungen
- bis 1. November 2021: Anmeldung von Vorträgen
- bis 31. Januar 2022: Anmeldung zu den günstigen „frühen“ Teilnahmegebühren
- Februar 2022: Veröffentlichung des Tagungsprogramms
- 21.–24. März 2022: Tagung DAGA 2022
- 21. März 2022: Vorkolloquien zur DAGA, DEGA-Mitgliederversammlung
- Frühjahr 2022: Alle Teilnehmer erhalten per E-Mail den Online-Zugang zum Tagungsband

Rahmenprogramm und Exkursionen



Das Team der DAGA 2022 plant ein abwechslungsreiches Rahmenprogramm mit mindestens einer Abendveranstaltung. Dazu zählen unter anderem Exkursionen zum Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren, zum Fraunhofer-Institut für Bauphysik und zur Hochschule für Technik Stuttgart, Campus Vaihingen, sowie Aktionen von der Hochschule der Medien (Audiovisuelle Begleiteffekte), akustische Stadtpaziergänge und Führungen zum Projekt „Stuttgart 21“.

Ausstellung und Sponsoring



Die wissenschaftliche Tagung wird in langjähriger Tradition von einer Firmenausstellung begleitet, die Unternehmen die Möglichkeit bietet, ihre Produkte und Dienstleistungen vorzustellen. Wir möchten Sie außerdem herzlich einladen, die DAGA durch Werbung, durch Sponsoring oder durch eine Spende zu unterstützen. Gern können Sie Ihre eigenen Vorschläge und Ideen einbringen. Nähere Information folgen ab Herbst 2021 an dieser Stelle: <https://www.daga2022.de/ausstellung>

Kontakt und Information

Teresa Lehmann und Julia Schneiderheinze
E-Mail: tagungen@dega-akustik.de
Webseite: <https://www.daga2022.de>
Tel: 030 / 340 60 38 03 oder -04 oder 0176 / 56 84 55 64 ■

■ Veranstaltungsrückblick

28.04.2021

Immer noch zu laut!?

24. Tag gegen Lärm 2021



Unter dem Motto „Immer noch zu laut!?“ fand am 28. April 2021 der 24. Tag gegen Lärm – International Noise Awareness Day statt.

Aufgrund der Corona-Pandemie und den damit verbundenen notwendigen Einschränkungen wurden die Veranstaltungen zum Tag gegen Lärm vornehmlich digital durchgeführt. Viele haben sich mit digitalen Aktionen am Tag gegen Lärm beteiligt, auf der neu gestalteten Website wurden mehr als 30 bundesweite Aktionen angekündigt.

Die zentrale Veranstaltung der DEGA zum Tag gegen Lärm unter dem Motto „Immer noch zu laut!?“ stellte die Verdichtung von Innenstädten, den akustischen Beitrag der zunehmenden Elektromobilität im Verkehr sowie die Geräuschemissionen von im Freien eingesetzten elektrischen Geräten und Maschinen, z.B. in Gärten oder auf Baustellen, in den Mittelpunkt. Mehr als 150 Teilnehmer*innen verfolgten die digitale Veranstaltung unter der Leitung von Brigitte Schulte-Fortkamp und André Fiebig mit insgesamt vier Fachvorträgen:

- Christian Popp, Vorsitzender des Beirats der LÄRMKONTOR GmbH, Hamburg:
„Je dichter desto lauter! – oder: Retten E-Antriebe das akustische Stadtklima?“
- Klaus Genuit, HEAD acoustics GmbH, Herzogenrath:
„Sound Quality Labels für Elektrofahrzeuge – Neue Ansätze, Psychoakustik in die Beurteilung der Belästigungswirkung einzubeziehen“
- Regina Heinecke-Schmitt, Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft, Dresden:
„Baulärm – Stand und Minderungspotentiale“
- Thomas Haag, Andreas Stihl AG & Co. KG, Waiblingen:
„Entwicklung von leisen Produkten für den urbanen Bereich“

Es folgte eine spannende Diskussion, an der sich alle Teilnehmer*innen, auch betroffene Bürger*innen über den Chat beteiligten. Lärm bleibt eine Belastung, die sich in der

Pandemie häufig bezogen auf nicht erwartete Schallbelastungen bezieht, wie nachbarschaftliche Baumaßnahmen. Der „Tag gegen Lärm“ wird weiter gebraucht, um die langfristige und nachhaltige Stärkung und Vertiefung des lärmbezogenen Umweltbewusstseins zu fördern.

Übrigens: die freigegebenen Vorträge können kostenfrei in der Geschäftsstelle der DEGA erworben werden.

Zum Tag gegen Lärm 2021 und im International Year of Sound 2020-2021 hat die DEGA eine Infoserie für Kinder gestartet. „Noisella“ vermittelt Kindern: Was sind eigentlich Geräusche? Wie entstehen Sie? Was passiert dabei? Die Videos sind auf YouTube zu sehen. Weitere Informationen erhalten Sie unter <https://www.tag-gegen-laerm.de/publikationen/noisella-lehrt-akustik>.

Der Tag gegen Lärm war in verschiedenen Medien vertreten. Es wurden sowohl in überregionalen als auch in regionalen Zeitungen (z.B. Tagesspiegel, Münchner Wochenanzeiger, Badische Zeitung) Beiträge zum Tag gegen Lärm veröffentlicht. Darüber hinaus wurden auch Fernseh- und Radiobeiträge zum Aktionstag mit Interviewpartner*innen der DEGA gesendet (u.a. im ARD-Morgenmagazin, auf INFOradio RBB, auf WDR5 „Quarks“ und auf Bayern 2). Auch in den sozialen Medien (u.a. Twitter und Facebook) wurde der Tag gegen Lärm thematisiert. Klicken Sie doch den Twitter-Kanal des Tag gegen Lärm mal an: <https://twitter.com/taggegenlaerm>.

Auch in der pandemischen Situation war es ein erfolgreicher Tag gegen Lärm 2021. Dank an alle Akteur*innen! Ein besonderer Dank geht an die Förderer und Sponsoren und natürlich wieder an den Gesundheitsladen München.

Das Datum des 25. „Tag gegen Lärm – International Noise Awareness Day“ steht bereits fest. Er wird am 27. April 2022 stattfinden. ■

Brigitte Schulte-Fortkamp,
André Fiebig,
Evelin Baumer

■ Kalender

- **01.–05.08.2021 als Online-Kongress:**
Inter-Noise 2021,
siehe <https://internoise2021.org/>
- **15.–18.08.2021 in Wien (A) und online (hybrid):**
Jahrestagung DAGA 2021,
siehe Seite 48f und
<https://www.daga2021.eu>
- **28.–29.09.2021 in Erlangen und online (hybrid):**
DEGA-Akademie-Kurs „Strömungsakustik 1 – Grundlagen, Auslegungen und Anwendungen“,
siehe Seite 50 und <https://www.dega-akustik.de/aktuelles>
- **30.09.–01.10.2021 in Erlangen und online (hybrid):**
DEGA-Akademie-Kurs „Strömungsakustik 2 – Theorie, numerische Verfahren und Anwendungen“,
siehe Seite 50 und <https://www.dega-akustik.de/aktuelles>
- **08.10.2021 in Braunschweig:**
DEGA-Akademie-Kurs „Raumakustik kompakt“,
siehe Seite 51 und <https://www.dega-akustik.de/aktuelles>
- **11.–13.10.2021 online:**
DEGA-Akademie-Kurs „Psychoakustik – Grundlagen und Anwendungen“, siehe Seite 51 und
<https://www.dega-akustik.de/aktuelles>
- **21.–22.10.2021 in Bad Honnef (vsl.):**
Herbstworkshop „Physikalische Akustik“,
siehe Seite 59
- **25.–27.10.2021 als Online-Kongress:**
Euronoise 2021,
siehe <https://www.spacustica.pt/euronoise2021/index.html>
- **12.11.2021 als Online-Kurs:**
DEGA-Akademie-Kurs „DEGA-Schallschutzausweis“,
siehe Seite 52 und <https://www.dega-akustik.de/aktuelles>
- **12.–13.11.2021 in Berlin:**
14. DEGA-Symposium „Interaktive Simulation und Auralisation von Räumen“,
siehe Seite 52 und <https://www.dega-akustik.de/aktuelles>
- **29.11.–01.12.2021 in Drübeck:**
Workshop „Kavitation“ des FA Ultraschall
siehe Seite 61
- **21.–24.03.2022 in Stuttgart:**
Jahrestagung DAGA 2022,
siehe Seite 53 und
<https://www.daga2022.de>
- **27.04.2022 bundesweit:**
25. Tag gegen Lärm,
siehe <https://www.tag-gegen-laerm.de>

Weitere Termine (international) finden Sie im Newsletter „EAA Nuntius“:
<https://euracoustics.org/news/ea-newsletter> ■







FROM SCIENCE TO ENGINEERING.

MESSTECHNIK

Flexibilität, Leistung und Präzision: Unsere skalierbaren Messsysteme kombinieren hochwertige Hardware mit einer modernen, anwenderfreundlichen Analysesoftware – für Prüfstände, EoL und Entwicklung.

CAE-TOOLS

Komplexe Zusammenhänge effizient berechnen: Mit unseren 1D- und 3D-Simulationslösungen beantworten Sie Fragestellungen zu Schall, seiner Anregung und vielem mehr schneller und einfacher.

DIENSTLEISTUNG

Unsere Experten unterstützen Ihr Projekt in allen Punkten rund um Akustik und Anregungsmechanismen durch gezielte Messungen, multiphysikalische Simulationen und individuelle Prüfstände.

Jetzt mehr erfahren auf novicos.de

DEGA

Nachrichten und Mitteilungen aus der Fachgesellschaft

■ Einladung DEGA-Mitgliederversammlung

In diesem Jahr findet die jährliche Mitgliederversammlung der Deutschen Gesellschaft für Akustik wieder im Rahmen ihrer Jahrestagung, der DAGA 2021, statt.

Aufgrund der Corona-Pandemie ist bei Redaktionsschluss noch nicht abzusehen, ob die Sitzung vor Ort stattfinden kann. Daher wird die Versammlung nach heutigem Stand als hybride Sitzung geplant (anhand des Gesetzes zur Abmilderung der Folgen der Covid-19-Pandemie im Zivil-, Insolvenz- und Strafverfahrensrecht, Artikel 2, §5).

Alle Mitglieder sind somit herzlich eingeladen, an dieser Versammlung nach

heutigem Stand

am Sonntag, den **15. August 2021**

um **18:00 Uhr** wahlweise ...

im **Saal Strauß 2+3**

der Reed Messe Wien GmbH,

Messeplatz 1, A-1020 Wien

oder über das Internet

per Web-Konferenz

teilzunehmen.

Über die endgültige Veranstaltungsform sowie die genauen Online-Zugangsdaten werden wir Sie Mitte Juli gemäß §23(1) der Satzung per E-Mail informieren, und Sie können diese Angaben der Webseite <https://www.dega-akustik.de/dega-mitgliederversammlung> entnehmen.

Vorläufige Tagesordnung:

1. Begrüßung
2. Genehmigung der Tagesordnung
3. Bericht des Vorstands und der Geschäftsstelle
4. Finanzbericht
5. Bericht der Rechnungsprüfer
6. Entlastung des Vorstands
7. Wahl der Rechnungsprüfer
8. Berichte aus den Fachausschüssen und Fachgruppen
9. Verschiedenes
10. Termin der nächsten Mitgliederversammlung

Wir würden uns freuen, viele DEGA-Mitglieder auf dieser Versammlung in Wien oder im Internet zu treffen! ■

*Jesko Verhey,
Präsident der DEGA*



Acoustic Floor Mat (AFM)

Getzner-Trittschallschutz-Serie bekommt Verstärkung

AFM 29 und AFM 35

Neue Trittschalldämmung für erhöhte Anforderungen

- Hochbelastbar
- Geringe Aufbauhöhe
- Effektive Trittschalldämmung



Mehr Informationen finden Sie unter:

www.getzner.com/afm

Ihr Ansprechpartner

Andreas Wieler
T +49 7142 91753 27
M +49 160 697 39 10

andreas.wieler@getzner.com

getzner
engineering a quiet future

■ Zuschüsse für Studierende und Promovierende zur DAGA 2021

Die DEGA vergibt auch in diesem Jahr wieder Zuschüsse zum Besuch der Tagung DAGA 2021 in Wien, um jungen Akustikerinnen und Akustikern die Teilnahme zu erleichtern.

DEGA Student Grants:

Es können sich Studierende bewerben (Bachelor, Master, Diplom, Magister o. ä., Nachweis bitte beifügen, keine Ph.D.) und ebenso Absolventen, bei denen die Abschlussurkunde nicht älter als ein Jahr ist; d.h. nach dem 15.06.2020 ausgestellt wurde (Nachweis bitte beifügen). Die Grants umfassen die freie Tagungsteilnahme, eine Erstattung von Hotelkosten (max. 200 €) und einen Reisekostenzuschuss von 100 € (bei einer Teilnahme vor Ort) sowie eine einjährige DEGA-Mitgliedschaft. Studierende, die zur DAGA 2021 einen Vortrag oder ein Poster eingereicht haben, können sich bis zum 30. Juni 2021 mit einem formlosen Antrag an die DEGA-Geschäftsstelle um die Grants bewerben (vorzugsweise per E-Mail an dega@dega-akustik.de). Ein

kurzer Lebenslauf, ein Befürwortungsschreiben eines/einer Hochschullehrenden und die Kurzfassung (Abstract) des o.g. Vortrags bzw. Posters sind dem Antrag beizufügen. Außerdem muss das Manuskript (Final Paper) dem Antrag hinzugefügt werden; dieses sollte dem späteren Beitrag für den DAGA-Tagungsband weitgehend entsprechen (DIN A4, max. 4 Seiten, zweispaltig, Schrift 10pt).

DEGA Young Scientist Grants:

Auch Promovierende können Zuschüs-

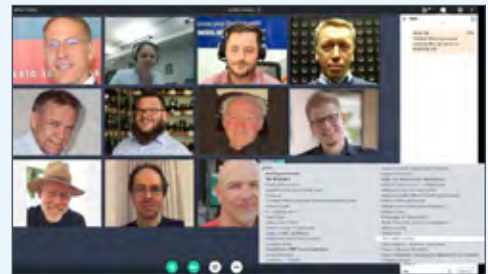
se für die DAGA 2021 beantragen (bei einer Teilnahme vor Ort), wenn diese einen Vortrag oder ein Poster präsentieren. Ein Merkblatt mit sämtlichen Details und Anforderungen finden Sie hierzu auf der Seite <https://www.dega-akustik.de/preise-grants/ys-grants/>.

Für die DAGA 2021 liegt der maximale Förderbeitrag pro Antrag bei 300 € (Erstattung von Hotelkosten von max. 200 € und ein Reisekostenzuschuss von 100 €); der Einsendeschluss für Anträge ist der 30.06.2021. ■

■ Fachausschüsse und Fachgruppen der DEGA stellen sich vor (Teil 5)

Fachausschuss Elektroakustik

Die Elektroakustik umfasst die Wissensbereiche des Aufnehmens, des Verarbeitens / Auswertens und des Erzeugens von Schall. Wie der Name verrät, wird immer auf die Umwandlung von Schall- in elektrische Signale bzw. umgekehrt zurückgegriffen. Dementsprechend spielt die Betrachtung von Sensortechnologien (Mikrofon, Tonabnehmer) und Aktortechnologie (Lautsprecher) eine zentrale Rolle. Hierzu ist Wissen aus verschiedenen physikalischen Domänen zu kombinieren. Beim Lautsprecher muss z. B. das elektrische Signal in eine mechanische Schwingung umgewandelt werden, die dann wiederum im umgebenden Medium Schall erzeugt. Zur Wandlung in eine mechanische Schwingung gibt es unterschiedliche Wandlerprinzipien, z. B. elektrodynamisch, elektrostatisch, elektromagnetisch, piezoelektrisch. Der Lautsprecher im Hausgebrauch arbeitet typischerweise nach dem elektrodynamischen Prinzip. Dementsprechend verlangt sein Entwurf Wissen über die Erzeugung und Interaktion von Magnetfeldern als auch über die Schwingungslehre von Festkörpern. Damit eine schwingende Lautsprechermembran effizient Schall erzeugt, braucht es weiterhin Kenntnisse über Schallerzeugungsprinzipien und Phänomene der Schallausbreitung. Häufig geht es um die Schallerzeugung in Luft, aber auch Applikation im Bereich Wasserschall (Unterwassermusik) bzw. Körperschall (Körperschall-Tonabnehmer für Violine) treten auf. Da bei der Schallausbreitung die Umgebung des Lautsprechers einen entscheidenden Einfluss hat, ist auch das Wissen über raumakustische Aspekte wichtig. Bedingt durch die oft gewünschte Veränderung des elektrischen Signals, etwa zur Klangbeeinflussung, gehören auch die Bereiche Signal-/Systemtheorie und Audio-Elektronik zu den Aufgabengebieten der Elektroakustik. Ein wesentliches Bewertungskriterium für elektroakustische Technologien stellt das menschliche Hörempfinden dar. Deshalb spielt in der Elektroakustik die Psychoakustik ebenfalls eine wichtige Rolle. Nicht immer können alle technischen Phänomene im Entwicklungsprozess anhand von Versuchsaufbauten und Messungen betrachtet werden. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn sehr komplexe multiphysikalische Zusammenhänge oder aber auch Vorgänge in sehr kleine Strukturen, z. B. MEMS-Lautsprecher mit Detailabmessungen im Mikrometerbereich, vorliegen. Daher verlangt die Elektroakustik in unterschiedlichen Applikationen den geübten Umgang mit Simulationswerkzeugen. Ausgehend vom breiten Wissens- und Anwendungsspektrum der Elektroakustik setzt sich auch der Fachausschuss aus Experten unterschiedlicher Disziplinen zusammen, z. B. Entwickler für Mikrofone, Kopfhörer, Hörgeräte, Lautsprecher, Verstärker- / Filtertechnologien, Audio-Algorithmen, Messsysteme aber auch Raumakustiker, Toningenieur, Fachplaner für AV-Technik und Musikern. Entsprechend bunt gemischt ist die Gastgeberschaft des jährlich stattfindenden Herbsttreffens des Fachausschusses. Die diskutierten Themen fließen zum einen über Fachausschussmitglieder in die Normungsarbeit der deutschen und internationalen Standardisierung ein. Ebenso werden Herausforderungen / Schwachstellen aus dem Alltagsgeschäft an den Fachausschuss herangetragen und fallspezifisch bearbeitet. Neue Erkenntnisse bzw. Empfehlungen für die Elektroakustik werden neben den technischen Normen- und Regelwerken insbesondere über die Fachbeiträge auf der DAGA als auch im Akustik-Journal veröffentlicht. Der Fachausschuss beteiligt sich darüber hinaus auch an Nominierungen / Preisverleihungen, wie bspw. dem neuen DEGA-Preis für Kommunikationsräume.



Online-Herbsttreffen 2020 zum Thema „Simulationswerkzeuge in der Elektroakustik“ mit Gastgeber Comsol GmbH

Daniel Beer

■ Fachausschüsse / Fachgruppen

Fachgruppe „junge DEGA“



Vorsitzender:

Vincent Radmann, Technische Universität Berlin
viradmann@aol.com

Voller Vorfreude ist die Junge DEGA in die Vorbereitungen zur DAGA 2021 in Wien gestartet. Zusammen mit jungen Akustiker:innen des Instituts für Schallforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften wird seit Ende 2020 intensiv an Ideen gefeilt, wie das Programm für Studierende, Promovierende und Berufsanfänger:innen auf der DAGA 2021 stattfinden kann.

Durch den internationalen Charakter der Tagung sind einige Neuerungen und Highlights geplant. Entsprechend den lokalen Gepflogenheiten wird aus dem Kneipenabend ein Beislabend, und da die DAGA im Sommer stattfindet, wollen wir zur Abkühlung den Icebreaker wörtlich nehmen. Weitere neu geplante Veranstaltungen sind „Research in Short(s)“, die Open Round Tables und eine Podiumsdiskussion mit hochkarätigen Gästen. Auch das junge-DEGA-Mentoring findet wieder statt und startet auf der DAGA mit einem Kick-Off in die nächste Runde. Und selbstverständlich lädt die junge DEGA auch wieder zur jährlichen Fachgruppensitzung ein.

Aufgrund der aktuell ungewissen Situation wird so viel wie möglich als Hybridveranstaltungen geplant. Weitere Details zu den Veranstaltungen sind wie immer im Programmheft zur DAGA zu finden. Änderungen bezüglich der Corona-Lage werden zu gegebener Zeit bekanntgegeben. Weitere Infos zur jungen DEGA auf www.dega-akustik.de/jd.

Wir freuen uns auf anregende Gespräche auf der DAGA! ■

Vincent Radmann

Arbeitsring Lärm der DEGA (ALD)



Vorsitzender:

Dipl.-Ing. Michael Jäcker-Cüppers, Berlin
m.jaecker-cueppers@ald-laerm.de

DAGA 2021 – Strukturierte Sitzungen mit Beteiligung des ALD

Der ALD organisiert die folgenden Strukturierten Sitzungen auf der DAGA 2021 in Wien vom 15. bis 18.08.2021:

- „Innovativer städtebaulicher Lärmschutz in Wien“ mit 2 Einführungsvorträgen und nachfolgender Exkursion (Gesamtdauer ca. 4 Stunden; Sitzungsleitung: Jochen Richard, Stellvertretung: M. Jäcker-Cüppers
- „Schienenverkehrslärm – Erfolge und Perspektiven“; Sitzungsleitung: Uwe Ritterstaedt, Stellvertretung: M. Jäcker-Cüppers
- Gemeinsame Strukturierte Sitzung des ALD, des FA Lärm und des FA Fahrzeugakustik „Kfz-Lärm – neue Probleme und Lösungen“; Sitzungsleitung: FA Lärm: Andre Fiebig, FA Fahrzeugakustik: E. Altinsoy, ALD: M. Jäcker-Cüppers

BMU und UBA fördern das ALD- und TGL-Projekt „Urbanität, Lärm, Gesundheit – für eine gute Lebensqualität mit hohem Schutzniveau“

Im Rahmen der Verbändeförderung des BMU erteilte das UBA Ende März 2021 der DEGA für das gemeinsame Vorhaben des ALD und der DEGA-Aktion „Tag gegen Lärm (TGL)“ mit dem Titel „Urbanität, Lärm, Gesundheit – für eine gute Lebensqualität mit hohem Schutzniveau“ eine Bewilligung. Der Förderungszeitraum geht vom 01.04.2021 bis 31.03.2023. Mit dem Vorhaben wollen ALD und TGL den Schutz gegen Lärm in Deutschland und Europa verbessern. Da-

bei werden aktuelle Probleme und innovative Lösungsansätze aufgegriffen und bewertet. Die langfristigen Perspektiven einer verbesserten Lebens- und Umweltqualität in Städten und Gemeinden durch weniger Lärm werden thematisiert. Wichtige Arbeitsbereiche sind die Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit sowie die Beratung lärm betroffener Bürger und die Einflussnahme auf die Lärmschutzpolitik. In der Öffentlichkeitsarbeit kommt dem TGL eine besondere Bedeutung zu. Mit dem neuen Lärmschutzpreis für innovative städtebauliche Lösungen, der am TGL 2021 zum ersten Mal vergeben wurde (siehe S. 7), will der ALD der öffentlichen Diskussion zum Schutz gegen Lärm ebenfalls mehr Gewicht geben.

„Schienenverkehrslärm“ – Online-Veranstaltung des ALD und der Umweltministerien von Rheinland-Pfalz und Hessen am 30.03.2021

Der ALD hatte eine gemeinsame Präsenz-Veranstaltung zum Schienenverkehrslärm im Mittelrheintal zusammen mit dem Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten von Rheinland-Pfalz (MUEEF) und dem Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) geplant. Wegen der Corona-Pandemie wurde die Veranstaltung am 30.03.2021 im Online-Format durchgeführt. Anlass der Veranstaltung war vor allem eine Zwischenbilanz über die Minderung des Schienenverkehrslärms zu ziehen, die erreicht wurde durch

- das im Schienenlärmschutzgesetz von 2017 ausgesprochene Verbot des Verkehrs lauter Güterwagen auf dem deutschen Streckennetz ab dem 13.12.2020 und
- das inzwischen abgeschlossene Umrüstprogramm der Bundesregierung, das wesentlich zur Umsetzung des sogenannten „Halbierungsziels“ beitrug. Auf der Tagung wurden die Programme und Instrumente des Bundes im Detail dargestellt und diese aus der Sicht der Länder, der Betroffenen und der Wissenschaft bewertet. An der Veranstaltung

nahmen insgesamt 176 Personen teil. Sie umfasste 5 Präsentationen und eine abschließende Diskussion:

- Dr. Jens Klocksinn, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin: „Lärmschutz an der Schiene“
- Dr. Henning Brammer, Eisenbahn-Bundesamt EBA, Bonn: „Lärm-Monitoring des Eisenbahn-Bundesamtes“
- Steffen Roth, HMKLV und Sven-Oliver Wessolowski, MUEEF: „Instrumente zum Schutz vor Schienenverkehrslärm im Hot Spot Mittelrheintal – Wirksamkeit und Möglichkeiten der Optimierung“
- Willi Pusch, Vorsitzender der Bürgerinitiative im Mittelrheintal gegen Umweltschäden durch die Bahn e.V.: „Quo Vadis Deutsche Bahn?“
- Prof. Dr. Markus Hecht, TU Berlin: „Bahnlärminderung an der Quelle – technisch und administrativ“

Die Vorträge können, soweit sie freigegeben sind, bei der DEGA-Geschäftsstelle angefordert werden. ■

*Christian Beckert
Michael Jäcker-Cüppers
Dirk Schreckenberger*

Fachausschuss Bau- und Raumakustik



Vorsitzender:

Dr. Christian Nocke, Akustikbüro Oldenburg
info@akustikbuero-ol.de

Die traditionelle DAGA-Woche im Frühjahr konnte in diesem Jahr pandemiebedingt nur für eine online durchgeführte Sitzung des Fachausschusses am 18.3.2021 genutzt werden. Während der dreistündigen Sitzung waren mehr als 100 Teilnehmende in der Sitzung angemeldet. Mit der notwendigen Disziplin kam es zu Diskussionen und einem doch regen Austausch. Neben diversen Be-

richten (VPA-Kommission, Normung) wurde ausführlich der Entwurf zum Memorandum ASR A3.7 Raumakustik vorgestellt und diskutiert.

- Zur diesjährigen DAGA in Wien ist am Dienstag, den **17.08.2021**, von **12:30 bis 14:00 Uhr** im **Saal Strauss 2+3** (bzw. online) eine Sitzung des Fachausschusses vorgesehen. Nach aktuellem Planungsstand wird die Zusammenkunft als Hybrid-Sitzung geplant. Folgende Tagesordnung ist aktuell vorgesehen:
1. Beschluss der Tagesordnung
 2. Verabschiedung des Protokolls der 57. Sitzung
 3. Berichte zu
 - Aktivitäten VMPA-Kommission
 - Neues aus der Normung
 4. Weitere Diskussion und Beschlussvorschlag zum Entwurf Memorandum ASR A3.7 Raumakustik
 5. Weitere Aktivitäten mit und durch den Fachausschuss
 6. Ort- und Termin der nächsten Sitzung (geplant 18.11.2021)
 7. Verschiedenes

Zu der Sitzung am 17.08.2021 wird rechtzeitig eine separate Einladung verschickt. Alle Fachausschussmitglieder sind eingeladen, weitere Themen vorzuschlagen. ■

*Christian Nocke
Henning Alphe
Tobias Kirchner*

Fachausschuss Lärm: Wirkungen und Schutz



Vorsitzender:

Prof. Dr. André Fiebig, Technische Universität Berlin
andre.fiebig@tu-berlin.de

Wir laden alle Mitglieder und Interessierte des FA Lärm herzlich zur Fachausschusssitzung im Rahmen der DAGA 2021 in Wien ein. Die Sitzung

ist aktuell als Hybrid-Sitzung geplant: am Montag, den **16. August 2021** von **12:50 bis 13:40 Uhr** im **Saal Lehar 4** (bzw. online)

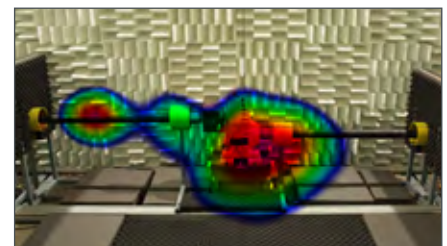
Die Tagesordnung ist wie folgt geplant:

1. Feststellung der Tagesordnung
2. Bericht über die Aktivitäten des FA Lärm (z. B. Frühjahrsworkshop, International Year of Sound, Tag gegen Lärm 2021)
3. Termine und Planung von Veranstaltungen und Aktivitäten des FA Lärm
4. Verschiedenes

Wir freuen uns auf Ihre Teilnahme. ■

*André Fiebig
Frederik Gast*

Fachausschuss Physikalische Akustik



Vorsitzender:

Prof. Dr. Joachim Böes, Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie IDMT
joachim.boes@idmt.fraunhofer.de

Virtuelle Fachausschusssitzung am 17.03.2021

Aufgrund der Corona-Pandemie fand am 17. März 2021 eine virtuelle Fachausschusssitzung statt, an der 12 Mitglieder und Interessierte teilnahmen. Hauptinhalt war die endgültige Festlegung des Themas „Modelle der physikalischen Akustik“ für den DEGA-Workshop Physikalische Akustik (21./22.10.2021 im Physikzentrum Bad Honnef). Die inhaltliche Organisation liegt in den Händen von Christian Adams, Matthias Klärner und Ivor Nissen – vielen Dank dafür!

DAGA 2021: Strukturierte Sitzungen

Für die unter Beteiligung von Mitgliedern des Fachausschusses organisierten Strukturierten Sitzungen „Acoustic Metamaterials“, „Maschinelles Lernen und Künstliche Intelligenz für Vibroakustik,

Ultraschall sowie Zustandsüberwachung von Strukturen und Maschinen“ und „Meeresakustik und Wasserschall“ im Rahmen der DAGA 2021 in Wien wurden 12, 8 bzw. 18 Beiträge angemeldet. Auch für dieses großartige Engagement von Organisierenden und Vortragenden ganz herzlichen Dank!

Nächste Fachausschusssitzung

Die nächste Fachausschusssitzung wird im Rahmen der DAGA 2021 in Wien (15.–18.08.2021) stattfinden – nach dem derzeitigen Stand der Planungen

am Mittwoch, den **18. August 2021**

von **13:15 bis 14:00 Uhr**

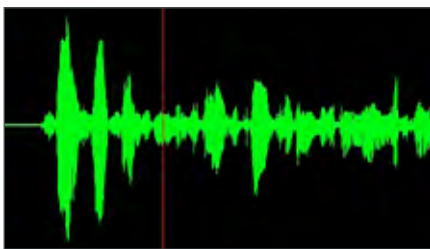
im **Saal Schubert 1+2** (bzw. online)

der Messe Wien.

Da von der DEGA erst Mitte Juni 2021 je nach Pandemielage final entschieden wird, ob die DAGA 2021 als hybride Tagung oder rein online stattfinden wird, wird die Fachausschusssitzung derzeit sicherheitshalber als Hybrid-Sitzung geplant: Vor Ort Anwesende können im o. g. Raum „Schubert 1+2“ physisch teilnehmen; für die online-Teilnahme wird ein Zoom-Link über die Tagungstechnik bereitgestellt, der Zugang erfolgt über die DAGA-App; die Kommunikation im Hörsaal soll aufgrund der begrenzten WLAN-Kapazität der Messe Wien nur über den Saal-Laptop erfolgen. ■

Joachim Bös

Fachausschuss Sprachakustik



Vorsitzender:

Dr. Janto Skowronek, Hochschule für Technik Stuttgart

janto.skowronek@hft-stuttgart.de

Alle Mitglieder und Interessierte sind sehr herzlich zur nächsten Sitzung des FA Sprachakustik eingeladen.

Wir treffen uns während der kommenden DAGA

am Montag, den **16. August 2021**

von **12:15 bis 13:00 Uhr**

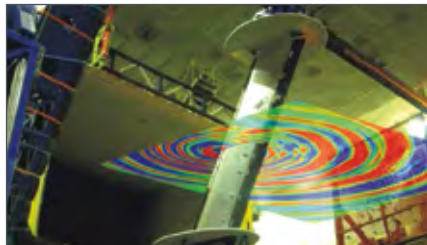
im **Saal Schubert 3** (bzw. online)

Im Falle einer hybriden DAGA wird auch die FA-Sitzung hybrid stattfinden. Vor Ort ist der Treffpunkt der Raum Schubert 3; Zugangsdaten für eine virtuelle Teilnahme werden noch bekannt gegeben.

Neben dem üblichen Bericht der FA Leitung und der Besprechung der nächsten Aktivitäten steht in diesem Jahr auch die turnusgemäße Wahl der FA Leitung an, die wir während der Sitzung durchführen. Wir freuen uns auf Ihre Teilnahme. ■

Janto Skowronek

Fachausschuss Strömungsakustik



Vorsitzender:

Prof. Dr. Manfred Kaltenbacher, Technische Universität Graz

manfred.kaltenbacher@tugraz.at

Bei der DAGA 2021 in Wien ist der Fachausschuss mit dem Vorkolloquium Strömungsakustik am 15.08.2021 (Start um 15:00 Uhr) und mit drei strukturierten Sitzungen vertreten: (1) Messtechnik an rotierenden Systemen (organisiert von Thomas Geyer, Gert Herold, Carsten Spehr); (2) Physik der Strömungsakustik (organisiert von Jan Delfs und Manfred Kaltenbacher); (3) Überströmte Schallabsorber (organisiert von Lars Enghardt und Stefan Becker). Zusätzlich gibt es mehr als 15 Vorträge bzw. Poster aus dem Bereich Strömungsakustik in regulären Sitzungen.

Nach mehreren erfolgreichen DEGA-Akademie-Kursen „Strömungsakustik“ hat die diesjährige DEGA-Akademie „Strömungsakustik“ in Erlangen ein neues überarbeitetes Konzept bestehend aus zwei Kursen:

- Strömungsakustik 1 – Grundlagen,

Auslegungen und industrielle Anwendungen (28.09.–29.09.2021)

- Strömungsakustik 2 – Theorie und Numerische Berechnungsverfahren samt Anwendungen (30.09.–01.10.2021)

Der Kurs 1 lehrt die Strömungsakustik von den Grundlagen zu den Anwendungen in kompakter und praxisnaher Form. Er richtet sich insbesondere an Entwicklungsingenieure, Ingenieure in Forschungs- und Hochschulinstituten, aber auch an Mitarbeiter in Beratungsfirmen und behördlichen Einrichtungen, die sich mit diesem Themenkomplex intensiv auseinandersetzen bzw. beschäftigen wollen. Der Kurs 2 ergänzt den Kursteil 1 und lehrt die Theorie der Strömungsakustik und gibt einen intensiven Einblick in die CAA-Berechnungsverfahren. Es wird der momentane Entwicklungsstand in der Behandlung strömungsakustischer Fragestellungen aufgezeigt. Der Kurs richtet sich speziell an Entwicklungsingenieure in der Industrie und Ingenieure in Forschungs- und Hochschulinstituten, die schon auf dem Gebiet der Strömungsakustik arbeiten, Erfahrungen auf diesem Gebiet haben und sich mit diesem Themenkomplex auseinandersetzen.

Die Sitzung des Fachausschusses auf der DAGA 2021 in Wien, zu der wir alle Mitglieder des FA-Strömungsakustik sowie Interessenten herzlich einladen möchten, findet hybrid (man kann via APP mit Zoom-Link online auch teilnehmen) statt

am Montag, den **16. August 2021**

von **12:40 bis 13:40 Uhr**

im **Saal Stolz 2** (bzw. online)

Hierzu schlagen wir folgende Tagesordnung vor:

1. Begrüßung, Feststellung der Beschlussfähigkeit, Vorstellung und Beschluss der Tagesordnung
2. Bericht des Vorsitzenden
3. Diskussion zum Bericht
4. Rückblick zu den Aktivitäten des Fachausschusses im Jahr 2020
5. Planung der nächsten Aktivitäten des Fachausschusses
6. Sonstiges

Wir freuen uns über eine rege Teilnah-

me sowohl an der FA-Sitzung als auch an den Vorträgen zur Strömungsakustik und freuen uns auf die DAGA in Wien. ■

Manfred Kaltenbacher

Marc Schneider

Lars Enghardt

Fachausschuss Ultraschall



Vorsitzender:

Prof. Dr. Claus-Dieter Ohl, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
claus-dieter.ohl@ovgu.de

Wir laden alle Interessierte und Mitglieder des FA Ultraschall zur jährlichen Versammlung

am Dienstag, den **17. August 2021**

von **12:30 bis 13:30 Uhr**

im **Saal Lehar 3** (bzw. online)

auf der DAGA ein. Diese Veranstaltung wird hybrid organisiert. Als wichtiger Tagesordnungspunkt steht die Wahl der Leitung des FA Ultraschalls an. Alle FA-Mitglieder, die online an der DAGA-Tagung teilnehmen möchten, erhalten einen Zoom Link für die Mitgliederversammlung rechtzeitig zugeschickt.

Am 05.01.2021 fand die letzte Mitgliederversammlung diesmal online mit 9 Teilnehmern statt. Ein wichtiger Tagesordnungspunkt war die Diskussion zur Änderung der Geschäftsordnung. Eine Änderung betrifft die Verwaltung der aktiven Mitglieder. So gibt es nun den Vorschlag, regelmäßig die Mitglieder zu befragen, ob das Interesse an einer Mitgliedschaft fortbesteht. Diese und weitere Änderungen sollen bei der Mitgliederversammlung während der DAGA 2021 diskutiert und dann auch beschlossen werden.

Weiterhin sind zwei Workshops geplant: der erste Workshop Kavitation im Herbst 2021 wird von Dr. Mettin (Uni

Göttingen) und Prof. Ohl (Uni Magdeburg) organisiert und der zweite Workshop zu Ultraschall-Messmethoden im Jahr 2022 wird von Prof. Henning (Uni Paderborn) geleitet.

Der FA Ultraschall lädt vom 29.11. bis 01.12.2021 zum Workshop Kavitation im Kloster Drübeck alle Interessierten herzlich zur Teilnahme und Mitgestaltung ein. Für unseren bewährten Austausch zwischen Anwendern und Forschern können Sie einen 15 minütigen Vortrag anmelden. Sie finden weitere Informationen auf der Webseite <https://www.soft-matter.ovgu.de/Aktuelles/Kavitationsworkshop+2021.html>.

Wir freuen uns auf eine rege Teilnahme. ■

Claus-Dieter Ohl

Fachausschuss Virtuelle Akustik



Vorsitzender:

Dr. Franz Zotter, Kunstuniversität Graz
zotter@iem.at

Wir laden zur Versammlung des Fachausschuss Virtuelle Akustik auf der DAGA in Wien und virtuell ein (hybrid, Online-Teilnahme wird über die DAGA-App zugänglich):

am Montag, den **16. August 2021**

von **12:50 bis 13:40 Uhr**

im **Saal Lehar 1** (bzw. online)

Ein wesentlicher Punkt unserer Tagesordnung ist die Neuwahl der Fachausschussleitung (siehe auch Geschäftsordnung unter <https://www.dega-akustik.de/va>).

Mit Stefan Weinzierl als Gastgeber richtet der Fachausschuss das DEGA-Symposium „Interaktive Simulation und Auralisation von Räumen“ vom 12.–13. November 2021 in Berlin aus. Sie sind herzlich dazu eingeladen. Ausführliche Informati-

onen über die Vorträge, Demos und die geplante Diskussionsrunde folgen im Detail auf dem Symposiumsflyer.

Wir werben bei interessierten Studierenden um die Einreichung von Stücken zum 3D-Audio-Produktionswettbewerb, <https://iaem.at/ambisonics/s3dapc/>. Nominierte Beiträge werden auf der Tonmeistertagung vorzuhören sein und on-demand online, und in der dritten Novemberwoche wird die Preisverleihung als Online-Event live stattfinden. Interessierte Institutionen mit geeigneter Lautsprecheranlage werden bei der Organisation live verbundener Public-Listing-Sessions unterstützt. ■

Franz Zotter

■ Mitglieder / Fördermitglieder

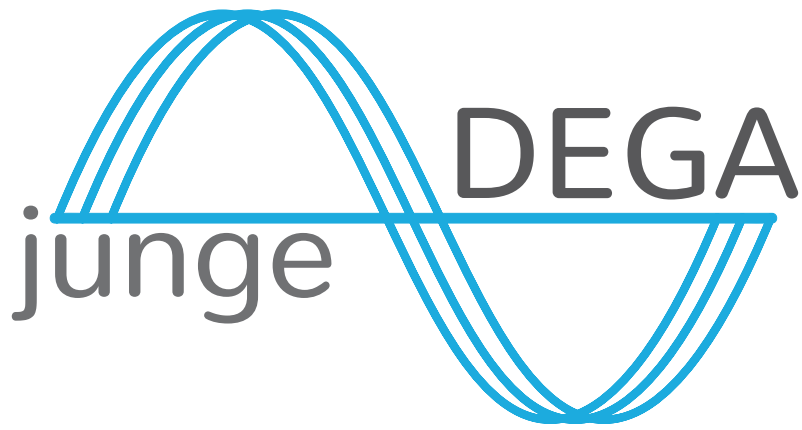
Derzeit hat die Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.

- 1.970 persönliche Mitglieder
- und 77 Fördermitglieder (Stand Mai 2021).

Über alle Leistungen und Angebote, die mit einer Mitgliedschaft verbunden sind, können sich interessierte Akustiker(innen) und Firmen auf <https://www.dega-akustik.de/mitglieder-und-beitritt> informieren.

Die Arbeit der DEGA wird dankenswerterweise durch die Fördermitgliedschaft folgender Firmen besonders unterstützt:

- ACOEM GmbH, Hallbergmoos
- Akustikbüro Schwartzberger und Burkhart, Pöcking / Weimar
- ALN Akustik Labor Nord GmbH, Kiel
- AMC Schwingungstechnik, Asteasu (E) / Nürnberg
- Amorim Deutschland GmbH, Delmenhorst
- ARRK Engineering GmbH, München
- BASF SE, Ludwigshafen
- Baswa AG, Baldeggen (CH)
- Bayer Bauphysik Ingenieurgesellschaft mbH, Fellbach
- Bertrandt Technikum GmbH, Ehningen
- BeSB GmbH, Berlin
- Brose Fahrzeugteile GmbH, Oldenburg
- CADFEM GmbH, Grafing
- CAE Software und Systems GmbH, Gütersloh
- Carcoustics TechConsult GmbH, Leverkusen
- Cervus Consult GmbH, Willich
- Cirrus Research GmbH, Frankfurt/M.
- Comsol Multiphysics GmbH, Göttingen
- DataKustik GmbH, Gilching
- Ecophon Deutschland, Lübeck
- EDAG Engineering GmbH, München
- EM Plan, Neusäß
- ESI Engineering System International GmbH, Neu-Isenburg
- Gesellschaft für Sonder-EDV-Anlagen mbH, Hofheim
- Getzner Werkstoffe GmbH, Bürs (A)
- GN Bauphysik Ingenieurgesellschaft mbH, Stuttgart
- G.R.A.S., Holte (DK)
- HEAD acoustics GmbH, Herzogenrath
- HEAD-Genuit-Stiftung, Herzogenrath
- Hottinger Brüel & Kjaer GmbH, Darmstadt
- IAC Industrial Acoustics Company GmbH, Niederkrüchten
- IFB Ingenieure GmbH, Bad Teinach-Zavelstein
- Kötter Consulting Engineers GmbH & Co. KG, Rheine
- Kraiburg Relastec GmbH & Co. KG, Salzwedel
- Kurz und Fischer GmbH Beratende Ingenieure, Winnenden
- Lärmkontor GmbH, Hamburg
- Lairm Consult GmbH, Bargteheide
- Lehrstuhl Strömungsmaschinen, Universität Rostock
- Lignotrend Produktions GmbH, Weilheim-Bannholz
- Metecno Bausysteme GmbH, Blankenhain
- Microflow Technologies BV, Arnhem (NL)
- Microtech Gefell GmbH, Gefell
- Möhler + Partner Ingenieure AG, München
- Molex CVS Bochum GmbH, Bochum
- Müller-BBM Gruppe, Planegg bei München
- Norsonic Tippkemper GmbH, Oelde-Stromberg
- Novicos GmbH, Hamburg
- NTi Audio GmbH, Essen
- Odeon A/S, Lyngby (DK)
- PCB Synotech GmbH, Hückelhoven
- ProCom-Bestmann e.K., Naumburg
- Regupol BSW GmbH, Bad Berleburg
- Renz Systeme GmbH, Aidlingen
- Rockwool Rockfon GmbH, Gladbeck
- Röchling Automotive SE & Co. KG, Worms
- Saint-Gobain Isover G+H AG, Ladenburg
- Schaeffler Gruppe, Herzogenaurach
- Schöck Bauteile GmbH, Baden-Baden
- Sennheiser electronic GmbH & Co. KG, Wedemark
- Siemens Industry Software GmbH, München
- Sika Automotive Frankfurt-Worms GmbH
- Sinus Messtechnik GmbH, Leipzig
- solaris Ingenieur-Consult GmbH, Chemnitz
- Sonatech GmbH & Co. KG, Ungerhausen
- SoundPLAN GmbH, Backnang
- Soundtec GmbH, Göttingen
- Spektra Schwingungstechnik und Akustik GmbH, Dresden
- Stapelfeldt Ingenieure GmbH, Dortmund
- Steffens Systems GmbH, Köln
- Sto SE & Co. KGaA, Stühlingen
- Texaa, Gradignan (F)
- Umfotec GmbH, Northeim
- Valeo Telematik und Akustik GmbH, Friedrichsdorf
- Verlagsgesellschaft R. Müller GmbH & Co. KG, Köln
- Wölfel Gruppe, Höchberg
- WRD GmbH, Aurich
- ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen



Das Mentoring-Programm der jungen DEGA
startet in die nächste Runde!

Jetzt als Mentor:in oder Mentee anmelden
unter deg-aakustik.de/jd

Wir bieten

- One-on-One Mentoring
- Kostenfreie Begleitung für ein Jahr
- Vermittlung der Tandems nach Fachgebiet und Interessenlage
- Freie Gestaltung des Kontakts
- Einblicke in Unternehmen und Forschungsinstitute außerhalb des eigenen Standorts
- Networking mit jungen und erfahrenen Akustik-Begeisterten
- Kick-Off Meeting auf der DAGA mit Begrüßung der aktuellen Tandems und Verabschiedung des vorherigen Jahrgangs
- DAGA-Teilnahme erwünscht, aber nicht erforderlich

Mentor:innen

- Laufbahn in Wissenschaft und/oder Wirtschaft
- Austausch und Kontakt mit der nächsten Generation der Akustik
- Weitergabe der eigenen Erfahrungen
- Keine DEGA-Mitgliedschaft notwendig

Mentees

- Bachelor-Studierende ab dem 4. Fachsemester, Masterstudierende, Promovierende
- Individuelle Begleitung durch eine persönliche Ansprechperson
- Unterstützung bei der Karriereplanung
- DEGA-Mitgliedschaft erforderlich

Beginn:
DAGA

Laufzeit:
1 Jahr

Art:
One-on-One

Kosten:
Keine

Weitere Informationen:
deg-aakustik.de/jd

Normen/Richtlinien

Neue Regelwerke zu den Themen Akustik und Lärminderung (Feb. 2021 – Mai 2021)

Bezeichnung	Titel	Preis*
Fachgebiet Audiologie / Medizintechnik		
E DIN EN ISO 8253-3	Akustik – Audiometrische Prüfverfahren – Teil 3: Sprachaudiometrie (ISO/DIS 8253-3:2020); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 8253-3:2020	148,10 €
Fachgebiet Bau- und Raumakustik		
DIN EN 16205	Messung von Gehschall auf Fußböden im Prüfstand; Deutsche Fassung EN 16205:2020	70,60 €
DIN EN ISO 12999-1	Akustik – Bestimmung und Anwendung der Messunsicherheiten in der Bauakustik – Teil 1: Schalldämmung (ISO 12999-1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 12999-1:2020	89,80 €
DIN EN ISO 717-1	Akustik – Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 1: Luftschalldämmung (ISO 717-1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 717-1:2020	101,80 €
DIN EN ISO 717-2	Akustik – Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 2: Trittschalldämmung (ISO 717-2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 717-2:2020	96,40 €
E DIN EN ISO 3382-3	Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik – Teil 3: Großraumbüros (ISO/DIS 3382-3:2021); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 3382-3:2021	83,20 €
Fachgebiet Elektroakustik / Messgeräte		
DIN EN IEC 60118-13, VDE 0750-11	Elektroakustik – Hörgeräte – Teil 13: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Störfestigkeit gegen digitale Mobilfunkgeräte (IEC 60118-13:2019); Deutsche Fassung EN IEC 60118-13:2020	61,65 €
DIN EN IEC 63034	Mikrolautsprecher (IEC 63034:2020); Deutsche Fassung EN IEC 63034:2020	132,70 €
Fachgebiet Lärmschutz		
DIN EN 13819-1	Gehörschützer – Prüfung – Teil 1: Physikalische Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 13819-1:2020	132,70 €
DIN EN 13819-2	Gehörschützer – Prüfung – Teil 2: Akustische Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 13819-2:2020	70,60 €
DIN EN 352-1	Gehörschützer – Allgemeine Anforderungen – Teil 1: Kapselgehörschützer; Deutsche Fassung EN 352-1:2020	77,30 €
DIN EN 352-2	Gehörschützer – Allgemeine Anforderungen – Teil 2: Gehörschutzstöpsel; Deutsche Fassung EN 352-2:2020	70,60 €
DIN EN 352-3	Gehörschützer – Allgemeine Anforderungen – Teil 3: An Kopfschutz und/oder Gesichtsschutzgeräten befestigte Kapselgehörschützer; Deutsche Fassung EN 352-3:2020	77,30 €
DIN EN 352-4	Gehörschützer – Sicherheitstechnische Anforderungen – Teil 4: Pegelabhängig däm-mende Kapselgehörschützer; Deutsche Fassung EN 352-4:2020	51,30 €
DIN EN 352-5	Gehörschützer – Sicherheitstechnische Anforderungen – Teil 5: Kapselgehörschützer mit aktiver Geräuschkompensation; Deutsche Fassung EN 352-5:2020	44,60 €

Bezeichnung	Titel	Preis*
DIN EN 352-6	Gehörschützer – Sicherheitstechnische Anforderungen – Teil 6: Kapselgehörschützer mit sicherheitsrelevantem Audioinput; Deutsche Fassung EN 352-6:2020	51,30 €
DIN EN 352-7	Gehörschützer – Sicherheitstechnische Anforderungen – Teil 7: Pegelabhängig däm-mende Gehörschutzstöpsel; Deutsche Fassung EN 352-7:2020	51,30 €
DIN EN 352-8	Gehörschützer – Sicherheitstechnische Anforderungen – Teil 8: Kapselgehörschützer mit Audiounterhaltungseingang; Deutsche Fassung EN 352-8:2020	51,30 €
DIN EN 352-9	Gehörschützer – Sicherheitstechnische Anforderungen – Teil 9: Gehörschutzstöpsel mit sicherheitsrelevantem Audioinput; Deutsche Fassung EN 352-9:2020	44,60 €
DIN EN 352-10	Gehörschützer – Sicherheitstechnische Anforderungen – Teil 10: Gehörschutzstöpsel mit Audiounterhaltungseingang; Deutsche Fassung EN 352-10:2020	51,30 €
Fachgebiet Maschinen- und Fahrzeugakustik		
DIN EN ISO 11690-1	Akustik – Richtlinien für die Gestaltung lärmarmer maschinenbestückter Arbeitsstät-ten – Teil 1: Allgemeine Grundlagen (ISO 11690-1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 11690-1:2020	106,70 €
DIN EN ISO 11690-2	Akustik – Richtlinien für die Gestaltung lärmarmer maschinenbestückter Arbeitsstätten – Teil 2: Lärminderungsmaßnahmen (ISO 11690-2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 11690-2:2020	111,90 €
DIN EN ISO 11691	Akustik – Messung des Einfügungsdämpfungsmaßes von Schalldämpfern in Kanälen ohne Strömung – Laborverfahren der Genauigkeitsklasse 3 (ISO 11691:2020); Deut-sche Fassung EN ISO 11691:2020	70,60 €
DIN EN ISO 9053-2	Akustik – Bestimmung des Strömungswiderstandes – Teil 2: Luftwechselstromverfah-ren (ISO 9053-2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 9053-2:2020	83,20 €
DIN EN ISO 9902-6	Textilmaschinen – Geräuschemessverfahren – Teil 6: Maschinen zur Herstellung textiler Flächengebilde (ISO 9902-6:2018); Deutsche Fassung EN ISO 9902-6:2021	83,20 €
E DIN 14610	Akustische Warneinrichtungen für bevorrechtigte Wegebenutzer	44,60 €
E DIN EN IEC 60034-9, VDE 0530-9	Drehende elektrische Maschinen – Teil 9: Geräuschgrenzwerte (IEC 2/1994/CD:2020); Text Deutsch und Englisch	18,90 €
E DIN EN ISO 8528-10	Stromerzeugungsaggregate mit Hubkolben-Verbrennungsmotor – Teil 10: Messung von Luftschall mit der Hüllflächenmethode (ISO/DIS 8528-10:2021); Deutsche und Engli-sche Fassung prEN ISO 8528-10:2021	122,40 €
Fachgebiet Ultraschall / Hydroakustik		
DIN EN IEC 63009	Ultraschall – Physiotherapiesysteme – Feldspezifikationen und Messmethoden im Frequenzbereich 20 kHz bis 500 MHz (IEC 63009:2019); Deutsche Fassung EN IEC 63009:2019	117,20 €

*) Download

Bezug aller o. g. Regelwerke über den Beuth Verlag (<https://www.beuth.de>); Quelle: DIN e. V. (Perinorm); ohne Anspruch auf Vollständigkeit; Preise ohne Gewähr

Publikationen

Übersicht

- Alle Online-Publikationen sind auf <https://www.dega-akustik.de/publikationen> frei verfügbar.
- Gedruckte Publikationen (außer ⁴⁾) können bei der DEGA-Geschäftsstelle bestellt werden (Preise inkl. MwSt; zzgl. Versand; Zahlungsbedingungen siehe <https://www.dega-akustik.de/zahlung>)

	Name	gedruckt	online
Zeitschrift	Akustik Journal (drei Ausgaben pro Jahr)	0 € ¹⁾	X
	Acta Acustica®		X
Tagungsbände	DAGA-Tagungsbände „Fortschritte der Akustik“ (1970–2020)		X ²⁾
	Proceedings ICA / INTER-NOISE		X ³⁾
Empfehlungen und Memoranden	DEGA-Empfehlung 101: Akustische Wellen und Felder		X
	DEGA-Empfehlung 102: Mindestkanon Akustik in der Bachelor-Ausbildung		X
	DEGA-Empfehlung 103: Schallschutz im Wohnungsbau - Schallschutzausweis		X
	Memorandum „Die allgemein anerkannten Regeln der Technik in der Bauakustik“ (DEGA BR 0101)		X
	Memorandum „Schallschutz im eigenen Wohnbereich“ (DEGA BR 0104)		X
	Memorandum zur Durchführung und Dokumentation von Audio-Produktionen für wissenschaftliche Anwendungen in der Akustik (DEGA VA 1201)		X
	Memorandum „Beurteilung der Geräusche gebäudetechnischer Anlagen“ (DEGA BR 0105)		X
	Memorandum „Tieffrequente Schallübertragung von schwimmenden Estrichen“ (DEGA BR 0106)		X
Schriftenreihe „Geschichte der Akustik“	Heft 1: Von der Antike bis in das 20. Jahrhundert	10,00 €	
	Heft 2: Akustisches Wissen auf den Transferwegen	10,00 €	
	Heft 3: Preisträger europäischer Wissenschaftsakademien	10,00 €	
	Heft 4: Sondhauß-Röhre, Seebeck-Sirene	15,00 €	
	Heft 5: Von den Äolstönen bis zur Strouhal-Zahl	32,95 € ⁴⁾	
	Heft 6: Von der Luftsirene bis zur russischen Aeroakustik	29,95 € ⁴⁾	
	Heft 7: Lord Rayleigh, Sir Horace Lamb, Sir James Lighthill	22,95 € ⁴⁾	

	Name	gedruckt	online
	Heft 8: Große Wissenschaftler mit Beiträgen zur Akustik	32,95 € ⁴⁾	
	Heft 9: Kundt, Waetzmann, Schuster	26,95 € ⁴⁾	
	Heft 10: Eberhard Zwicker, Lothar Cremer und Manfred Heckl	32,95 € ⁴⁾	
	Heft 11: Erwin Meyer, Heinrich Barkhausen und Walter Reichardt	29,95 € ⁴⁾	
Fachgebiet Lärm	YouTube-Video „So klingt meine Welt“		X
	YouTube-Videos „Noisella lehrt Akustik“		X
	Broschüre „Lärm im Alltag“		X
	ALD-Broschüre „Straßenverkehrslärm“	2,00 €	X
	Hörbeispiele und Geräuschsituationen		X
	ALD-Broschüre „Energiewende und Lärmschutz“	2,00 €	X
	ALD-Broschüre „TEchnologies of NOise Reduction (TENOR)“		X
	ALD-Broschüre „Schienenverkehrslärm – Ursachen, Wirkungen, Schutz“	2,00 €	X
Fachgebiet Musikalische Akustik	Tagungsband (2015) „Musikalische Akustik zwischen Empirie und Theorie“		X
	Tagungsband (2013) „Nuancen in der musikalischen Akustik“		X
	Tagungsband „International Symposium on Music Acoustics“ (ISMA 2019)		X
	Literaturdatensammlung Musikalische Akustik		X
Fachgebiet Lehre der Akustik	Dissertationsregister Akustik		X
	Studienführer „EAA Schola“		X
	YouTube-Video „Faszination Akustik – Eine Reise durch die Welt des Schalls“		X
Fachgebiet Hörakustik	Kompodium zur Durchführung von Hörversuchen in Wissenschaft und industrieller Praxis (Entwurf)		X

¹⁾ für Mitglieder

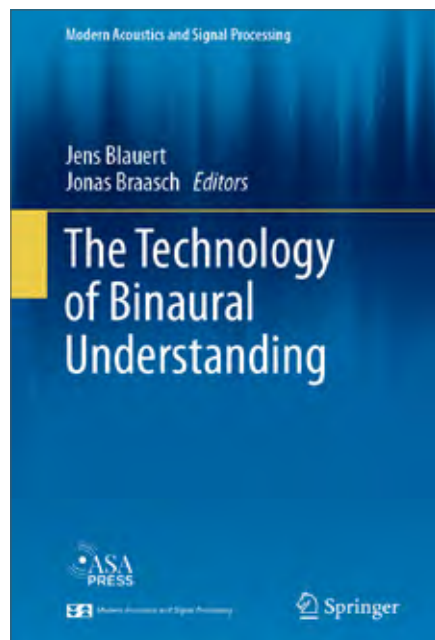
²⁾ die zugehörigen CD-/DVD-/Buchprodukte (sofern vorhanden) können weiterhin käuflich erworben werden

³⁾ Anleitung für den Zugang unter <https://www.dega-akustik.de/dega/aktuelles/ica-und-inter-noise/>

⁴⁾ Preise ohne Gewähr; Bestellungen ausschließlich über <https://westarp-bs.de>

■ Buchrezension

Jens Blauert, Jonas Braasch (Hrsg.)
 „The Technology of Binaural Understanding“ (2020)
 815 Seiten,
 ISBN: 978-3-030-00385-2
 Verlag: Springer und ASA Press
 Preis: 187,19 € (Hardcover)



Vom Hören über das Zuhören zum Verstehen, so kann man wohl die Folge der Werke Räumliches Hören / Spatial Hearing (1974/1997), The Technology of Binaural Listening (2013) und des jetzt erschienenen The Technology of Binaural Understanding zusammenfassen, womit auch die zunehmende Komplexität der Thematik klar wird. Die letzten beiden Werke stellen die Forschungsergebnisse der offenen Forschungsgemeinschaft AABBA dar, die 2009 von Jens Blauert gegründet wurde und deren Aufgabenstellung schon in ihrem Namen deutlich wird: **Aural Assessment By means of Binaural Algorithms** (<https://www.oew.ac.at/isf/forschung/fachbereiche-teams/hoeren/aabba-aural-assessment-by-means-of-binaural-algorithms>). Es geht also darum, die binaurale Verarbeitung akustischer Signale durch den Menschen zu verstehen und diese Prozesse nachzubilden bzw. sie für technische Zwecke einzusetzen. Numerische Methoden wie neuronale Netze werden nicht bevorzugt, da sie zwar Resultate liefern können, aber selten Einblicke in interne Abläufe ermöglichen

und damit nicht zum Ziel beitragen, das menschliche Verstehen zu verstehen. Während das Vorgängerwerk sich dem listening (frei: Zuhören) und den subkortikalen Abläufen widmete, nähern wir uns hier dem understanding, d.h. dem Verstehen und Erfassen der Bedeutung akustischer Stimuli, die im kortikalen Bereich stattfindet.

Die Verwendung eines blackboard model (Schwarzes Brett) wird vorgeschlagen, bei dem die Teilprozesse über ein zentrales blackboard miteinander verknüpft sind. Eingehende Information wird dort gesammelt und bewertet und ggf. an andere Teilprozesse zur weiteren Auswertung weitergeleitet. Die Verarbeitung erfolgt dabei nicht nur bottom-up, sondern nutzt sogenannte Experten, die top-down mit ihrer Wissensbasis die unteren Verarbeitungsebenen beeinflussen können.

Die verschiedensten Aspekte und Anwendungen dieses kognitiven Prozesses werden in fünf Untergruppen in den 25 Kapiteln des Werks behandelt. Kenntnis der grundlegenden physiologischen und psychoakustischen Zusammenhänge wird dabei vorausgesetzt, da nach kurzen Einführungen (mit vielen Literaturverweisen) die Autoren sich den komplexeren Themen widmen.

Teil 1, Forming and Interpreting Aural Objects, befasst sich mit der kognitiven Erfassung und Separierung auditiver Ereignisse in komplexen akustischen Szenarien. Im vierten Kapitel wird der Ansatz der blackboard architecture erläutert.

Teil 2, Configuring and Understanding Aural Space, beleuchtet die räumliche Wahrnehmung, von den Grundlagen über die biologischen Zusammenhänge. Kapitel 7 befasst sich mit dem Raumeindruck in Konzertsälen, Kapitel 8 mit der Adaptierung des Menschen an spezifische Räume. Kapitel 9 behandelt die Rückwirkung der Raumakustik auf das Spielverhalten von Musikern und Kapitel 10 untersucht den möglichen Einfluss der uns umgebenden Räume auf die Evolution des menschlichen Hörens.

In Teil 3, Processing Cross-Modal Interference, wird das Zusammenspiel zwischen auditiven und anderen Reizen

behandelt. Themen sind die Lokalisation bei audiovisueller Interaktion, der Einfluss der Bewegung des Kopfs, des Zuhörers oder der Quelle sowie die Überlagerung unterschiedlicher Raumakustiken in produziertem Audiomaterial.

Teil 4, Evaluating Aural-Scene Quality and Speech Understanding, beschäftigt sich in Kapitel 14 grundlegend mit Fragen der (eher technischen) sound quality und der (eher subjektiv-emotionalen) quality of experience, und thematisiert wie Kapitel 15 die Frage des geeigneten Vokabulars zur Beurteilung von akustischen Ereignissen und Umgebungen. Kapitel 16 geht auf Aspekte der Produktion und Reproduktion räumlicher akustischer Szenen ein. Die beiden folgenden Kapitel gehen auf Anwendungen in search & rescue Szenarien, mit akustisch gesteuerten Robotern, und in der automatischen Spracherkennung ein. Die Sprachverständlichkeit in komplexen Schallfeldern ist Thema des Kapitel 19.

Teil 5, Applying Cognitive Mechanisms to Audio Technology, beginnt mit einem Überblick zur Erschaffung künstlicher akustischer Räume, einmal mittels mehrkanaliger Verfahren wie Ambisonics und Wellenfeldsynthese, im folgenden Kapitel mit dem Fokus auf binaurale Reproduktion. Kopfbewegungen sind das Thema der beiden folgenden Abschnitte, im Zusammenhang mit unterstützenden Displays und Robotik-Anwendungen. Die beiden abschließenden Kapitel beschäftigen sich mit der Verbesserung von Hörhilfen durch signal- und raumabhängige Verfahren.

Mit diesem weit gefächerten Spektrum findet man tiefgehende Abhandlungen in seinem etwaigen Interessensgebiet aber auch viele Anreize durch Einblicke in verwandte oder auch fernliegende Bereiche. Das Werk gibt mit seinen sehr umfassenden, geschätzt 2.800 (!) Literaturverweisen einen sehr guten Überblick über die bisherige Forschung sowie aktuelle Ergebnisse. Mit seinen vielen offenen Fragestellungen werden Ausblicke und Anregungen zugleich gegeben.

Die Kapitel stehen auch einzeln als Download zur Verfügung. Um thematisch in sich abgeschlossen sein zu

können, weisen sie eine gewisse Redundanz auf. Diese nimmt man aber gerne in Kauf, da dadurch auch verschiedene Perspektiven auf dieselbe Thematik erhalten werden. Wie die verwendete Technik der blackboard architecture, kann auch dieses Werk und sein Vorgänger als ein (sehr großes) Schwarzes Brett gesehen werden, auf dem die Ergebnisse der Autorengruppen gesammelt wurden. Es verbleibt für den Lesenden dann die Aufgabe, als Verwalter des eigenen blackboard die überwältigende Menge an Informationen einzuordnen und entsprechend der persönlichen Relevanz zu verknüpfen. Das Werk ist für alle mit zumindest Grundkenntnissen der Psychoakustik zu empfehlen, die sich vertieft über den aktuellen Stand der

Binauraltechnologie und des auditiven Verstehens informieren und zu weiteren Aufgaben inspirieren lassen wollen. ■

Martin Schneider

Georg Neumann GmbH, Berlin

Aus der Industrie

Veranstaltungshinweis

Oktober / November 2021

Hottinger Brüel & Kjær: Eventreihe im Oktober und November 2021



Seit Jahrzehnten sind Brüel & Kjær und HBM in verschiedenen Branchen zuverlässige Partner, wenn es um hochgenaue Technologien und Expertise in den Bereichen Schall und Schwingung sowie Prüf- und Messtechnik geht. Beide Unternehmen haben sich als Hottinger Brüel & Kjær (HBK) zusammengeschlossen, dem weltweit führenden Anbieter von integrierten Lösungen für Prüfung, Messung, Steuerung und Simulation. Bei den „HBK Solution Days“ erleben Sie den Mehrwert dieser Fusion live – vom 26.–28.10.2021 in München sowie vom 16.–19.11.2021 in Darmstadt. Gönnen Sie sich einen oder mehrere Schulungstage mit wertvollen Informationen und praktischen Tipps und Tricks – für Einsteiger und Fortgeschrittene. Themen des Fokustages „Schall & Schwingung“ sind:

- Schallmessung, Analyse und Auswertung im Arbeits- und Umweltschutz

- Lärmschutz to go!
- ... und wie laut ist der Rasenmäher Ihres Nachbarn? Produktgeräusche verstehen und optimieren
- 5 Klicks: Datenerfassung, Analyse und Auswertung auf Knopfdruck
- Ein Bild sagt mehr als 1.000 Worte – Schall schnell und einfach sichtbar machen

Website:

https://www.hbm.com/index.php?id=8669&L=1&utm_source=AkustikJ&utm_medium=print&utm_campaign=HBKSOLDAYS21_PRT_AKUS_DE



HBK Solution Days

eingereicht von:

Hottinger Brüel & Kjær GmbH ■

Impressum

Akustik Journal Nr. 02 / Juni 2021

Herausgeber

**Deutsche Gesellschaft
für Akustik e.V. (DEGA)**

eingetragen ins Vereinsregister am
Amtsgericht Berlin-Charlottenburg, VR
26648 B

Geschäftsstelle:

Alte Jakobstraße 88

10179 Berlin

E-Mail: dega@dega-akustik.de

Tel.: +49 (0)30 - 340 60 38-00

Fax: +49 (0)30 - 340 60 38-10

Web: www.dega-akustik.de

ISSN

2569-1597 (Print)

2569-1600 (Online)

Chefredaktion

Prof. Dr.-Ing. Detlef Krahé

E-Mail: chefredaktion-aj@dega-akustik.de

Stv. Chefredaktion

Dr. rer. nat. Christian Koch

Redaktionsbeirat

Prof. Dr.-Ing. habil. Ercan Altinsoy

Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Becker

Prof. Dr. rer. nat. Bastian Epp

Prof. Dr. phil. André Fiebig

Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Kletschowski

Prof. Dr.-Ing. Malte Kob

Prof. Dr.-Ing. Schew-Ram Mehra

Redaktionsassistentz

Dipl.-Ing. Evelin Baumer

Dr.-Ing. Martin Klemenz

Anzeigen

Julia Schneiderheinze (M.A.)

E-Mail: jschneiderheinze@dega-akustik.de

Layout und Satz

Dipl.-Ing. Evelin Baumer

E-Mail: ebaumer@dega-akustik.de

Gestaltungskonzept

Heilmeyer und Sernau Gestaltung

Web: www.heilmeyerundserna.com/

Druck

Königsdruck Printmedien und digitale
Dienste GmbH

Web: www.koenigsdruck.de

Bildnachweise

S. 1 – Titelseite: © stock.adobe.com / Sander Meertins; S. 5 – Aktuelles: DAGA 2021, Logo © Ina Platte, inani-design.de; S. 5 – Aktuelles: International Year of Sound 2020–2021, Logo © mit freundlicher Genehmigung der International Commission for Acoustics (ICA); S. 6 – Aktuelles: DEGA-Preis für Kommunikationsräume, Logo © Julia Echthoff, julustrationen.de, Copyright DEGA e. V.; S. 7 – Aktuelles: DEGA-Lärmschutzpreis, Logo © Julia Echthoff, julustrationen.de, Copyright DEGA e. V.; S. 7 – Aktuelles: Tag gegen Lärm 2021, Logo © Viktoria Vorländer, Hintergrundbild: candy1812 / stock.adobe.com; S. 7 – Aktuelles: 14. DEGA-Symposium, Logo © Stefan Weinzierl, TU Berlin; S. 7 – Aktuelles: Noisella lehrt Akustik, Logo © Vie en.ro.se. Ingeniera; S. 48 – Veranstaltungen: DAGA 2021, Logo © Ina Platte, inani-design.de; S. 48 – Veranstaltungen: DAGA 2021, Messe Wien Exhibition & Congress Center © WienTourismus / Christian Stemper; S. 49 – Veranstaltungen: DAGA 2021, Aussicht vom Pratersturm © WienTourismus / Paul Bauer; S. 51 – Veranstaltungen: DEGA-Akademie „Raumakustik kompakt“, Logo © Prof. Dr. Alfred Schmitz, Grevenbroich; S. 52 – Veranstaltungen: 14. DEGA-Symposium, Logo © Stefan Weinzierl, TU Berlin; S. 53 – Veranstaltungen: DAGA 2022, Universität Stuttgart, Campus Vaihingen © U. Regenscheit; S. 53 – Veranstaltungen: DAGA 2022, Kultur- und Kongresszentrum Liederhalle © Florian Selig; S. 53 – Veranstaltungen: DAGA 2022, Ausstellungsimpersion © Christian Hass, DAGA 2007; S. 54 – Veranstaltungen: Tag gegen Lärm 2021, Logo © Viktoria Vorländer, Hintergrundbild: candy1812 / stock.adobe.com; S. 57 – DEGA: Fachausschüsse und Fachgruppen der DEGA stellen sich vor © mit freundlicher Genehmigung der abgebildeten Personen; S. 59 – DEGA: Fachausschuss Bau- und Raumakustik © Silvia Crisman / fotolia.com; S. 59 – DEGA: Fachausschuss Lärm: Wirkungen und Schutz © A.F.X. Süß, Berlin, Copyright DEGA e. V.; S. 59 – DEGA: Fachausschuss Physikalische Akustik © SAM, TU Darmstadt; S. 60 – DEGA: Fachausschuss Sprachakustik © SpeechRecorder, IPS, LMU München; S. 60 – DEGA: Fachausschuss Strömungsakustik © Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Braunschweig; S. 61 – DEGA: Fachausschuss Ultraschall © romaset / fotolia.com; S. 61 – DEGA: Fachausschuss Virtuelle Akustik © Franz Zotter und Stefan Riedel, Kunstuniversität Graz; S. 68 – Publikationen: Buchrezension, Cover „The Technology of Binaural Understanding“ © mit freundlicher Genehmigung des SpringerNature-Verlag GmbH, Heidelberg; S. 69 – Aus der Industrie: Hottinger Brüel & Kjaer Eventreihe © G-Stock Studio / Shutterstock



Einer für Alle: Tango_Plus™

Tango_Plus ist unser eichfähiger Schallpegelmesser und Frequenzanalysator für alle Anwendungen im Arbeits- und Umweltschutz. Das Mikrofon kann über ein 10m Verlängerungskabel abgesetzt werden. Mit der Option Outdoor-Set sind netzunabhängige Dauermessungen über mehrere Wochen möglich. Tango_Plus besticht durch ein brillantes Display, ein intelligentes Softwarekonzept und extrem niedrige Stromaufnahme. Das Gerät ist trotz hoher Funktionalität kostengünstig und einfach zu bedienen. Tango_Plus kann alle Messwerte gleichzeitig messen und in individuell einstellbaren Perioden speichern. Das Setup kann auch einfach vom PC mit der Tango-UTILITY Software erfolgen. Für den Arbeitsschutz werden die Zeiten der Überschreitungen von drei frei wählbaren LCpeak-Schwellen ermittelt.

Frequenzanalyse, Pegelschreiber, Perzentile und UTILITY-Software sind Basis-Lieferumfang.

Technische Daten:

Genauigkeit	Klasse 1 nach IEC 61672 / IEC 61260
Messwerte	- LAF, LAS, LCF, LCS - LAeq, LCeq, LCpeak, LAE - LAFmin, LASmin, LCFmin - Terz- oder Oktavspektrum (A, C, Z) - LAFmax, LASmax, LCFmax, LAImax, - Taktmaximalwerte LAFT, LAFTeq - 3x Perzentile LAFn - 3x LCpeak-Überschreitungspegel - LCeq - LAeq, LAFTeq - LAeq
Frequenzbewertung	A + C
Zeitbewertung	Fast, Slow, Impuls, Peak
Meßbereiche	25 ... 140 dB (LAeq) 60 ... 143 dB (LCpeak)
Display	Color TFT 320 x 240 Pixel
Mikrofon Klasse 1	1/2" Kapsel MK255, 50 mV/Pa
Speicherzyklen	individuell einstellbar je Wert
Schnittstellen	USB 2.0, RS232 Druckerschnittstelle
Batterie	2x AA (Laufzeit > 48 h)
Lieferumfang	Schallpegelmesser, Windschirm, USB-Kabel, Handbuch, Trgekoffer, Tango-Utilities Software
Optionen	- Drucker DPU-S245 - Verlängerungskabel 3 m / 10 m - Outdoor-Set mit Peli-Case und Mikro-Wetterschutz für Dauermessungen

