

Nr. 03 / Oktober 2018

AKUSTIK JOURNAL

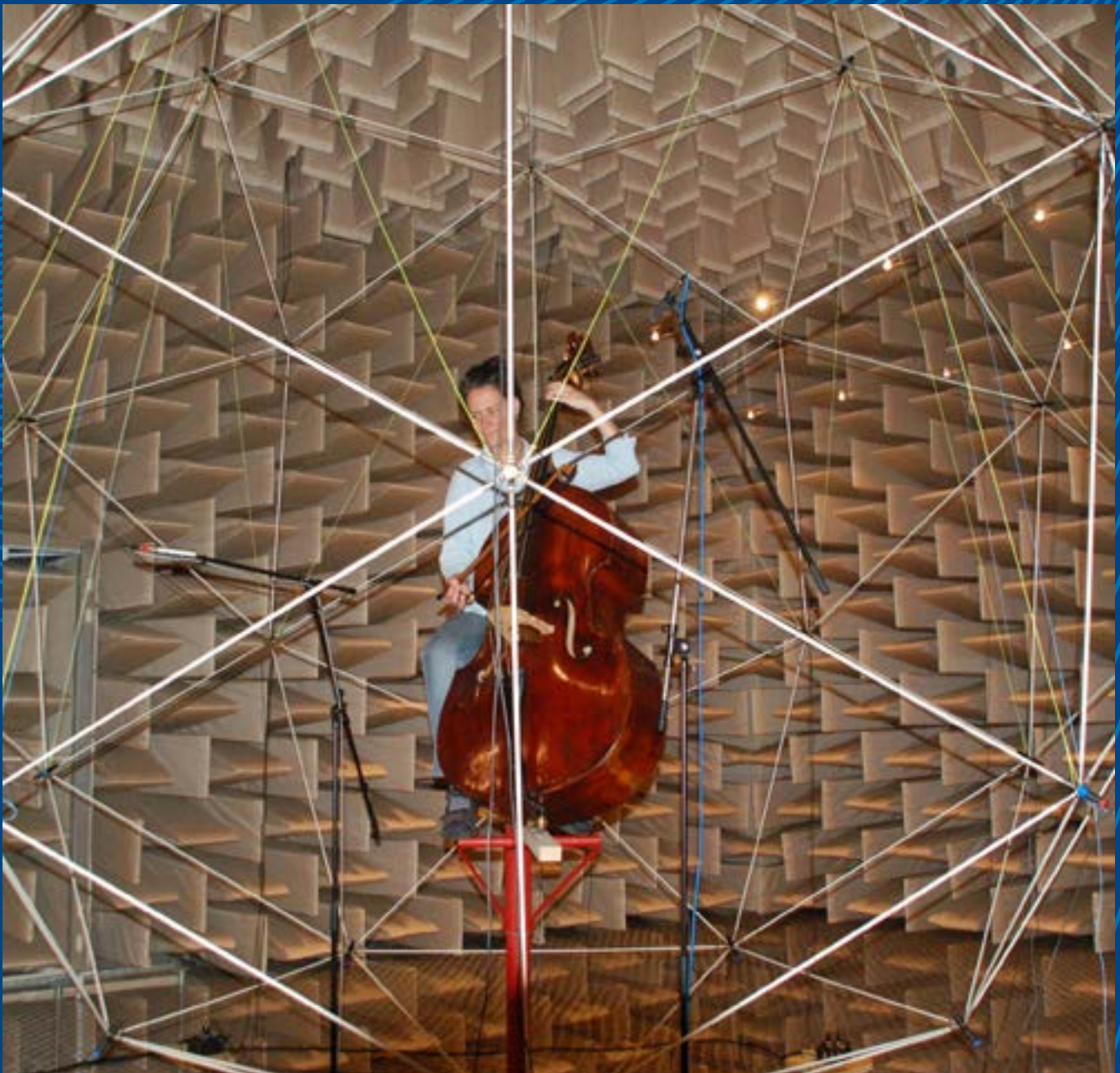


Zur Akustik von Weingläsern ■ Schallbasierte Messungen bei Tiefbohrungen ■ Dynamische Richtwirkung von Musikinstrumenten ■ Thesen zur Akustik anspruchsvoller Räume ■

ALD-Veranstaltungen: „Lärmarme Innenstadt-Logistik“ und „Freizeitlärm“ ■ DEGA-Akademie:

Kurs „Grundlagen der Technischen Akustik“, Kurs „Bauakustik“, Kurs „DEGA-Schallschutzausweis“ ■

Vorschau: DAGA 2019 ■ Vorschau: ICA 2019 / EAA Euroregion ■





SQuadriga III

Die Zukunft der mobilen Messsysteme

Editorial

Das Umweltproblem Lärm gemeinsam bekämpfen

Liebe Leserinnen und Leser,

unbestritten: Lärm ist ein gravierendes Umweltproblem. Deshalb kann es nur sinnvoll sein, mit dem Akustik Journal eine neue Plattform für das Fachpublikum und die interessierte Öffentlichkeit zu schaffen. Umweltpolitik braucht Information, Aufklärung und Beteiligung. In diesem Sinne wünsche ich der noch jungen Publikation, dass sie viel Gehör findet.

Wir wissen, dass uns starker oder dauerhafter Lärm negativ beeinflussen oder sogar krankmachen kann. Nach der Umweltbewusstseinsstudie von 2016 fühlen sich 76 Prozent der deutschen Bevölkerung vom Straßenverkehrslärm zumindest etwas gestört oder belästigt, 59 Prozent vom Nachbarschaftslärm, 46 Prozent vom Industrie- und Gewerbelärm, 44 Prozent vom Flugverkehrslärm und 38 Prozent vom Schienenverkehrslärm.

Im Koalitionsvertrag steht, dass wir den Lärmschutz verbessern wollen. Grundsätzlich soll die Lärmbekämpfung an der Quelle ansetzen. Das ist die effizienteste Strategie. Die Grenzwerte für Straßen-, Schienen- und Luftfahrzeuge müssen auf internationaler Ebene überprüft und dem Stand der Technik entsprechend fortgeschrieben werden. Außerdem wird die Bundesregierung die Finanzausstattung des Lärmsanierungsprogramms an Bundesfernstraßen sicherstellen. Solange der Verkehr auf der Schiene und den Fernstraßen zunimmt, müssen wir erhöhte Lärmschutzmaßnahmen schaffen – und zwar möglichst flexibel.

Einen wichtigen Schritt haben wir im Juni 2017 mit dem „Gesetz zum Verbot des Betriebs lauter Güterwagen“ gemacht. Dieses Gesetz begrenzt ab Dezember 2020 die Schallemissionen von Güterwagen und verlangt Altfahrzeuge nachzurüsten. Auf EU-Ebene setzen wir uns dafür ein, dass laute Güterwagen verboten werden und dass das lärmabhängige Trassenpreissystem weiterentwickelt wird.

Auch im Flugverkehr ist der Fluglärm mittlerweile zum größten Akzeptanzproblem geworden. Über die Jahre konnten Verkehrsflugzeuge und ihre Triebwerke zwar erheblich leiser gemacht werden, aber diese technischen Fortschritte sind durch das massive Verkehrswachstum vielfach kompensiert worden. Fluglärm kann nur durch viele aufeinander abgestimmte Maßnahmen verringert werden: Leisere Verkehrsflugzeuge, lärmmindernde betriebliche Verfahren, bestmögliche Flächennutzung im Flughafenumfeld und bessere Berücksichtigung des Lärmschutzes bei der Festlegung von Flugrouten. Die Regelungen des Fluglärmschutzgesetzes sind bereits intensiv analysiert worden. Zurzeit stimmen wir innerhalb der Bundesregierung den Bericht an den Bundestag ab.



*Svenja Schulze
Bundesumweltministerin*

Bei allem ist es unverzichtbar, die Öffentlichkeit zu beteiligen. Die Menschen kennen die Lärmprobleme vor Ort ganz genau. Deshalb sieht die EU-Umgebungs-lärmrichtlinie auch eine Öffentlichkeitsbeteiligung vor, wenn ein Lärmaktionsplan erarbeitet wird.

Von Robert Koch stammt die Warnung: „Eines Tages wird der Mensch den Lärm ebenso unerbittlich bekämpfen müssen wie die Cholera und die Pest.“ Es ist daher höchste Zeit, die genannten Maßnahmen umzusetzen. Ich würde mich freuen, das Umweltproblem Lärm gemeinsam mit den Akustikerinnen und Akustikern zu bekämpfen.

Svenja Schulze
Bundesministerin für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Inhalt

Akustik Journal Nr. 03 / Oktober 2018

- **5 Aktuelles**
- **7 Fachartikel**
 - 7 **Zur Akustik von Weingläsern**
Marcus Mäder, Lennart Moheit, Lisa Kastenhuber, Steffen Marburg
 - 15 **Schallbasierte Messungen bei Tiefbohrungen**
Christoph Klieber, Thilo M. Brill
 - 28 **Dynamische Richtwirkung von Musikinstrumenten**
Malte Kob, David Ackermann, Stefan Weinzierl, Franz Zotter
 - 39 **Thesen zur Akustik anspruchsvoller Räume**
Helmut V. Fuchs
- **52 Veranstaltungen**
 - 52 **Veranstaltungshinweise**
 - 52 ALD-Veranstaltung „Lärmarme Innenstadt-Logistik“
 - 52 ALD-Veranstaltung „Freizeitlärm“
 - 53 DEGA-Akademie: Kurs „Grundlagen der Technischen Akustik“
 - 53 DEGA-Akademie: Kurs „Bauakustik – von den Grundlagen zur Anwendung“
 - 53 DEGA-Akademie: Kurs „DEGA-Schallschutzausweis“
 - 54 **Vorschau**
 - 54 DAGA 2019
 - 56 ICA 2019 / EAA Euroregion
 - 58 **Veranstaltungsrückblicke**
 - 58 3rd Polish-German Structured Conference on Acoustics
 - 58 DEGA Symposium: Interdisciplinary Topics in Acoustics: Physiology and Virtual Reality
 - 60 **Veranstaltungskalender**
- **60 Menschen**
- **61 DEGA**
 - 61 **Nachrichten und Mitteilungen aus der Fachgesellschaft**
 - 61 Wahlausschreibung: Neuwahl des Vizepräsidenten, des Schatzmeisters und des Vorstandes
 - 62 Neues Excel-Tool für DEGA-Schallschutzausweis
 - 62 Fachausschüsse / Fachgruppen
 - 65 Mitglieder / Fördermitglieder
- **66 Normen / Richtlinien**
 - 66 **Neue Regelwerke zu den Themen Akustik und Lärmminderung (Mai–Sept. 2018)**
- **68 Publikationen**
 - 68 **Zeitschriften, Tagungsbände, Empfehlungen und Memoranden, Broschüren etc.**
- **70 Impressum**

Aktuelles

Nachrichten aus der Akustik

■ Zuschüsse für Studierende zur DAGA 2019 (DEGA Student Grants)

Die DEGA vergibt auch im kommenden Jahr wieder „DEGA Student Grants“ zum Besuch der Tagung DAGA 2019 in Rostock, um jungen Akustikerinnen und Akustikern die Teilnahme zu erleichtern. Die Grants umfassen die freie Tagungsteilnahme, einen Reisekostenzuschuss von 250 € und eine einjährige DEGA-Mitgliedschaft. Studierende, die zur DAGA 2019 einen Vortrag oder ein Poster eingereicht haben, können sich bis **Donnerstag, den 15. November 2018** 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 Professors 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). Über die Vergabe entscheidet der Vorstand der DEGA.

Es können sich einerseits Studierende (Bachelor, Master, Diplom, Magister o. ä., keine Ph.D.) bewerben und andererseits Absolventen, bei denen die Abschlussurkunde nicht älter als ein halbes Jahr ist; d.h. nach dem 15.05.2018 ausgestellt wurde (Nachweis bitte beifügen). ■

■ Mitgliedschaft im NCAC

Das National Council of Acoustical Consultants (NCAC) mit Sitz in den USA stellt ein Netzwerk für beratende Ingenieure auf dem Gebiet der Akustik dar. Eine Mitgliedschaft ist auch für Beratungsstellen außerhalb der USA möglich; eine weltweite Übersicht über alle Mitglieder findet sich auf der Webseite <http://ncac.com/resources/directory/>. ■

■ DEGA-Akademie

Kurs „Grundlagen der Technischen Akustik“

06.–08. März 2019, Berlin

Kurs „Bauakustik – von den Grundlagen zur Anwendung“

01.–03. April 2019, Braunschweig

Kurs „DEGA-Schallschutzausweis“

10. April 2019, Aachen

Ausführliche Informationen zu den Kursen (Programm, Gebühren, Anmeldung) finden Sie auf der Seite [53](#) oder unter <https://www.dega-akustik.de/>. ■

■ Reisekostenzuschüsse „DEGA Young Scientist Grants“

Um jungen Akustiker(inne)n die aktive Teilnahme an internationalen Tagungen mit dem Schwerpunkt Akustik zu ermöglichen, vergibt die DEGA Reisekostenzuschüsse. Es können Reisen gefördert werden, in deren Rahmen die Antragstellerin / der Antragsteller einen Vortrag oder ein Poster mit Veröffentlichung präsentiert.

Ein Merkblatt mit sämtlichen Details und Anforderungen finden Sie hierzu unter <https://www.dega-akustik.de/preise-grants/ys-grants/>. ■



Spricht für sich.

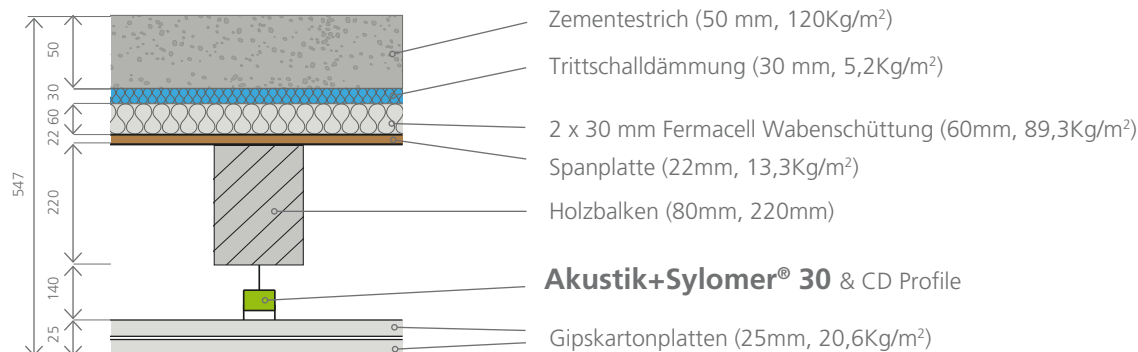
Knauf AMF – modulare Decken und [...mehr]

www.knaufamf.com

KNAUF

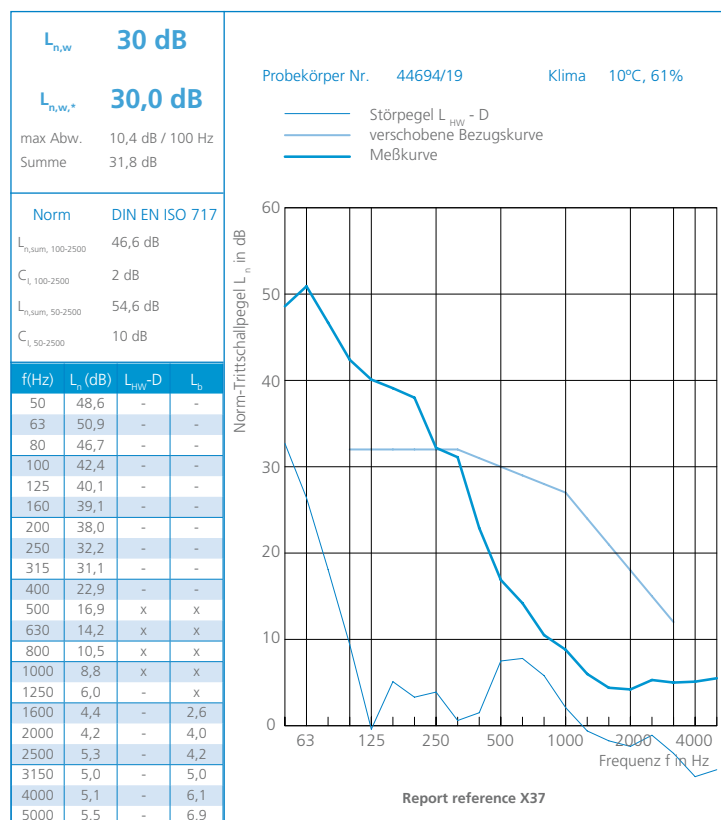
Neueste Forschungsergebnisse des ift Rosenheim zeigen die herausragenden Schallschutzwerte welche sich mit **AMC Akustik+Sylomer** Deckenabhängern erreichen lassen. Bei den Messungen wurde eine **Trittschalldämmung von 30dB** und eine **Luftschalldämmung von 82dB** erzielt – dies entspricht der obersten Qualitätsklasse

A* gemäß der DEGA-Empfehlung 103 (2018). Des Weiteren zeigt die Untersuchung den großen Vorsprung der **AMC Akustik+Sylomer** Abhänger im tieffrequenten Bereich, welcher bei der Trittschalldämmung zunehmend Beachtung findet. Die Ermittlung des $C_{L, 50-2500}$ ergab einen Spektrum-Anpassungswert von lediglich **10dB**.

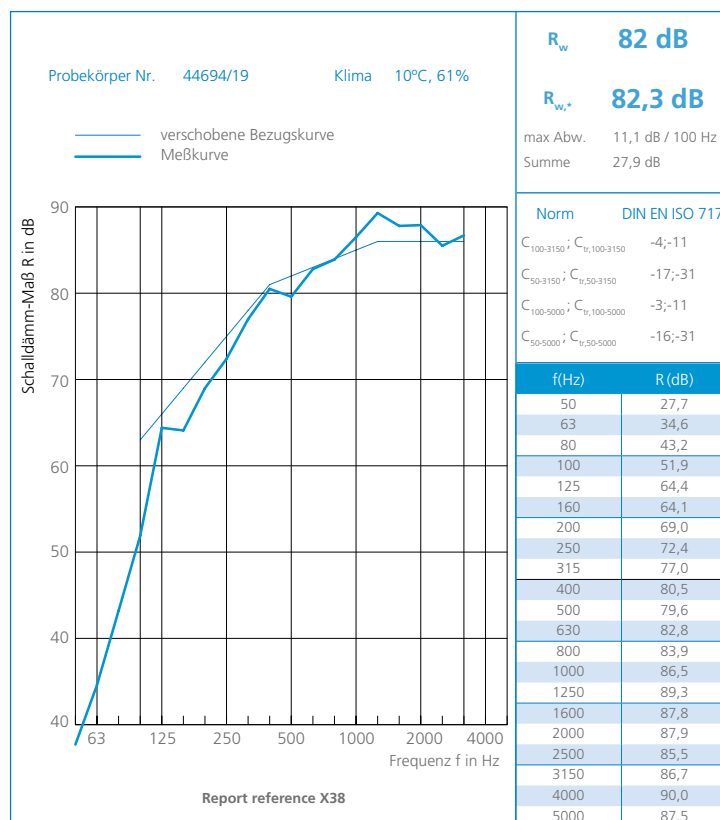


SCAN FÜR
VOLLSTÄNDIGEN
BERICHT

TRITTSCHALLDÄMMUNG



LUFTSCHALLDÄMMUNG



x <=> Wert korrigiert
99,9 <=> Korr.= +1,3 dB

High-Performance Schallschutzabhängiger für Decken und Wände von AMC-Mecanocaucho - sprechen Sie uns an, wir beraten Sie gerne.

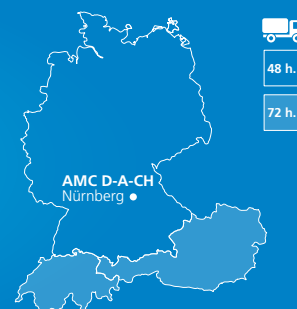


AMC D-A-CH

Vordere Sterngasse 2a
90402 Nürnberg
Deutschland
+49 911 48932443
akustik@amc-dach.de



www.akustik.com



Zur Akustik von Weingläsern

Mit Messungen und Simulationen dem Klang auf der Spur

Marcus Mäder, Lennart Moheit, Lisa Kastenhuber, Steffen Marburg

Im Rahmen des Physikprojektes Austrian Young Physicists' Tournament untersuchte die Schülerin Lisa Kastenhuber die Akustik von Weingläsern in Abhängigkeit von der Glasform und vom Füllstand des Fluids – hier Wasser oder Honig. Am Lehrstuhl für Akustik mobiler Systeme der TU München konnte sie einen Einblick in die Arbeit von Akustik-Ingenieurinnen und -Ingenieuren gewinnen und ihre akustischen Messungen durchführen. Mit einem Scanning-Laser-Doppler-Vibrometer machte sie die Schwingungen des Glases sichtbar, die für den Klang beim Anstoßen oder beim Fingerkreisen verantwortlich sind.

An der Materialforschungs- und -prüfanstalt der Bauhaus-Universität Weimar wurden optische Geometriescans durchgeführt und es entstanden hochpräzise Volumenmodelle der zuvor vermessenen Gläser, deren frequenzabhängige Schwingungsformen im Folgenden am Computer durch eine numerische Modalanalyse simuliert und visualisiert werden können. Es zeigte sich, dass neben den Materialkennwerten auch die nicht ganz perfekte Rotationssymmetrie eine entscheidende Rolle für den Klang des Glases spielt.

Um die aussagekräftigen Simulationsergebnisse auch ohne spezielle Software und Expertenwissen im Unterricht oder in der universitären Lehre einsetzen zu können, hat der Lehrstuhl für Akustik mobiler Systeme eine freie Browser-App entwickelt. Damit können Form und Füllstand des Glases variiert und dessen Eigenfrequenzen und Schwingungsformen simuliert und visualisiert werden.

Forschungsgegenstand Weinglas

Das Weinglas, das beim Höhepunkt der Arie durch die Stimme der Opernsängerin zerbricht oder mit dem Streichen der Fingerspitze über den Glasrand zu singen beginnt und die darin befindliche Flüssigkeit zur Ausprägung von Schwingungsmustern anregt – es ist ein wunderbares Anschauungsobjekt für Struktur- und Fluidschwingung in Wechselwirkung und oft schon Kindern und Jugendlichen ein bekanntes Phänomen der Physik. Das traf auch für Lisa Kastenhuber zu, eine Schülerin der 12. Klasse des Ignaz-Günther-Gymnasiums in Rosenheim, die im Rahmen des Austrian Young Physicists' Tournament genau diesem Phänomen auf den Grund gehen wollte und sich dafür an den Lehrstuhl für Akustik

On the acoustics of wine glasses

While participating in the Austrian Young Physicists' Tournament, Lisa Kastenhuber investigated the acoustics of wine glasses depending on the shape of the glass and on the volume of water or honey inside. At the Chair of Vibro-Acoustics of Vehicles and Machines at the TU Munich, the high school student could get an insight to the work of acousticians in engineering science and has been able to perform her measurements of the acoustics of the glass. Using a scanning laser Doppler vibrometer, she was able to visualize the vibrations of the glass, which are responsible for its sound due to clinking or sliding the finger tips. A geometric scan of the glasses was conducted in Weimar at the Bauhaus University and highly accurate volume models have been obtained. In the following, the frequencies of vibration and the corresponding deflection shapes of the virtual glasses are computed and visualized. It can be observed that, besides the material properties, the imperfectly symmetric shape of the glasses plays a major role for their sound.

Since the very descriptive visual results from numerical simulations often require software licenses or specific expertise, they seem not to be applicable in lectures at university or in school. For that purpose, the Chair of Vibro-Acoustics of Vehicles and Machines developed a free browser app, where the user can easily change the shape of the glass and the volume of the fluid inside, compute the natural frequencies, and visualize the shapes of vibration.

mobiler Systeme der TU München wandte.

Maßgeblich für den Klang eines Glases sind dessen Resonanzfrequenzen, in denen die Struktur mit nur wenig eingebrachter Energie sehr stark in Schwingungen versetzt werden kann. Trifft die Opernsängerin mit ihrer Stimme den richtigen Ton, wird das System aufgrund synchroner Wechselwirkung zwischen kinetischer und potenzieller Energie so angeregt, dass die gespeicherte Energie in beiden Formen wechselseitig zunimmt, bis eine Dämpfung erreicht ist, die eine weitere Zunahme begrenzt. Nimmt vorher die Schwingung soweit zu, dass die inneren Spannungen die inneren Gefügebindungen zerstören, kommt es zum Zerspringen. Die Eigenschaften der Schwingungen – deren Frequenzen und jeweili-

ge Dämpfung oder Abklingdauer – hängen von der Form und vom Material der Struktur ab.

Nahezu unabhängig davon, auf welchem Wege eine Anregung erfolgt, das Glas reagiert in erster Linie in seinen Resonanzfrequenzen, wohingegen alle anderen Frequenzanteile außerhalb der Resonanzen zu keiner signifikanten Schallabstrahlung beitragen. Das Glas kann außer über Luftschall auch mittels eines Kraftimpulses (z. B. durch Anstoßen mit einem anderen Glas) zu Schwingungen angeregt werden. Ein weiterer Weg: Kreist man mit einer Fingerspitze gleichmäßig über den feuchten Glasrand, kommt der sogenannte Stick-Slip-Effekt zum Tragen, bei dem sich das Haften und Gleiten des Fingers über den Glasrand abwechselt und so – bei passender Geschwindigkeit – zu einer harmonischen Anregung der Glasresonanzen führt. Eine derartige Schwingung, welche maßgeblich durch die Reibung zwischen Glas und Fingerspitze beeinflusst wird, nennt man selbsterregte Schwingung. Ähnliches Verhalten findet sich bei Kurvenfahrten von Straßenbahnen oder beim Streichen mit dem Bogen über die Saite einer Violine. Im hier behandelten Fall haben die Gläserresonanzen sehr kleine Amplituden – typischerweise zwischen 10^{-10} m und 10^{-8} m im hörbaren Frequenzbereich – und sind daher mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen. Versucht man, ein Weinglas durch Beschallung zu zerstören, können diese Schwingungen bis in den Millimeterbereich anwachsen. Nichtsdestotrotz kann das menschliche Auge Schwingfrequenzen ab ca. $f = 25$ Hz nicht mehr erfassen. Die Schwingungen lassen sich jedoch beispielsweise mit einem Stroboskop sichtbar machen, indem Lichtblitze in einer Frequenz nahe der Resonanzfrequenz des Glases abgegeben werden, so dass sich die schnellen Bewegungen zu diskreten Standbildern reduzieren. Das menschliche Auge verknüpft dann diese diskreten Bilder zu einer kontinuierlichen und sichtbaren Schwingungsform. Die dann sichtbare Schwingfrequenz ergibt sich aus dem leichten Unterschied zwischen Schwingfrequenz des Glases und Blitzfrequenz des Stroboskops. Stimmen beide Frequenzen exakt überein, ergibt sich deren Differenz zu Null und es entsteht ein scheinbar statisches Verformungsbild. Weiterhin lassen sich die Glasschwingungen durch Frequenzverschiebung des Laserlichts mittels des Doppler-Effektes bestimmen oder am Computer simulieren. Beide Verfahren werden in diesem Artikel vorgestellt und miteinander verglichen. Die Untersuchungen erfolgten an drei Gläsern, die in Abbildung 1 zu sehen sind. Die Größe der Gläser betrug in der Höhe ca. 220 mm und in dem Durchmesser zwischen 60 mm und 100 mm. Da sich die nachfolgenden Erkenntnisse für alle drei Probekörper ähneln, wird im Weiteren exemplarisch nur das Glas 2 betrachtet.

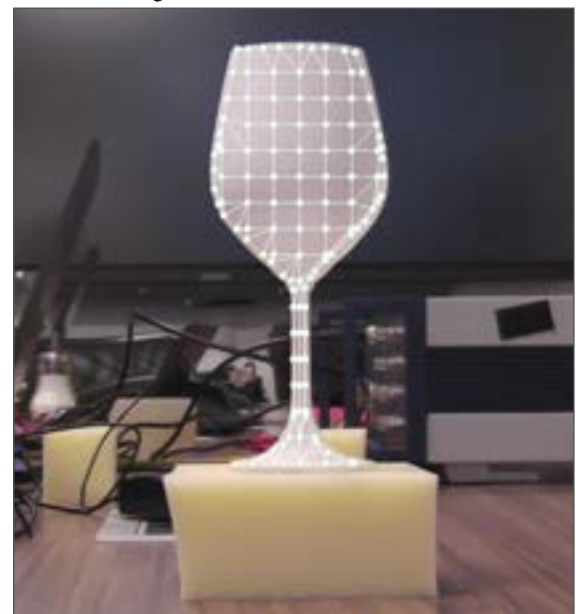


Abb. 1: Die drei Gläser als Probekörper
von links: Glas 1, Glas 2 und Glas 3

Experimentelle Untersuchung

Weingläser sind aus strukturdynamischer Sicht dünnwandige, schwach gedämpfte Systeme und reagieren damit ausgesprochen sensitiv auf äußere Einflüsse, wie beispielsweise den Füllstand oder den Punkt, an dem das Glas gehalten wird. So ist es nicht verwunderlich, dass das Glas anders klingt, wenn man es am Stiel oder am Glasrand hält und dadurch jeweils unterschiedliche Schwingungsformen mit ihren unterschiedlichen Frequenzen mit den Fingern dämpft, womit sich die spektrale Zusammensetzung des abgestrahlten Schalls verändert. Um sich dem Phänomen der schwingenden Weingläser zu nähern, sollte eine Messung der Strukturdynamik daher unbedingt berührungslos erfolgen. Berührungslos erfolgte auch die Anregung der Schwingungen, und zwar mithilfe eines Lautsprechers, welcher ein weißes Rauschen bis zu einer Frequenz von 6 kHz abstrahlte. In die-

Abb. 2: Scangitter auf Glas 2 für Laser-Doppler-Vibrometer-Messung



sem Rauschsignal sind – bei entsprechender Güte des Lautsprechers – über den gesamten Frequenzbereich alle Spektralanteile mit konstanter Leistung vertreten. Es ist zu erwarten, dass das Weinglas von dem Rauschsignal infolge der Resonanzen insbesondere zu den Schwingungen stark angeregt wird, die den Klang des Glases bestimmen. Um den Einfluss der Lagerung zu minimieren und im Hinblick auf die Vergleichbarkeit zu einer anschließenden numerischen Untersuchung, wurden die Gläser auf Schaumstoff gestellt.

Die Strukturschwingungen des Weinglases erfasst das am Lehrstuhl vorhandene Laser-Doppler-Vibrometer PSV500-3D der Firma Polytec. Es misst die Geschwindigkeiten der schwingenden Strukturoberfläche über die Frequenzverschiebung des Laserlichts mittels des Doppler-Effektes [1]. Abbildung 2 verdeutlicht den Messaufbau und zeigt das abgetastete Messgitter. Aus den Geschwindigkeitsdaten an allen gemessenen Punkten wurden anschließend Summenspektren gebildet, die beispielhaft für das zweite Glas in Abbildung 3 zu sehen sind.

Es ist zu erkennen, dass sich der Einfluss des Füllstandes auf alle Resonanzen des Weinglases auswirkt – allerdings unterschiedlich: Resonanzen werden bei niedrigen Frequenzen weniger beeinflusst als bei höheren.

Die Resonanzfrequenz der ersten elastischen Schwingungsform des Glaskörpers ist für seinen typischen Klang maßgeblich verantwortlich. Betrachtet man diesen Frequenzbereich etwas genauer, wie in Abbildung 4, erkennt man zwei eng beieinander liegende Resonanzspitzen im Frequenzspektrum.

Aus der Theorie zur elastischen Verformung rota-

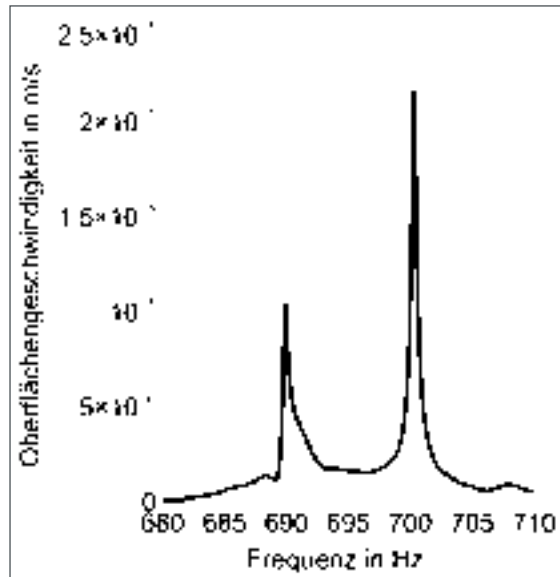
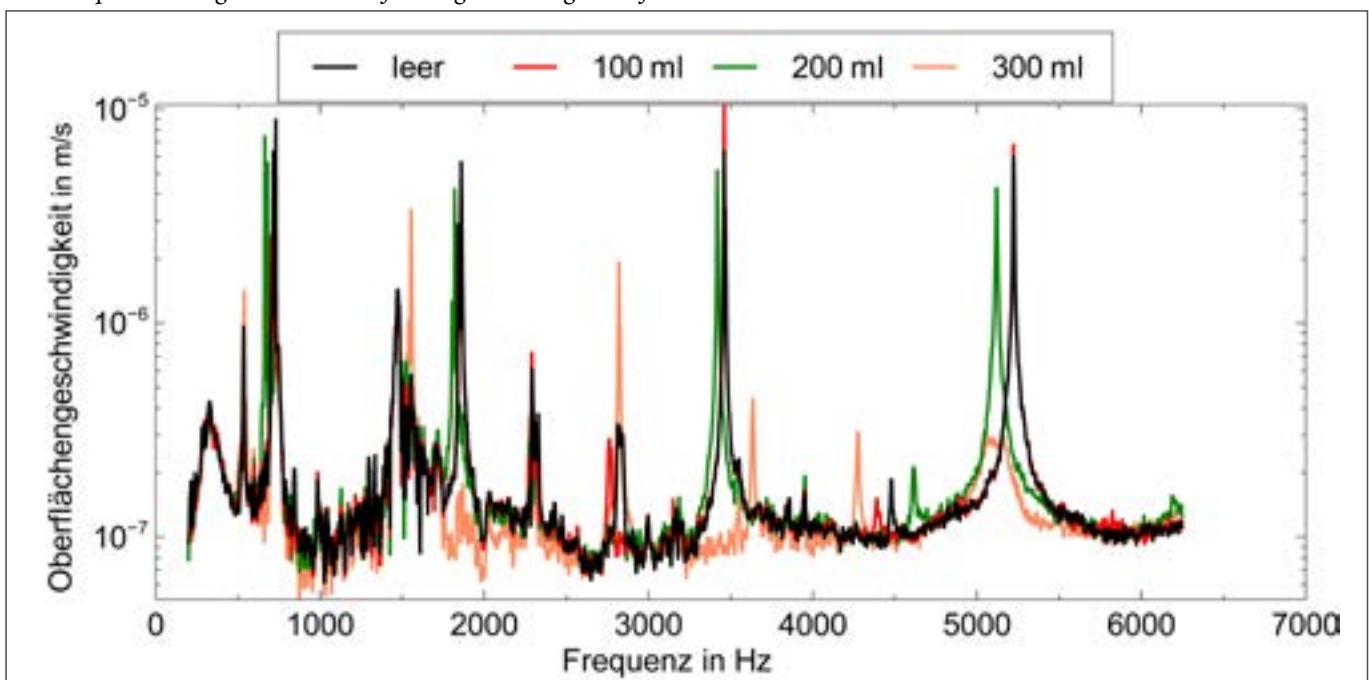


Abb. 4: Resonanztrennung infolge gegebener Asymmetrien

tionssymmetrischer Bauteile ist bekannt, dass bei perfekter Symmetrie zwei zueinander um 90 Grad rotierte Schwingungsformen dieselbe Frequenz einnehmen [2,3,4]. Diese werden auch doppelte Moden genannt. In der Realität ist diese perfekte Symmetrie praktisch ausgeschlossen, weshalb sich die Resonanzfrequenzen der paarweise auftretenden symmetrischen Moden trennen. Dabei ist die Resonanz einer Mode zu höheren Frequenzen und die der anderen zu niedrigeren Frequenzen verschoben. Wird das Glas beim Anstoßen in Schwingungen versetzt, erklingen beide Moden einer Schwingungsform in ihren jeweiligen Resonanzfrequenzen

Abb. 3: Spektren der gemittelten Oberflächengeschwindigkeiten für Glas 2



gleichzeitig, d. h. im vorliegenden Beispiel bei etwa 690 Hz und 700 Hz. Durch die eng beieinander liegenden Frequenzen kommt es zu einer Interaktion der beiden abgestrahlten Schalldruck-Sinuswellen. Sie überlagern sich und bilden eine amplitudenmodulierte Schwingung, welche auch als Schwebung bekannt ist. Die oben beschriebene Möglichkeit zur Visualisierung der Schwingungen mit einem Stroboskop bedient sich dieses Effekts. Solange der Frequenzunterschied weniger als 20 Hz beträgt, ist das menschliche Gehör in der Lage, diese Schwebung zu erkennen, welche den Klangcharakter des Weinglases mitbestimmt. Im vorliegenden Fall erwartet man folglich eine Schwebung mit einer Modulationsfrequenz von ca. $f_m = 10$ Hz.

Mit der berührungslosen Messung können folglich die Resonanzfrequenzen der Gläser ermittelt werden, die zusammen deren Klang bestimmen. Doch wie ändert sich der Klangcharakter des Weinglases, wenn Flüssigkeit hineingefüllt wird? Um sich der Antwort auf diese Frage zu nähern, kann man die relative Änderung der paarweise auftretenden Resonanzfrequenzen über den Füllstand betrachten.

Abbildung 5 verdeutlicht diesen Zusammenhang für das erste elastische Verformungsmodenpaar des Glaskörpers. Als Bezugswert zur Bestimmung der relativen Abweichungen wurde der Mittelwert der beiden paarweise auftretenden Resonanzfrequenzen des leeren Glases gewählt.

Es zeigt sich, dass mit steigendem Füllstand die Resonanzfrequenzen sinken. Die zugeführte Flüssigkeit besitzt folglich einen höheren Masseffekt als einen Steifigkeitseffekt in Bezug auf das Schwingungsverhalten des Gesamtsystems.

Weitere Versuche mit Honig im Glas zeigten, dass auch dieser einen ähnlich massedominierten Effekt auf die Strukturschwingung hat. Erwartungsgemäß konnte eine weitaus höhere Dämpfung beobachtet werden, was sich durch den nicht-newtonschen Flüssigkeitscharakter des Honigs erklären lässt.

Simulationen

Neben den Experimenten helfen computergestützte Simulationen der Strukturmechanik, das Schwingungsverhalten des Glases anhand eines virtuellen Modells abzuschätzen, bevor das eigentliche Objekt tatsächlich hergestellt wird. Im Bereich des Ingenieurwesens sind numerische Simulationen mittlerweile Stand der Technik. Nichtsdestotrotz sind mit der Modellbildung gewisse Unsicherheiten verbunden, etwa bedingt durch vereinfachende Modellannahmen, Randbedingungen, Lösungsverfahren und Werkstoffkennwerte. Die simulierten Ergebnisse bedürfen immer einer fachlichen Interpretation, und das gewählte Simulationsmodell sollte anhand von

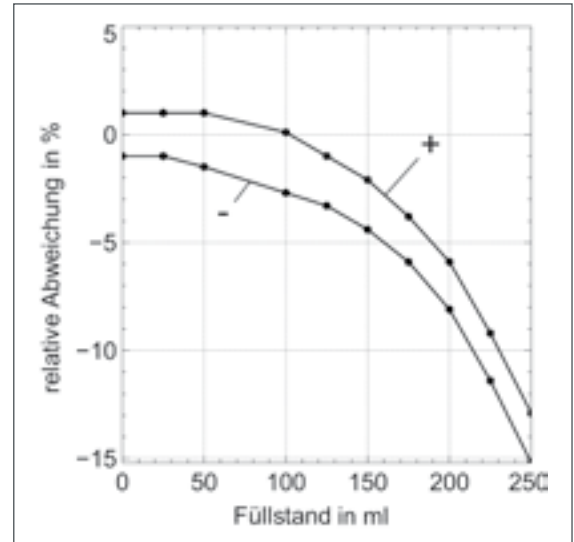


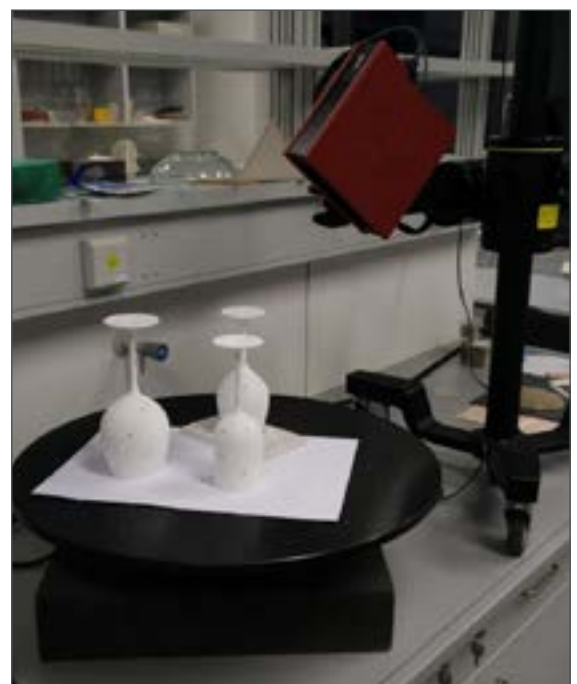
Abb. 5: Relative Abweichung der beiden ersten Resonanzfrequenzen zu deren Mittelwert im leeren Glas bei steigendem Füllstand;

- erste Resonanz, + zweite Resonanz

Experimenten validiert sein, um den Vertrauensbereich des Modells besser einschätzen zu können.

Um die Simulation der Weingläser mit möglichst hoher Genauigkeit durchführen zu können, bedarf es der Kenntnis über deren exakte Geometrie. Zu diesem Zweck gingen die Gläser per Post nach Weimar zur Materialforschungs- und -prüfanstalt der Bauhaus-Universität Weimar. Dort konnten mittels optischer Messverfahren die Gläser geometrisch gescannt werden, um präzise 3D-Volumenmodelle für computergestützte Simulationen zu erzeugen. Dazu

Abb. 6: Geometriescan; Foto: Heiko Beinersdorf, MFPA Weimar



wurden die Gläser für die optische Messung mit einem Reflexionsspray oberflächendeckend besprüht und mit Referenzpunkten zum Abgleich mit der Messung beklebt, siehe Abbildung 6.

Das Ergebnis des Scans ist ein hochaufgelöstes Oberflächen-Polygonnetz (Dreiecksnetz) des Glases mit einer geschätzten Scangenaugigkeit im Bereich von $10\text{ }\mu\text{m}$ – $30\text{ }\mu\text{m}$. Die Detailtreue des Modells ist abhängig von der Scangenaugigkeit und der aufgetragenen zusätzlichen Farbschicht. Zusätzlich konnte die Masse der Gläser mithilfe einer Präzisionswaage hochgenau ermittelt werden. Aus diesen Daten, d.h. dem Volumen aus dem 3D-Scan und der gewogenen Masse, konnte die jeweilige Dichte bis auf drei Nachkommastellen genau berechnet werden. Für das oben aufgeführte Glas 2 ergab sich eine Dichte von $\rho = 2,556\text{ g/cm}^3$.

Am Lehrstuhl für Akustik mobiler Systeme existiert eine langjährige Erfahrung im Bereich der Finite-Elemente-Methode (FEM), welche hier verwendet wird [5]. Hierfür stand ABAQUS als bekanntes Berechnungstool zur Verfügung, um das Schwingungsverhalten der Struktur, d.h. die Verschiebung der einzelnen Elementknoten zu simulieren. Aus einem diskreten, mathematischen Modell des Glases lassen sich über die sogenannte Modalanalyse

dessen Eigenschwingungsformen und Eigenfrequenzen ermitteln. Diese entstammen der Lösung einer mathematischen Formulierung zur Beschreibung des physikalischen Problems auf Basis des virtuellen Modells. In der Analyse der Systemdynamik geht man davon aus, dass das Gesamtschwingungsverhalten des Systems aus einer Überlagerung aller theoretisch möglichen Schwingungsformen rekonstruierbar ist, wobei die jeweiligen Moden die Form der Glasschwingung in den Resonanzen dominieren. Dadurch ist es möglich, die Eigenfrequenzen der Simulation mit den Resonanzfrequenzen der Messung direkt zu vergleichen.

Mithilfe eines eigens entwickelten gradientenbasierten Optimierungsverfahrens wurden die Materialparameter so lange verfeinert, bis die erste Resonanzfrequenz des Glaskörpers mit der entsprechenden Eigenfrequenz aus der Simulation übereinstimmte [6,7]. Auf diese Weise ist es möglich, die Werkstoffparameter des zugrundeliegenden Materialmodells (E-Modul und Querkontraktionszahl des Hooke'schen Materials) zu ermitteln [8]. Am Ende der Optimierung konnten die entsprechenden Werte für den E-Modul zu $E = 68,29\text{ GPa}$ und die Querkontraktion zu $\nu = 0,22$ bestimmt werden, welche mit Angaben aus der Literatur übereinstimmen [9].



Make better spaces

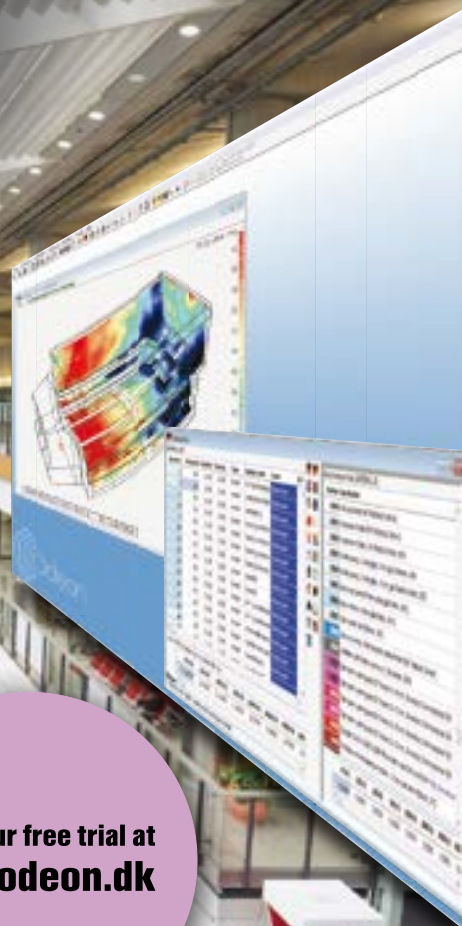
with the complete software solution for room acoustics

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



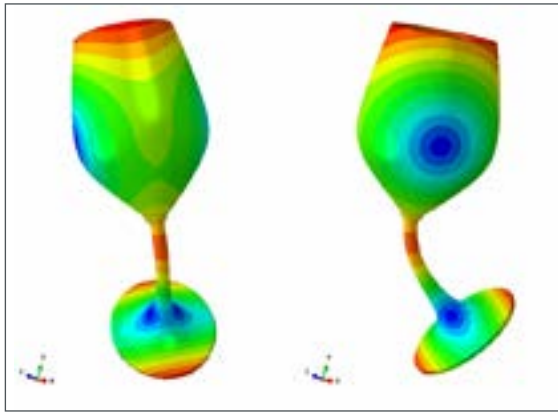


Abb. 7: Erste elastische Verformung, Gesamtglas
rot: starke Verformung; blau: geringe/keine Verformung

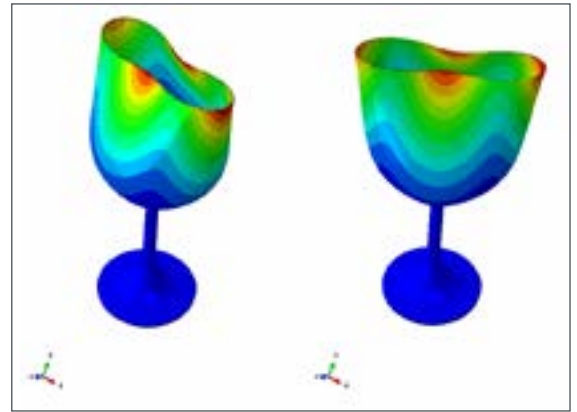


Abb. 8: Erste elastische Verformung, Glaskörper

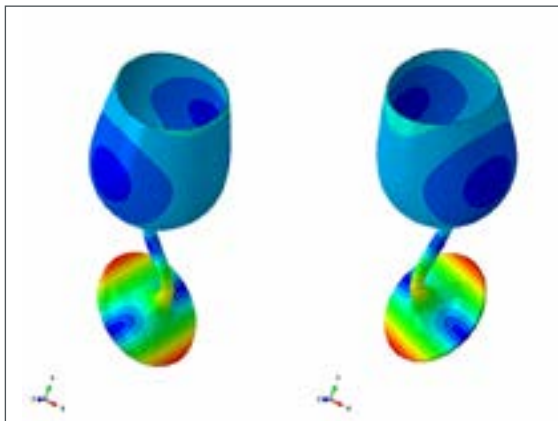


Abb. 9: Zweite elastische Verformung, Gesamtglas

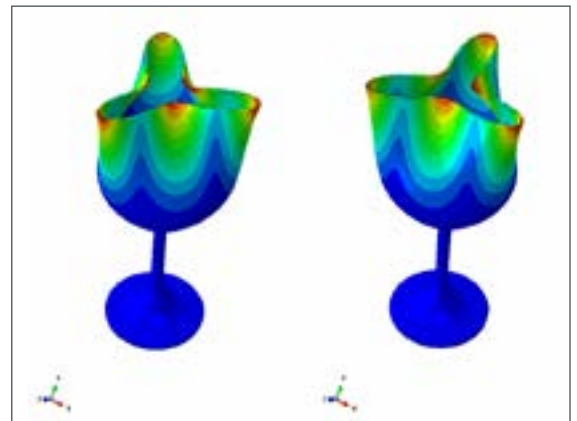


Abb. 10: Zweite elastische Verformung, Glaskörper

Die resultierende Abweichung zur ersten und zweiten Resonanz beträgt $\Delta f_1 = 0,008 \%$ bzw. $\Delta f_2 = 0,565 \%$, wobei die jeweiligen Resonanzfrequenzen aus den Messungen zugrunde gelegt werden. Für die höheren Resonanzen liegt die Modellgüte in einem Genauigkeitsbereich von $\pm 5 \%$. Mit dem angepassten Modell kann das Schwingungssystem weiter untersucht werden. Im ersten Schritt empfiehlt es sich, seine Eigenschwingungsformen zu betrachten, um ein Gefühl für die Strukturmechanik des Weinglases zu erlangen.

Die Abbildungen 7 bis 10 stellen die möglichen elastischen Verformungen des virtuellen Weinglases dar, die mit der zugehörigen Eigenfrequenz in Resonanz schwingen. Bei den dargestellten Schwingungsformen handelt es sich um stark überzeichnete Relativbewegungen der Struktur. Die Farbe Rot steht für eine starke Verformung, wohingegen blaue Bereiche Schwingungsknoten, also Bereiche ohne Bewegung, kennzeichnen.

Zu erkennen sind Muster, bei denen sich entweder der Fuß und der obere Glaskörper gegeneinander verschieben oder bei denen sich lediglich der obere Glasrand verformt. Je höher die Eigenfrequenz, desto komplexer sind die zu beobachtenden Schwingungsformen, wobei in erster Linie die erste elastische Verformung des oberen Glaskörpers (Abbildung 8) für

den dominanten Klang des Glases beim Anstoßen verantwortlich ist, da diese Schwingungsform sehr schwach von der Struktur gedämpft wird.

Im Weiteren wird auf die Asymmetrie des Weinglases eingegangen, welche für die Aufspaltung der doppelten Moden verantwortlich ist. Aus dem Experiment hat sich ein Frequenzunterschied des Modenpaares der ersten elastischen Verformung des Glaskörpers von $f_m = 10 \text{ Hz}$ ergeben. Aus mechanischer Sicht ist diese Differenz bereits signifikant und spricht für eine Asymmetrie in der Form des Glases, die man auf den ersten Blick nicht annehmen würde. Hier lohnt sich der Blick auf den sogenannten Trägheitstensor des Glases, der beschreibt, wie träge der Körper gegen Verdrehungen um die x -, y - und z -Achse reagiert [8].

Für einen ideal rotationssymmetrischen Körper (um die z -Achse) ist zu erwarten, dass er gegen Verdrehungen um die x - und um die y -Achse gleichermaßen träge reagiert. Aus dem Simulationsprogramm ABAQUS lässt sich der Trägheitstensor der folgenden Form extrahieren:

$$J = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix},$$

wobei die Einträge die folgenden Trägheitsterme $J_x = 6,555 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$, $J_y = 6,541 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$ und $J_z = 1 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$ haben.

Der Vergleich zwischen den Werten J_x und J_y offenbart eine Asymmetrie des Glases in Folge einer Fertigungsungenauigkeit, welche in Abbildung 11 vergrößert dargestellt ist. Die verbleibenden Ungenauigkeiten zwischen den Eigenfrequenzen des Simulationsmodells und den gemessenen Resonanzfrequenzen sind beispielsweise in der Annahme linearelastischen Materialverhaltens begründet. Weiterhin geht die Simulation von einer homogenen Materialverteilung innerhalb des Gesamtvolumens aus. Um diese Unsicherheiten weiter zu ergründen, ließe sich der gesamte Produktionsprozess von der Schmelze über das Bilden eines Vorformlings, die Formgebung im Werkzeug und das anschließende Abkühlen bis zur thermischen Nachbehandlung zum inneren Spannungsabbau nachbilden.

Der dargestellte Versuch zeigt die Stärken, aber auch die Herausforderungen bei der Modellbildung und computergestützten Simulation. Für Ingenieurinnen und Ingenieure sind beide in den unterschiedlichsten Bereichen wesentliche Hilfsmittel, die aber die Reflexion und die Überprüfung der Ergebnisse durch die Fachfrau/den Fachmann nicht überflüssig machen.

Die Weinglas-App

Mit der Weinglas-App des Lehrstuhls für Akustik mobiler Systeme schließt sich ein Kreis: Mit ihrer Idee, für ihr Projekt im Physikunterricht in der Schule die Akustik von Weingläsern zu erforschen, gewann Lisa Kastenhuber einen Einblick in die Arbeitswelt von Akustik-Ingenieurinnen und -Ingenieuren an der TU München. Sie half bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen und ermittelte die akustischen Eigenschaften der Gläser. Am Lehrstuhl konnten die Messergebnisse mit FEM-Computersimulationen auf Basis der präzisen 3D-Daten ausgewertet werden. Die App bringt diese Erfahrungen nun wieder zurück in den Unterricht und macht die Simulationstools der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler für Schülerinnen und Schüler zugänglich. Im Webbrowser auf dem PC, Tablet oder Smartphone kann die Anwendung in der App-Bibliothek des Lehrstuhls für Akustik mobiler Systeme genutzt werden.

Mit den Fingern auf dem Touchpad können die Schülerinnen und Schüler das virtuelle Glas drehen und wenden und mit Schiebereglern dessen Form und Füllstand variieren. Mit einem Klick werden die Eigenfrequenzen und -schwingungsformen der Struktur und des Fluids darin (online) simuliert und die Amplituden farbig dargestellt oder als Video animiert. Die Glasschwingung, die sonst bisher nur hörbar schien, wird auf diese Weise sichtbar gemacht.

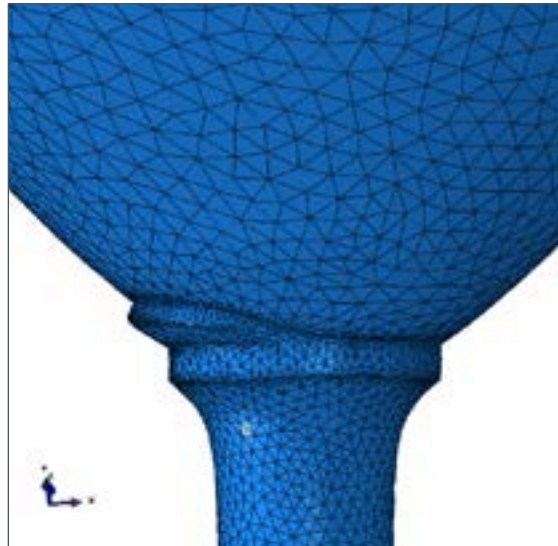


Abb. 11: Asymmetrie bei einem Weinglas (stark hervorgehoben)

Das eröffnet neue Möglichkeiten für Schülerinnen und Schüler, physikalische Effekte zu untersuchen und nachzuvollziehen, die bisher im klassischen Physikunterricht oder in der Lehre der Akustik aufgrund aufwändiger oder teurer Messaufbauten so nicht untersucht werden konnten. Vom Einsatz digitaler Medien erhoffen sich die Autoren zudem, den Schülerinnen und Schülern die Angst vor der vermeintlich zu abstrakten Physik zu nehmen und Begeisterung für das Fachgebiet Akustik und Schwingungen zu erzeugen.

Da die Berechnungen im Hintergrund auf einem Server laufen, lässt sich die App auch ideal von unterwegs steuern. Die Simulationssoftware COMSOL Multiphysics stellt diese Technik bereit.

Abbildung 12 (siehe folgende Seite) zeigt eine entsprechende Simulation, bei der das Weinglas zum großen Teil gefüllt ist und, zum Zweck der Visualisierung der Druckverteilung innerhalb der Flüssigkeit, geteilt ist.

Zugang zur App-Bibliothek

www.apps.vib.mw.tum.de

Nach Bestätigung der akademischen Nutzung ist der Login mit einem Gastaccount nötig.

Kontakt unter apps@vib.mw.tum.de

Danksagung

Wir danken Herrn Heiko Beinersdorf von der Materialforschungs- und -prüfanstalt der Bauhaus-Universität Weimar für die sehr genaue Vermessung der Gläser.

Literatur

[1] Ewins, D. J.: Modal testing: theory, practice, and application. Research Studies Press. 2000.

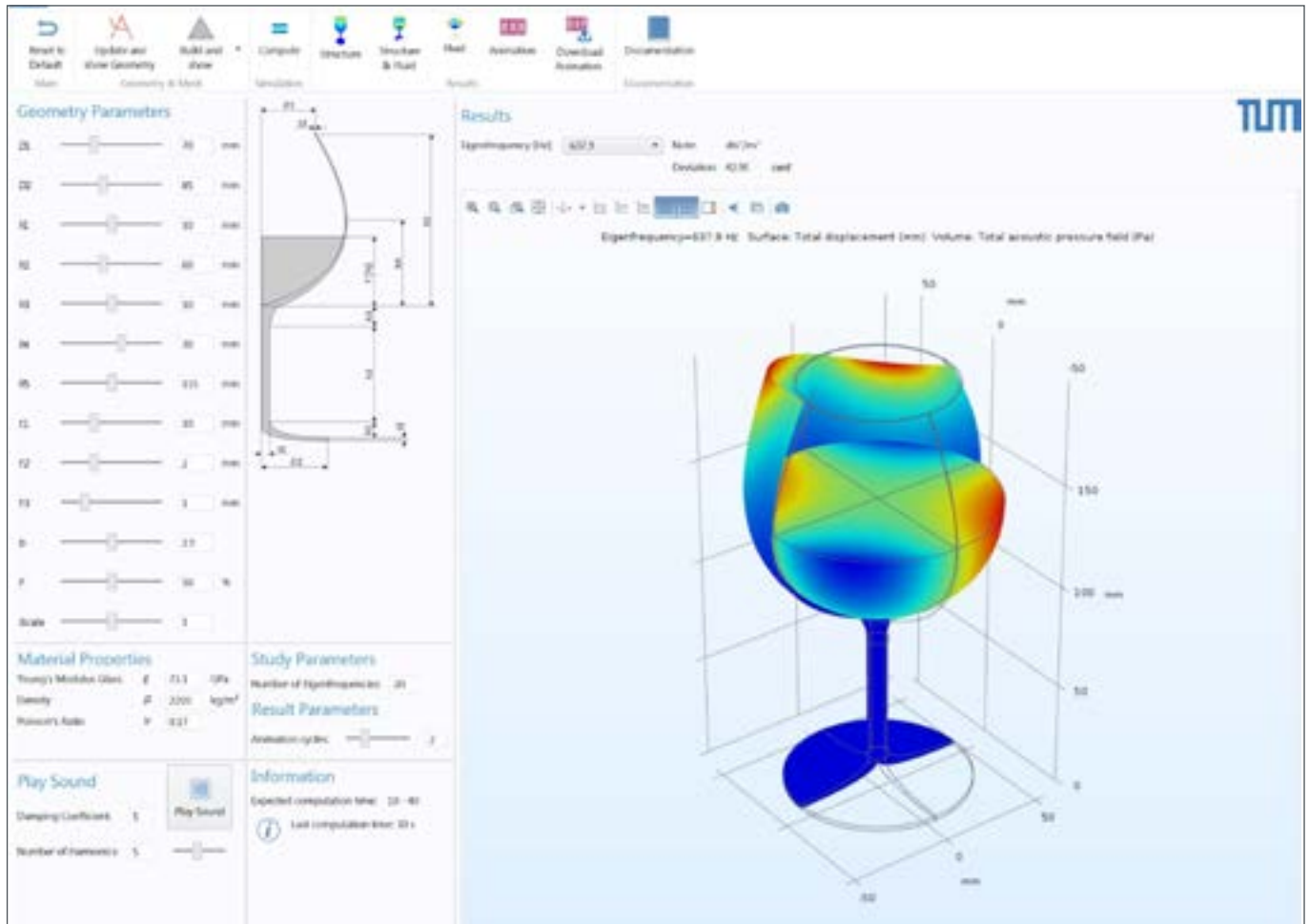


Abb. 12: Weinglas-App

**Dipl.-Ing.
Marcus Mäder**
TU München,
Lehrstuhl für Akustik
mobiler Systeme

**Lennart Moheit,
M. Sc.**
TU München,
Lehrstuhl für Akustik
mobiler Systeme

Lisa Kastenhuber
Schülerin des Ignaz-
Günther-Gymnasi-
ums, Rosenheim

**Prof. Dr.-Ing.
Steffen Marburg**
TU München,
Lehrstuhl für Akustik
mobiler Systeme

- [2] Dietzsch, F.; Hervella-Nieto, L.; Marburg, S.; Rodriguez, R. & Weisbecker, H.: Physical and spurious modes in mixed finite element formulation for the Galbrun equation. Acta Acustica united with Acustica, 3(100), 2014.
- [3] Fleischer, H.: Spinning Modes. Univ. der Bundeswehr München. 1994.
- [4] Fleischer, H.: Schwingung und Schall von Glocken. Fortschritte der Akustik – DAGA 2000, 26. Jahrestagung für Akustik, Oldenburg, S. 38–47.
- [5] Zienkiewicz, O. C. & Taylor, R. L.: The finite element method for solid and structural mechanics. Elsevier. 2005.
- [6] Marburg, S.: Developments in structural-acoustic optimization for passive noise control. Archives of computational methods in engineering, 4(9), S. 291–370, 2002.
- [7] Marburg, S.; Sheperd, M. & Hambric, S. A.: Structural–Acoustic Optimization. In S. A. Hambric, S. H. Sung & D. J. Nefske: Engineering Vibroacoustic Analysis: Methods and Applications, 1, S. 528. John Wiley & Sons, Ltd. 2016.
- [8] Dankert, J. & Dankert, H.: Technische Mechanik: Statik, Festigkeitslehre, Kinematik/Kine-

tik. Springer. 2013.

- [9] Roos, E. & Maile, K.: Werkstoffkunde für Ingenieure, Grundlagen Anwendung, Prüfungen, Zweite neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg. 2005 ■

Schallbasierte Messungen bei Tiefbohrungen

Bestimmung elastischer und struktureller Materialeigenschaften von Gesteinen

Christoph Klieber, Thilo M. Brill

Bei Tiefenbohrungen der Öl- und Gasexploration werden Messsonden in das Bohrloch eingeführt, um in-situ Gesteinseigenschaften zu bestimmen und potentiell kohlenwasserstoffführende Reservoirs zu erkunden. Diese geophysikalischen Bohrlochmessungen umfassen unter anderem elektromagnetische und kernphysikalische Messungen, sowie auch Schallmessungen. Die akustischen Verfahren verwenden Wellenlängen von circa 1 cm bis 10 cm, um eine ausreichende räumliche Auflösung des bohrlochnahen Bereichs zu erzielen. Viele Gesteinsformationen weisen Heterogenität auf, welche von Spannungskonzentrationen, mechanischen Schäden oder eindringender Bohrspülung herrühren. Die in den letzten Jahren erzielten Fortschritte der Messtechniken ermöglichen die Charakterisierung elastischer und struktureller Gesteinseigenschaften und erlauben auf diese Weise eine optimierte Bohrung. Dispersionsrelation und dynamisch-elastische Eigenschaften des Gesteins werden mittels Laufzeitmessungen von Kompressions-, Scher- und Stoneleywellen bestimmt. Solche zerstörungsfreien Messungen müssen unter harschen Bedingungen ausgeführt werden: Sensortechnik und Elektronik müssen bei Drucken über 1.400 bar, Temperaturen über 175°C und Schockniveaus über dem 100-fachen der Erdbeschleunigung operieren.

Einleitung

Schallwellen sind allgegenwärtig: Straßenverkehr, Telefonklingeln, Flugzeugansprachen oder lachende Menschen. Das Verständnis des Informationsgehalts dieser Schallwellen gelingt dem Menschen meist unterbewusst. Für die meisten von uns ist dieses Verstehen viel wichtiger als die Erkenntnis, was Schallwellen wirklich sind und wie sie sich ausbreiten.

Geologen und Geophysiker analysieren die Schallausbreitung von Untergrundwellen, um elastische und strukturelle Eigenschaften des Gesteins zu bestimmen; hierfür ist ein grundlegendes Verständnis dieser Schallausbreitung und deren Abhängigkeit von Eigenschaften des Gesteins notwendig. In diesem Artikel geben die Autoren einen Überblick über Schallquellen und Empfänger und die Schallwellenausbreitung in der Umgebung einer Tiefbohrung. Diese Messungen finden typischerweise im Kilohertzbereich statt.

Sonic Logging: Determination of elastic and structural properties of rocks

During the drilling process of deep underground oil and gas wells, measurement tools are lowered into the borehole to determine rock formation properties and explore potential hydrocarbon bearing zones in-situ. These geophysical borehole characterizations include not only electromagnetic and nuclear techniques but also acoustic measurements. Typical wavelengths of these acoustic techniques are in the range of 1 cm to 10 cm in order to have sufficient spatial resolution of the space near the borehole. Rock formations often exhibit heterogeneities which may originate from geological stresses, mechanical damages or invading drilling fluids. Advances of measurement techniques in recent years improved the characterization of elastic and structural properties of the rock formations surrounding the borehole and allow for drilling optimization. Dispersion relations and dynamic-elastic rock properties are determined through transit time measurements of compressional, shear and Stoneley waves. These non-destructive measurements must be carried out in harsh environments such as pressures above 1400 bar, temperatures above 175°C and shock levels with accelerations over 100 g which impose highly selective requirements on sensors and electronics.

Die charakteristischen Frequenzen und Wellenlängen dieser Anwendung unterscheiden sich damit um mehr als drei Größenordnungen von den langreichweitigen Analysen der niederfrequenten Seismologie. Des Weiteren wird besprochen, wie sich Veränderungen von Gesteinseigenschaften auf akustische Wellen und somit auf das Messergebnis auswirken.

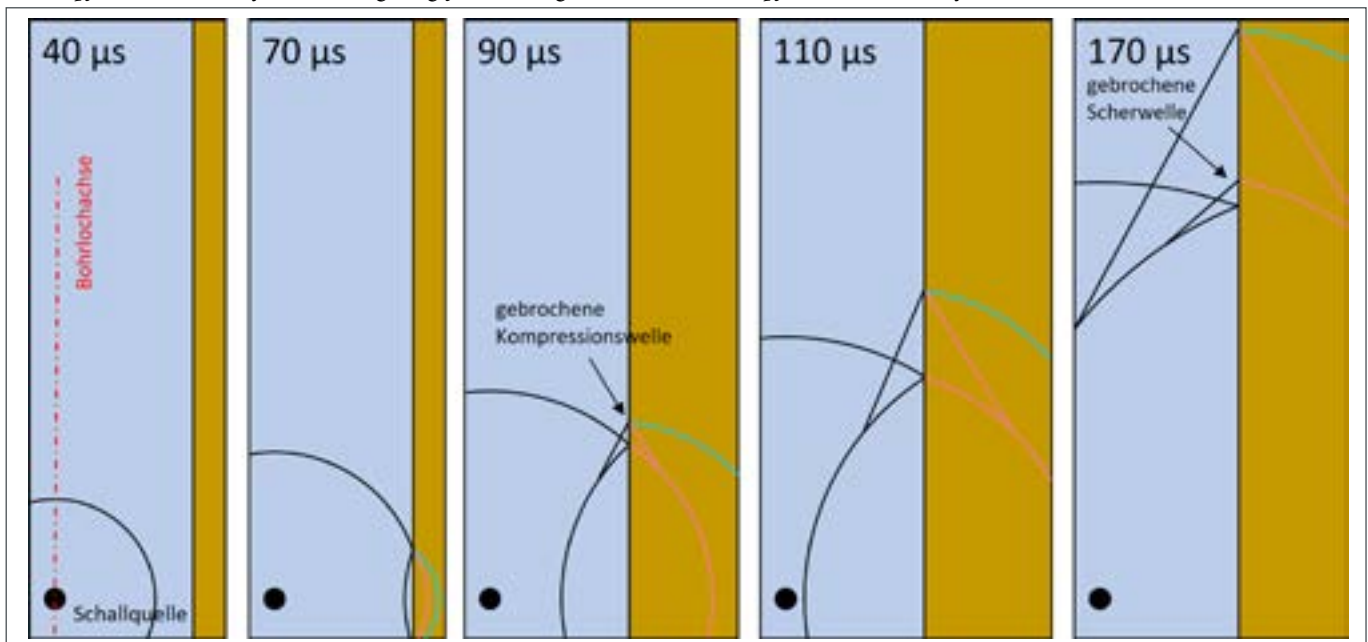
Bei der Öl- und Gasexploration [1] werden zum Studium des Untergrundes Messsonden in das Bohrloch eingeführt. Dies kann sowohl während als auch nach der Bohrlocherstellung geschehen. Auf diese Art und Weise können die unterschiedlichsten Messungen erfolgen, um die unterirdischen Kohlenwasserstoff-Reservoirs zu lokalisieren, quantifizieren und deren Produktion zu optimieren [2]. Die technischen Anforderungen an die Messsonden sind dabei ungewöhnlich. Sie müssen anspruchsvolle Messungen unter extremen Randbedingungen von Druck, Tem-

peratur, Schockniveau und in korrosiven Substanzen ermöglichen [3] [4]. Diese extremen Randbedingungen kommen dadurch zustande, dass die Messinstrumente direkt in das Bohrgestänge integriert sind und sich oft nur wenige Meter über dem Bohrkopf befinden. Diese Position für die Messsonden wird gewählt, um möglichst zeitnah (nachdem in eine gegebene Tiefe gebohrt wurde) Messungen auszuführen und möglicherweise die Bohrung (z. B. deren Richtung) rechtzeitig anzupassen und zu optimieren. Bei Bohrtiefen von mehreren Kilometern kann sich, je nach geographischer Region, die Erdkruste lokal bereits auf über 175°C aufgeheizt haben, während lokale Druckzonen für Drücke von 1.400 bar und mehr sorgen können. Des Weiteren sitzt bei traditionellen Bohrungen der Antrieb an der Erdoberfläche und treibt über einen Rotationstisch das Bohrgestänge an, an dessen unteren Ende der Bohrkopf sitzt. Sobald die Bohrung mehrere Kilometer Tiefe erreicht, werden somit extreme Anforderungen an die Messsonden gestellt: der Bohrkopf (unten) verkeilt sich regelmäßig, während der Rotationstisch (an der Oberfläche) das Gestänge weiter dreht und somit Energie im System aufbaut. Dies kann so weit gehen, dass sich das Stahlgestänge durch seine elastische Eigenschaft vielfach um sich selbst verdreht, sich „aufspannt“, bis sich diese Spannung schlagartig löst. Als Folge wirbelt der Bohrkopf mit Messsonde im Bohrloch herum, schlägt vielfach gegen die Bohrlochwand, und übt dabei Kräfte bis zum

100-fachen der Erdbeschleunigung auf Sensortechnik und Elektronik aus. Eine sehr anschaulich aufbereitete Darstellung dieser Bedingungen wird im Video der Referenz [5] gegeben. Für akustische Messungen kommen dabei sogenannte Sonic-Logging-Tools [6] zur Anwendung. Der englische Begriff Logging bedeutet wörtlich das Aufzeichnen oder Protokollieren von Daten. Er wird in der Öl- und Gasexploration typischerweise zum Beschreiben von Messungen verwendet, bei der die Abhängigkeit bestimmter physikalischer Größen als Funktion der Messtiefe ermittelt wird. Die von diesen Datenlogger-Geräten aufgezeichneten akustischen Wellenformen sind abhängig von der Art der Schallquelle, dem Ausbreitungsweg und den Gesteins- und Bohrlocheigenschaften. Die meistverwendeten Schallquellen bei solchen Messungen sind Monopol- und Dipolquellen. Eine Monopolquelle strahlt akustische Energie gleichmäßig in alle Richtungen ausgehend aus seinem Mittelpunkt ab, während eine Dipolquelle Energie in bevorzugte Richtungen abstrahlt.

Von einer im Bohrloch zentrierten Monopolquelle breitet sich eine kugelförmige Wellenfront mit einer Schallgeschwindigkeit V_m zunächst durch die Bohrspülung aus, bis sie auf die Bohrlochwand trifft. Ein Teil der Energie wird zurück in das Bohrloch reflektiert, während ein anderer Teil der Schallwellenenergie in die Gesteinsformation einkoppelt (siehe Abbildung 1). Die Wellenausbreitungsrichtung ist in

Abb. 1: Vereinfachte Wellenausbreitung einer Monopolschallquelle, die sich zentriert, auf der Achse in einer flüssigkeitsgefüllten Bohrung (blau) in einer „schnellen“ Gesteinsformation (braun) befindet. Beide Medien, Flüssigkeit und Gestein, werden als homogen und isotrop angenommen. Die durch das Messgerät verursachten Effekte werden vernachlässigt. Die Laufzeit (in Mikrosekunden) nach der gepulsten Schallanregung ist für jeden Zeitschnitt angegeben. Schallwellen in der Bohrspülungsflüssigkeit sind schwarz, Kompressionswellen in der Gesteinsformation blau und Scherwellen rot gekennzeichnet. In der Bohrlochflüssigkeit haben sich gebrochene Kompressions-Kopfwellen nach 90 μ s vollständig ausgeformt und gebrochene Scher-Kopfwellen nach 170 μ s.



diesem Fall immer senkrecht zur Wellenfront. Dieser vereinfachte Fall basiert auf der Annahme einer homogenen und isotropen Gesteinsformation, und vernachlässigt jeglichen Einfluss des Messgerätes (z. B. dessen endliche Ausdehnung oder Wellenablenkung und -führung) auf die Schallausbreitung.

Die dreidimensionale, zylindrische Geometrie des Bohrlochs erschwert die Erläuterungen; deshalb beschränken wir uns auf eine Schnittebene entlang der Achse einer vertikalen Bohrung. In der resultierenden zweidimensionalen Geometrie werden kugelförmige Wellenfronten zu Kreisen und breiten sich nur in der Ebene aus. Im dreidimensionalen Fall breiten sich die Wellen von der Quelle hin nach außen aus und umgeben die Bohrung axialsymmetrisch.

In der zweidimensionalen Betrachtung erzeugt die sich in der Bohrung ausbreitende Wellenfront drei neue Wellenfronten, sobald sie auf die Bohrlochwand trifft. Eine reflektierte Wellenfront bewegt sich zurück zum Bohrlochmittelpunkt mit der Schallgeschwindigkeit V_m der Bohrspülung. Kompressions- (P) und Scherwellen (S) werden in das Gestein übertragen oder gebrochen (refraktiert) und breiten sich mit den entsprechenden Geschwindigkeiten V_p und V_s aus. Im einfachsten Fall einer schnellen (oder auch „harten“) Gesteinsformation (fast formation [7]) gilt: $V_p > V_s > V_m$. Bei Kompressionswellen ist die Ausbreitungsrichtung der Welle (der Wellenvektor) parallel zur Teilchenbewegung, wie auch für Schallwellen in der Luft. Im Gegensatz dazu ist die Teilchenbewegung von Scherwellen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung; Scherwellen können sich deshalb nur in Festkörpern ausbreiten (aufgrund der fehlenden Rückstellungskraft in Flüssigkeiten). Für den hier angenommenen, isotropen Fall gibt es deshalb jeweils nur eine Kompressions- und Scherwellengeschwindigkeit im Gestein.

Im Grenzbereich einer parallel zur Bohrlochwand laufenden refraktierten (gebrochenen) P-Welle breitet sie sich entlang der Bohrloch-Gestein-Grenzschicht mit der Geschwindigkeit V_p (also schneller als die reflektierte Schallwelle im Bohrloch) aus. Gemäß Huygens' Prinzip wird jeder Punkt, der entlang der Grenzschicht von einer P-Welle angeregt ist, zu einer Quelle von elementaren, sich überlagernden Kugelwellen – es entstehen also sekundäre P-Wellen im Bohrloch sowie P- und S-Wellen im Gestein. Die Überlagerung der Anregung dieser Punktquellen entlang der Grenzfläche erzeugt eine neue, lineare Wellenfront, die „gebrochene Kopfwelle“ [8] genannt wird (in Analogie zur Machschen Kopfwelle mit ihrer charakteristischen Kegelform). Die erste gebrochene Welle, die sich in der Bohrlochflüssigkeit ausbreitet, wird gebrochene Kompressionskopfwelle genannt und von akustischen Empfängern als P-Signal registriert. Diese P-Wellen erreichen weiter von der Anregungsquelle entfernte

Empfänger entsprechend später. Der Zeitunterschied ΔT zwischen den P-Wellenlaufzeiten an den verschiedenen Empfängern geteilt durch den bekannten Abstand der Empfänger ergibt eine Größe Δt , die im englischen Sprachgebrauch als Slowness [9] bekannt ist (im Deutschen „Langsamkeit“). Diese Größe ist der Kehrwert der Schallgeschwindigkeit, dessen Bestimmung die einfachste Sonic-Logging-Messung darstellt und die meist in der Einheit $\mu s/ft$ (Mikrosekunden/Fuß) angegeben wird. Der Anteil der P-Welle, der sich tiefer in die Gesteinsformation hinein ausbreitet, wird Körperwelle (body wave) genannt. In der Gegenwart einer weiteren Grenzschicht kann diese Welle zurück zum Bohrloch reflektiert und als reflektierte P-Welle gemessen werden. In typischen Sonic-Logging-Messungen werden reflektierte P-Wellen ignoriert. In speziellen Analysen (siehe Beispiele weiter unten) werden zusätzliche Eigenschaften dieser reflektierten P-Wellen verwertet.

Das Verhalten gebrochener Scher-Kopfwellen ist den gebrochenen Kompressions-Kopfwellen sehr ähnlich. Sobald die Ausbreitungsrichtung der gebrochenen Scherwelle parallel zur Bohrlochwand verläuft, breitet sie sich entlang der Bohrloch-Gesteinsformations-Grenzfläche in Form einer Scherstörung mit einer Geschwindigkeit V_s aus und erzeugt dabei eine gebrochene Kopfwelle in der Bohrlochflüssigkeit. Die Messsignale dieser Kopfwellen an den Empfängern werden als S-Wellen bezeichnet. Durch die Auswertung der S-Wellenlaufzeit an mehreren Empfängern kann die Scher-Langsamkeit einer schnellen Gesteinsformation bestimmt werden, und zwar alleine auf Basis von Information einer Messanordnung, die komplett mit Flüssigkeit umgeben ist, worin Scherwellen sich nicht ausbreiten können.

Es existieren jedoch auch Gesteinsformationen, in denen die Scherwellengeschwindigkeit geringer ist als die Schallgeschwindigkeit in der Bohrlochflüssigkeit. Solch ein Szenario wird als langsame (oder auch „weiche“) geologische Formation (slow formation [10]) bezeichnet. Hier bildet die Scherwellenfront nie einen rechten Winkel mit der Bohrlochwand; somit kann keine gebrochene Scher-Kopfwelle entstehen.

Strahlverfolgung (Raytracing) ist eine nützliche Methode, um die Ausbreitung von gebrochenen P- und S-Kopfwellen und Körperwellen in der Umgebung des Bohrlochs zu verfolgen. Streng genommen ist Strahlverfolgung nur im Falle kleiner Wellenlängen im Verhältnis zum Bohrlochdurchmesser gültig, oder wenn sich die Wellenfronten als ebene Wellen annähern lassen. Die meisten Moden der hier betrachteten Bohrlochakustik erfüllen diese strikte Anforderung nicht. Dennoch hilft Raytracing beim visuellen Verständnis. Wie allgemein in der Strahlverfolgung üblich, ist ein Strahl eine senkrechte Linie zur Wel-

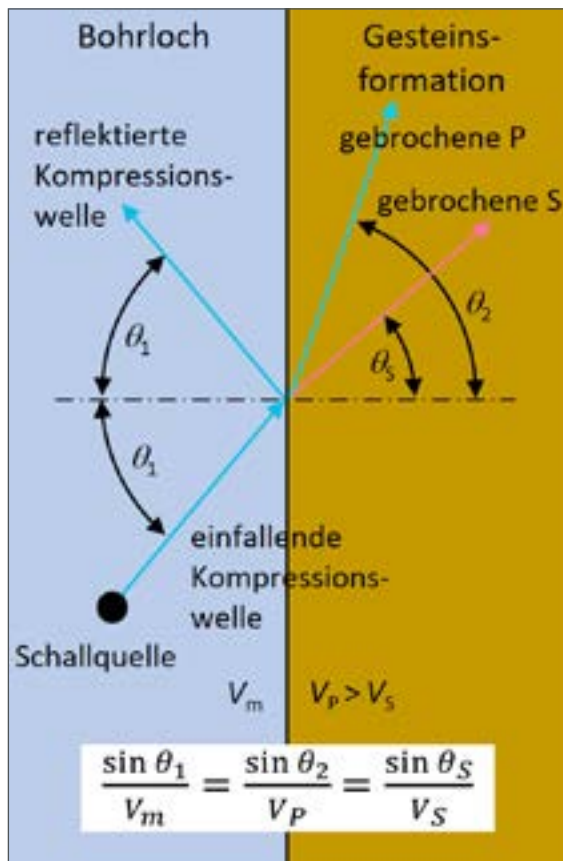


Abb. 2: Reflexion, Refraktion und Snelliussches Brechungsgesetz von Wellenstrahlen an einer Grenzschicht zwischen Bohrlochflüssigkeit (links) und Gesteinsformation (rechts). θ_1 ist hierbei Einfalls- und Reflexionswinkel in der Flüssigkeit. θ_2 und θ_s sind P- und S-Wellenrefraktionswinkel im Festkörper. V_m ist die Schallgeschwindigkeit im Bohrloch und V_p sowie V_s die Kompressions- und Scherwellengeschwindigkeiten in der Gesteinsformation. Bei kritisch gebrochenen Wellen (mit einem Refraktionswinkel von 90°) entstehen Kopfwellen.

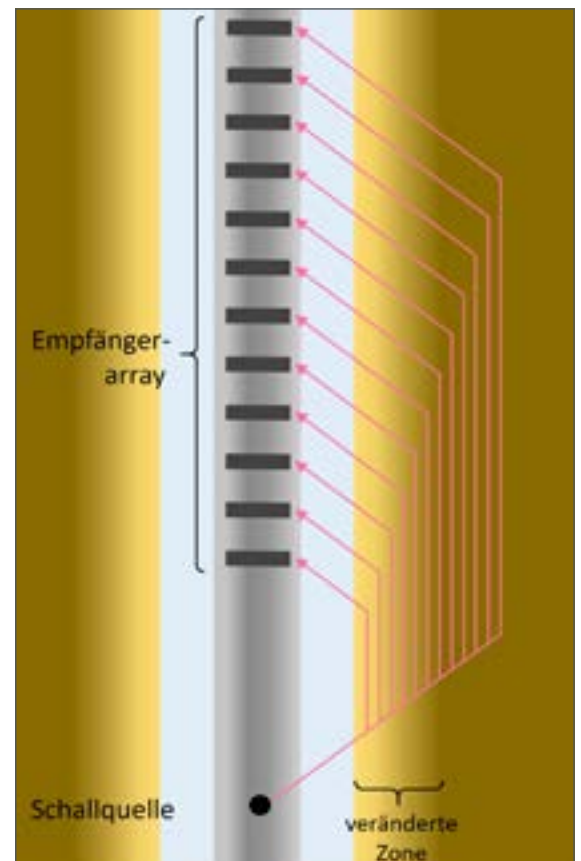


Abb. 3: Strahlverfolgung (Raytracing) mit Hilfe des Snelliusschen Brechungsgesetzes im Falle von bohrlochnahen Gesteinsformationsveränderungen und Geschwindigkeitskontrasten. Die Bohrung verursacht häufig eine Beschädigung der Gesteinsschichten in ihrer unmittelbaren Umgebung. In der beschädigten Zone hat das meist eine Absenkung der Schallgeschwindigkeit zur Folge. Mit wachsender Entfernung von der Grenzfläche steigt die Schallgeschwindigkeit wieder an. Strahlenwege für geringe Sender-zu-Empfängerabständen (SE) breiten sich nur in der beschädigten Zone (hellbraun) aus, während Empfangssignale bei großem SE-Abstand hauptsächlich die Geschwindigkeit der unbeschädigten Zone widerspiegeln (dunkelbraun).

lenfront und gibt die Ausbreitungsrichtung der Welle an. Ein Strahlweg zwischen zwei Punkten entspricht der kürzesten Laufzeit gemäß des Fermatschen Prinzips. Richtungsänderungen von Strahlwegen finden an Grenzschichten statt und folgen dem Snelliusschen Brechungsgesetz (siehe Abbildung 2). Unter anderem führt das Brechungsgesetz dazu, dass sich Kopfwellen in schnellen Formationen ausbilden, aber in langsamen Formationen nicht möglich sind. Darüber hinaus erlaubt Raytracing die Beschreibung des Verhältnisses von Sender-zu-Empfängerabständen (SE) und die Bestimmung der Dicke und Struktur von Gesteinsveränderungen und Geschwindigkeitskontrasten in der Nähe der Bohrlochwand (siehe Abbildung 3). Auch bei der Dateninterpretation ist das Prinzip der Strahl-

verfolgung hilfreich, zum Beispiel bei der Lösung von Umkehrproblemen wie der tomographischen Rekonstruktion der Slowness im bohrlochnahen Volumen als Funktion der gemessenen Schallwellenlaufzeiten. Im einfachen Fall von zentrierten Monopol-Schallquellen folgen zeitlich nach dem Eintreffen der P- und S-Kopfwellen an den Empfängern die direkten und reflektierten Flüssigkeitswellen. Kurz darauf erreichen dann Signale von „gefangenen Wellenmoden“ (trapped modes) und geometriespezifischen Oberflächenwellen die Empfänger. Gefangene Moden entstehen durch Mehrfachreflexionen innerhalb des Bohrlochs. Solche Mehrfachreflexionen von Wellenfronten spezifischer Wellenlänge können sich konstruktiv überlagern und erzeugen hierdurch eine Anzahl von

Resonanzen, sogenannte Normalmoden. Diese gefangenen Moden sind bei der Messauswertung oft nicht sichtbar, denn ihre Intensität ist stark vom Bohrllochzustand abhängig (z. B. Rauheit der Bohrllochwand). Im Falle langsamer Formationen strahlen diese gefangenen Moden einen Teil ihrer Energie direkt in die Gesteinsformation ab und werden deshalb als Leckwellen (leaky modes) bezeichnet. Sie breiten sich mit Schallgeschwindigkeiten aus, die zwischen V_p und V_s liegen und sind von Natur aus dispersiv: verschiedene Frequenzkomponenten breiten sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus, weshalb die Wellenpakete auseinander laufen, sozusagen zerfließen.

Stoneleywellen

Als letztes Signal erreichen die Empfänger spezielle, der Geometrie geschuldete, langsame Oberflächenwellen, welche in der Bohrllochakustik fälschlicherweise als Stoneleywellen bezeichnet werden. Robert Stoneley untersuchte im Jahre 1924 zwar das Verhalten akustischer Wellen an Grenzschichten, jedoch solcher, die sich entlang der Grenzfläche zweier Festkörper ausbreiten und die deshalb nach ihm benannt sind. Es war J. G. Scholte, der im Jahre 1947 die Wellenausbreitung entlang der Grenzschicht zwischen einer Flüssigkeit und eines Festkörpers beschrieb und weshalb solche Wellen normalerweise als Scholte oder Scholte-Stoneley-Wellen bezeichnet werden. Im Sonic-Logging hat sich jedoch der Begriff Stoneleywellen eingebürgert, der deshalb auch hier benutzt wird.

Stoneleywellen sind leicht anzuregen und sind deshalb in nahezu jeder Monopol-Sonic-Logging-Messung präsent. Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit liegt unterhalb sowohl V_m als auch V_s und ihr Charakter ist geringfügig dispersiv. Darüber hinaus ist die Dämpfung von Stoneleywellen als Funktion des Abstandes von der Bohrllochwand frequenzabhängig und bei hohen Frequenzen sehr groß (sie besitzen also eine geringe Eindringtiefe). Bei niedrigen Frequenzen hingegen (zum Beispiel im Falle einer Wellenlänge vergleichbar des Bohrllochdurchmessers) wird der Amplitudenabfall mit Abstand von der Bohrllochwand gering. Im Falle sehr niedriger Frequenzen ist die Amplitude entlang des Bohrlochwanddurchmessers annähernd konstant und wird im Englischen als „Tube Wave“ bezeichnet. Tube Waves treten auch im Alltag auf, zum Beispiel in Form eines oft lauten Knalls, der beim schnellen Schließen eines Wasserhahns auftritt, wobei der Wasserfluss schlagartig unterbrochen wird.

Niederfrequente Stoneleywellen reagieren sehr empfindlich auf Veränderung der Permeabilität (Flüssigkeitsdurchlässigkeit) der Gesteinsformation und bieten sich deshalb für deren Charakterisierung an.

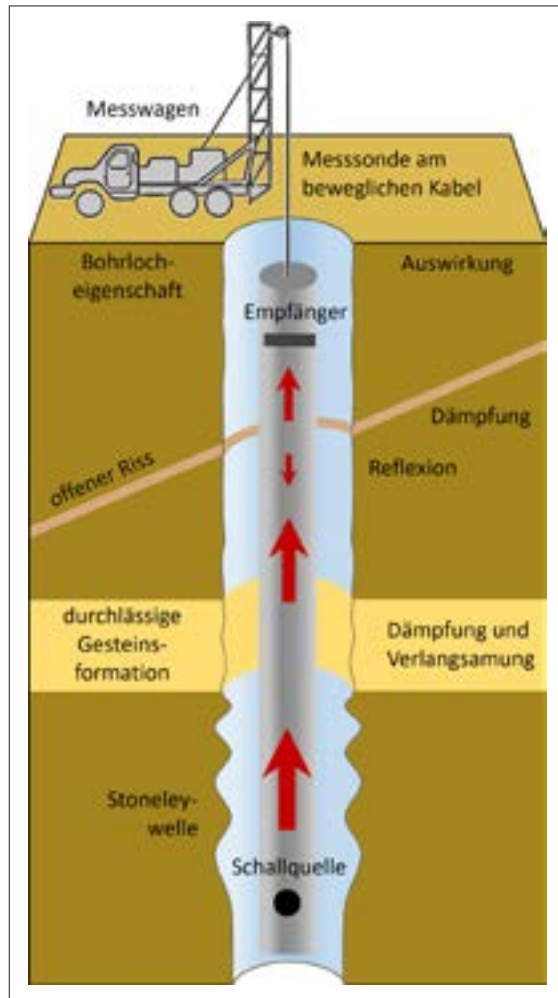


Abb. 4: Stoneleywellen breiten sich entlang der Grenzschicht Bohrlloch-Gestein aus. Sie sind dispersiv, die Teilchenbewegung ist symmetrisch bezüglich der Bohrllochachse. Bei niedrigen Frequenzen hängen Stoneleywellen empfindlich von der Permeabilität (Gas- oder Flüssigkeitsdurchlässigkeit) der Gesteinsformation ab. Wenn sie auf offene Risse oder permeable Gesteinsformation treffen, verursacht viskose Dissipation zum einen eine erhöhte Dämpfung und zum anderen eine Verlangsamung. An offenen Rissen werden Stoneleywellen sowohl reflektiert als auch abgeschwächt. Die Pfeile im Bohrlloch spiegeln die relative Stärke von Stoneleywellen wider.

Sobald Stoneleywellen auf durchlässige Risse oder permeable Gesteinsformation treffen, wird die Flüssigkeit in diesen relativ zum umgebenden Festkörper zu Vibrationen angeregt. Viskose Dissipation bewirkt sowohl eine erhöhte Dämpfung als auch eine Verlangsamung der Stoneleywellenausbreitung (siehe Abbildung 4). Die Veränderung dieser beiden Größen ist frequenzabhängig; eine Breitbandanalyse der Dissipation von aufgezeichneten Stoneleywellendaten ermöglicht somit eine Abschätzung der Permeabilität der Gesteinsformation [11]. Stoneleywellen werden auch an offenen Rissen reflektiert und eine Korrela-

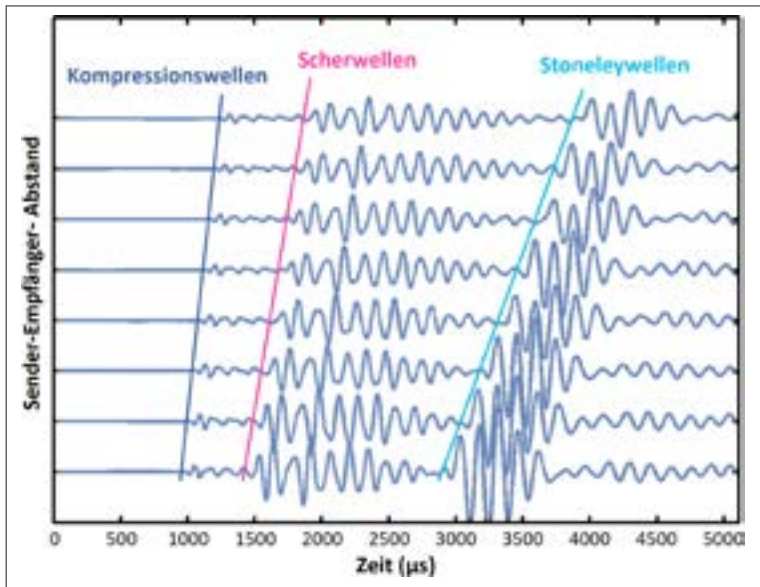


Abb. 5: Typische Monopol-Wellenformenschar einer einzelnen Messung mit einer arrayförmigen Empfängeranordnung in einer schnellen Gesteinsformation. Für Kompressions-, Scher- und Stoneleywellen sind die Laufzeiten durch Linien skizziert.

tion zwischen reflektierter und einfallender Wellenenergie erlaubt eine Abschätzung der Rissöffnung [12]. Besonders gut funktioniert diese Bestimmung im Falle permeabler Risse in schnellen Gesteinsformationen. Bei hohen Anregungsdrücken werden bei der Ausbreitung von Stoneleywellen auch Nichtlinearitäten beobachtet [13], ein besonders sensibler Mechanismus zum Nachweis von Materialermüdung (wie sie zum Beispiel durch Beschädigungen der Gesteinsformation beim Bohrvorgang auftreten können). Alle bisher besprochenen Wellen sind axisymmetrisch im Bezug zur Bohrlochachse und können deshalb mit Hilfe von im Bohrloch zentrierten Monopolempfängern – typischerweise Hydrophonen – aufgezeichnet werden. Der Abstand zwischen Sender und dem ihm am nächsten liegende Empfänger ist circa ein Meter, um eine ausreichende zeitliche Separierung der verschiedenen Wellentypen zu ermöglichen. Die weiteren Empfänger sind typischerweise alle 5 bis 10 cm angeordnet, um die Nyquist-Bedingung zu erfüllen. Bei Anregungsspeglern im Bereich einiger hundert Pascal bietet diese Anordnung einen guten Kompromiss zwischen zeitlicher Separierung der Signale und ausreichender Signalqualität mit gutem Signal-Rausch-Verhältnis. Bei einer gegebenen Tiefe der Messsonde werden die von einer arrayförmigen Empfängeranordnung aufgezeichneten Wellenformen zunächst als Zeitreihe angezeigt (siehe Abbildung 5). In einigen Messungen können die Ankunftszeiten P-, S- und Stoneleywellenankunftszeiten direkt mit bloßem Auge identifiziert werden. Auch hier ergibt die Differenz von Ankunftszeiten geteilt durch die entsprechen-

den Empfängerabstände die Slowness der einzelnen Moden. Meist sind jedoch Datenaufbereitungsalgorithmen notwendig, um Ankunftszeiten präzise zu bestimmen, da die einzelnen Wellenpakete nicht klar zu trennen sind. Niedrige Signal-zu-Rauschverhältnisse, ein schlechter Bohrlochzustand (wie z. B. bedingt durch Auswaschungen) oder zahlreiche andere Faktoren können zu unklaren oder überlagerten Ankunftszeiten führen, sodass eine visuelle oder automatische Bestimmung der Ankunftszeiten fehlschlägt und die Slowness auf direkte Weise nicht ermittelt werden kann. Eine Slowness kann in solchen Situationen noch mittels einer Datenaufbereitungsmethode bestimmt werden, die nach Ähnlichkeiten – mathematisch Semblance oder Kohärenz genannt – in den Arraywellenformen sucht [14]. Ausgehend von wahrscheinlichen Startwerten für Ankunftszeiten und Slowness der einzelnen Wellenformen wird der komplette Arraydatensatz nach Zeit und Slowness durchsucht und die Kohärenz in kleinen Zeitfenstern bestimmt. Dargestellt wird diese Kohärenz für verschiedene Slowness- und Zeitwerte in einer sogenannten Slowness-Time-Coherence-Abbildung (STC), in der lokale Kohärenzmaxima als Konturen dargestellt werden (siehe Abbildung 6). Eine Projektion dieser Maxima auf die vertikale Achse erlaubt die Darstellung der Auswertung für alle Tiefen in einem einzigen Slowness-Tiefenlog, der eine Begutachtung der Maxima für Kompressions-, Scher- und Stoneleyslowness ermöglicht. Solch ein STC-Tiefenlog ist eine Standardabbildung in der Sonic-Logging-Disziplin.

Dipol-Messungen

Bisher hat sich diese Diskussion auf Monopolschallquellen beschränkt. Für einige Anwendungen sind jedoch andere Schallquellen von Vorteil. Es zeigt sich, dass Dipolquellen gut geeignet sind, um die Scherwellengeschwindigkeit in langsamen Gesteinsformationen zu bestimmen. Erinnern wir uns, dass sich in der Bohrspülung ausschließlich Kompressionswellen, aber keine Scherwellen ausbreiten. Wenn eine sich von der Quelle ausbreitende Kompressionswelle an der Grenzfläche zur Gesteinsformation gebrochen wird, so kann ein Teil der einfallenden Wellen auch in Scherwellen konvertiert werden, die sich in dem Gestein weiter ausbreiten. Solange die Scherwellengeschwindigkeit des Gesteins größer als die Kompressionswellengeschwindigkeit der Bohrspülung ist, kann die einfallende Kompressionswelle entlang der Bohrlochwand für den entsprechenden Einfallswinkel kritisch gebrochen werden und erzeugt ihrerseits eine Scher-Kopfwellen in dem Bohrloch. Diese Scher-Kopfwellen pflanzen sich an der Grenzfläche mit der Scherwellengeschwindig-

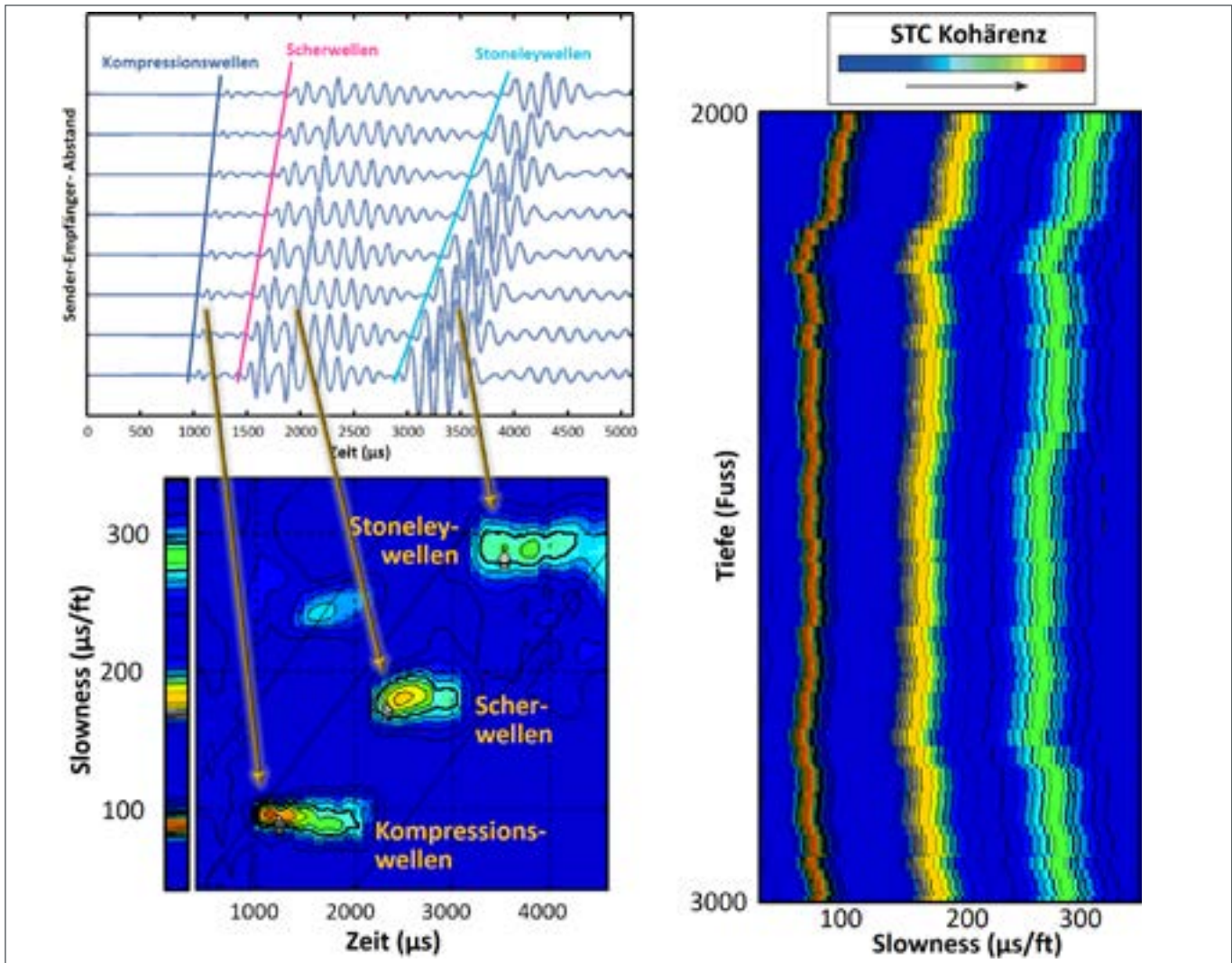


Abb. 6: Slowness-Time-Coherence-Analyse (STC) von Monopolararraydaten. Eine Schar von Wellenformen (links oben) in einer bestimmten Tiefe wird analysiert, in dem die verschiedenen Wellenformen gegeneinander verschoben werden, bis ihre höchste Korrelation erreicht ist. Das Beispiel einer solchen STC-Auswertung (links unten) ist in einer als farbcodierte Kohärenz in einer Slowness-Zeit-Ebene abgebildet, wobei maximale Kohärenz in rot gegeben ist. Diese Kohärenzwerte werden dann auf die vertikale Achse abgebildet und schließlich für einen kompletten Tiefenlog (rechts) für Messungen bei verschiedenen Bohrlochtiefen als kontinuierlichen Tiefenlog dargestellt.

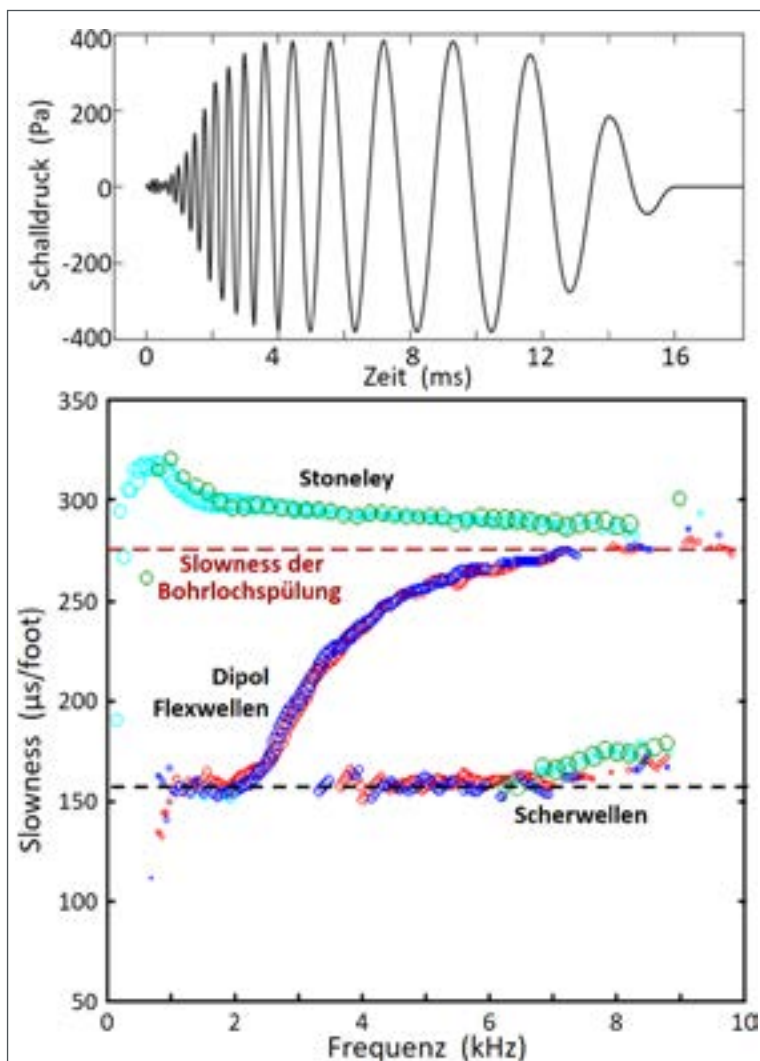
keit des Gesteins fort und kann von den akustischen Empfängern registriert werden. In solchen schnellen Gesteinsformationen ist also die Bestimmung der Scherwellengeschwindigkeit des Gesteins mit Monopolschallquellen möglich. Wenn hingegen in langsamen Formationen die Scherwellengeschwindigkeit des Gesteins kleiner als die Kompressionswellengeschwindigkeit der Bohrspülung ist, kann keine gebrochene Scher-Kopfwellen entstehen und damit keine Scherwellengeschwindigkeit des Gesteins bestimmt werden. Da die Scherwellengeschwindigkeit unter anderem für die Bestimmung der Bohrlochstabilität von großer Bedeutung ist, wurde eine technologische Variante mit Dipolquellen entwickelt, um die Scherwellengeschwindigkeit dennoch bestimmen zu können. Messsonden mit Dipolquellen erzeugen neben den Kompressions- und Scher-Kopfwellen auch Biege- (im Engli-

schon Flexural Waves genannt), die sich entlang der Grenzfläche zur Gesteinsformation ausbreiten und ihrerseits wieder Kopfwellen in der Bohrspülung verursachen. Eine Biege- (Flexural) Welle kommt einer Bewegung gleich, die einen Fahnenmast hinaufwandert, sobald er von einer Person am Boden geschüttelt wird. Es ist demnach eine asymmetrische Anregung in Bezug auf die Bohrlochachse – im Gegensatz zu symmetrischen Stoneleywellen (siehe Abbildung 4). Eine Dipolquelle besteht im Prinzip aus einem Rüttler, in dem zwei Massen gegenphasig bewegt werden. Solche Quellen zeigen eine Richtungsabhängigkeit der akustischen Emission. Zur Biege- (Flexural) Wellenmessung in einem Bohrloch wird eine Polarisationsrichtung senkrecht zur Bohrlochachse eingerichtet. Anders als bei der Konvertierung der Monopol-Kompressionswellen durch Brechung an der Bohrlochgrenzfläche, erlaubt die Erzeugung gegenphasiger Kom-

pressionswellen durch eine Dipolquelle eine direkte Ankopplung an die asymmetrische Biegewelle in der Bohrlochwand. Typische Messgeräte zur Biegewellenmessung enthalten normalerweise zwei Dipolquellen, deren Polarisationsrichtungen senkrecht zueinander orientiert werden, eine in der Messgeräte-X und eine in der Messgeräte-Y-Achse. Zahlreiche Dipolempfänger werden arrayförmig an verschiedenen Abständen von den Quellen ebenso entlang X- und Y-Achse platziert, in besonders komplexen Anordnungen auch noch zwischen diesen beiden Achsenrichtungen bei je 45°. Solch komplexe Messgeräte können bis zu 100 Empfänger aufweisen.

Messungen mit den beiden gekreuzten Quellen werden nacheinander ausgeführt. Die Biegewellen breiteten sich entlang des Bohrlochs aus, und zwar jeweils in der Ebene der sie anregenden Dipolquelle.

Abb. 7: Typisches frequenzmoduliertes Anregungssignal (oben), um Frequenzkomponenten im Bereich 1 bis 10 kHz zu stimulieren. Dispersionskurven (unten) der Dipol-Slowness in einer isotropen Gesteinsformation sind frequenzabhängig, während Scherwellen keine solche Abhängigkeit aufweisen. Im Grenzfall niedriger Frequenzen erreicht die Dipol-Slowness den Wert der Scherwellen-Slowness im Gestein.



Die Teilchenbewegung solcher Biegewellen ist senkrecht zur Wellenausbreitungsrichtung – ähnlich der Bewegung bei Scherwellen – und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt auch mit jener der Scherwellen im Gestein zusammen.

Biegewellen sind stark dispersiv. Die Form des Wellenpaketes einer solchen Welle ändert sich mit fortschreitendem Abstand von der Quelle, da sich verschiedene Frequenzkomponenten mit verschiedenen Geschwindigkeiten ausbreiten (siehe Abbildung 7). Aus diesem Grund müssen Standardmethoden zur Slowness-Ermittlung, wie die gerade besprochene STC-Methode, die auf Wellenformenähnlichkeiten beruhen, an die dispersive Natur der Biegewellen angepasst werden. Dispersionskurvenanalyse erlaubt die Bestimmung verschiedener Eigenschaften der Gesteinsformation, da die radiale Eindringtiefe der Biegewellen in das Gestein frequenzabhängig ist und ungefähr eine Wellenlänge beträgt. Deshalb sondiert der niedrigfrequente Anteil der Biegewellen tief in das Gestein, während der höherfrequente Anteil hauptsächlich durch die Eigenschaften des Gesteinsmaterials nahe der Bohrlochwand bestimmt wird. Aus diesem Grund liefert eine frequenzabhängige Analyse der Biegewellen Radial-Profil-Informationen, gibt also Aufschluss über die Eigenschaften von Gesteinsschichten näher und weiter weg von der Bohrlochwand [15].

Die Nullfrequenzkomponente der Biegewellen spiegelt die wirkliche Gestein-S-Slowness wider. Eine Analyse der Dispersionskurve erlaubt die Abschätzung der Gestein-Scherwellen-Slowness, sowohl in langsamen als auch in schnellen Gesteinsformationen; dadurch wird das disperse Schermodul μ bestimmt. Bisher hat sich die Betrachtung auf den einfachen Fall homogener, isotroper Gesteinsschichten beschränkt. Solche Gesteinsformationen haben jeweils genau eine Kompressions-, Stoneley- und S-Slowness. Die meisten Anwendungen beim Sonic-Logging benutzen diese Information, um – unter der Annahme einer homogenen, isotropen Gesteinsformation – Rückschlüsse auf Porosität, Permeabilität, Bohrlochflüssigkeit-Eigenschaften, elastische Moduli, Lithographie oder Mineralogie zu ziehen.

Im Weiteren wird der Fall inhomogener und anisotroper Gesteinsformationen betrachtet, in denen die Datenanalyse komplizierter wird.

Anisotropie

Die räumliche Ausrichtung von Mineralien, Schichtungen, Brüchen, rissigem oder unter Spannung stehenden Gesteins erzeugen eine Anisotropie, also Richtungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeiten (unter der Voraussetzung, dass die Längenskalen dieser Merkmale klein im Vergleich zu den untersuch-

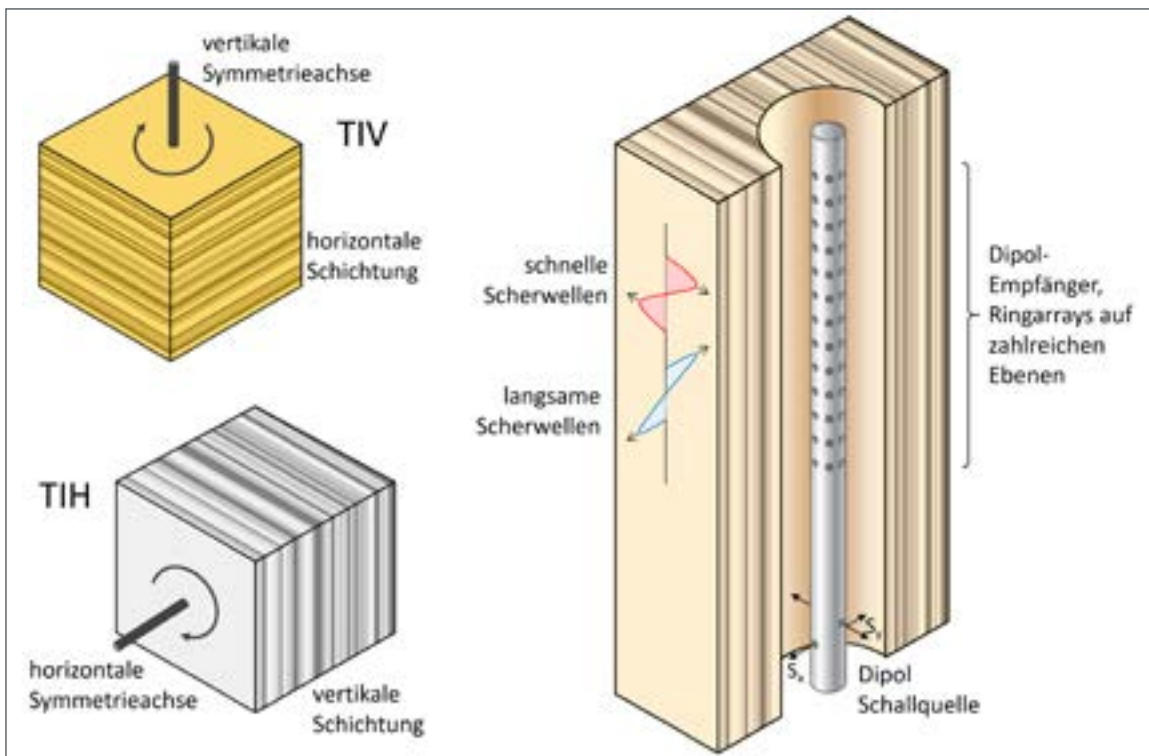


Abb. 8: Links: Skizzen elastischer Anisotropie: Horizontal geschichtete Gesteinsschichten sind transversal isotrop mit einer vertikalen Symmetrieachse (TIV) während vertikal geschichtete Gesteinsschichten transversal isotrop mit einer horizontalen Symmetrieachse (TIH) sind. Rechts: In einem TIH-Material spalten sich vertikal ausbreitende Scherwellen in eine schnelle und eine langsame Komponente auf, wobei die schnelle Komponente in der Riss- oder Schichtungsebene schwingt. Orthogonale Dipolschallquellen S_x und S_y regen die verschiedenen S-Wellenkomponenten an, die dann von Dipolempfängerarrays aufgezeichnet werden.

ten Wellenlängen sind). Informationen über diese elastische Anisotropie wird immer dann benötigt, wenn geomechanische oder allgemein felsbaumechanische Überlegungen wichtig sind, wie zum Beispiel bei gerichtetem Bohren (directional drilling), Bohrungen in tektonisch aktiven Regionen, der Planung von hydraulischem Aufbrechen des Gesteins (Frac-Verfahren) oder der Bewertung der Stabilität einer Bohrung.

Diese von natürlichen Prozessen hervorgerufene Anisotropie ist dafür verantwortlich, dass das Gestein eine Hauptausrichtung besitzt, die im einfachen Fall entweder in die horizontale oder vertikale Ebene zeigt. In erster Näherung ruft eine horizontale Schichtung ein Material hervor, das als isotrop in alle horizontalen Richtungen, jedoch anisotrop in vertikaler Richtung ist. Deshalb wird es als transversal isotrop mit einer vertikalen Symmetrieachse (TIV) bezeichnet (siehe Abbildung 8 links). In gleicher Weise erzeugen zum Beispiel vertikale Risse ein anisotropes Medium, das als isotrop in der Rissebene angesehen werden kann und als anisotrop in der orthogonalen Richtung zu dieser Ebene. Solch ein Gestein wird als transversal isotrop mit einer horizontalen Symmetrieachse (TIH) bezeichnet.

Akustische Wellen haben eine natürliche Empfind-

lichkeit bezüglich dieser richtungsabhängigen Materialeigenschaften. Sie breiten sich am schnellsten aus, wenn die Teilchenbewegung, Polarisation genannt, in Richtung der größten Festigkeit im Material verläuft. Die Teilchenbewegung von Kompressionswellen ist parallel zu deren Ausbreitungsrichtung und folglich sind sie am schnellsten, wenn sie sich parallel zu Laminierung und Rissen ausbreiten. Die Teilchenbewegung von Scherwellen ist orthogonal zu der Ausbreitungsrichtung; in anisotropen Medien können sie sich in zwei unterschiedlich schnell ausbreitende Anteile aufspalten. S-Wellen mit Polarisierung in der Laminierungs- oder Rissebene breiten sich schneller aus als S-Wellen mit einer Polarisierung orthogonal dazu. Da sich BiegeWellen in diesem Zusammenhang wie S-Wellen verhalten, werden beide Bezeichnungen im Sonic-Logging äquivalent benutzt.

Unter der Voraussetzung einer richtig gewählten Messgeometrie kann Sonic-Logging die Richtung und Größe der Anisotropie der Gesteinsinformation messen und quantifizieren. In einem TIH-Medium, wie zum Beispiel einer Gesteinsinformation mit vertikalen Rissen, spalten sich vertikal ausbreitende S-Wellen in zwei Wellen auf, in je eine schnelle und eine langsame Komponente, wie in Abbildung 8 rechts skizziert. Gleichermäßen spalten sich die S-

Wellen in einer horizontalen Bohrung in einem TIV-Medium, wie zum Beispiel im Schiefergestein, in zwei Zweige auf – analog zur Doppelbrechung, und zwar mit der Polarisierung der schnellen S-Welle in der Schichtungsebene.

Die Bestimmung der Polarisierung der durch Anisotropie gespaltenen S-Wellen gestaltet sich als nicht trivial, da sie nicht mit einfachen Monopolempfängern gemessen werden kann. Ein gerichteter Empfänger kann im einfachsten Fall durch Paarung zweier Monopolempfänger realisiert werden, die dann als einzelner Dipolempfänger fungieren. Eine optimale Messung wird durch ein Empfängerarray erreicht, bei dem azimuthal zahlreiche Monopolempfänger auf einem Ring angeordnet sind. Solch ein Beispiel mit jeweils acht auf einem Ring angeordneten Empfängern, die auf zahlreichen Ebenen multipliziert sind, ist in Abbildung 8 rechts skizziert [16].

Während in isotropen Gesteinen die von einer Dipolquelle erzeugten BiegeWellen in der Erzeugungsebene polarisiert bleiben und nur von gleichermaßen orientierten Empfängerpaaren registriert werden können, spalten sich BiegeWellen in einer anisotropen Formation in schnelle und langsame Komponenten auf, wie bereits weiter oben besprochen. Die Energie der unterschiedlichen BiegeWellen wird des-

halb von allen Empfängern teilweise aufgenommen. In einem mathematischen Verfahren werden nun die Wellensignale der verschiedenen azimuthal angeordneten Empfänger so verarbeitet, dass sie in einem gedrehten Koordinatensystem auf Wellenformen reduziert sind, die der Ebene der schnellen und langsamem S-Wellen entsprechen. Diese können dann mit den Verfahren der Dispersionsanalyse weiterverarbeitet werden.

Die vier Slowness-Werte in solch einer Sonic-Logging-Messung, die schnellen und langsamen Scher-, Kompressions- und Stoneleywellen, können jetzt in vier Anisotropiemoduli umgerechnet werden. Diese können dann die einfachsten Anisotropien fast vollständig beschreiben, wobei TIV und TIH fünf Module für eine vollständige Charakterisierung benötigen. Komplexere Arten von Anisotropien benötigen zusätzliche Messungen, wie zum Beispiel der P-Wellenausbreitung bei verschiedenen Winkeln oder Azimuten, oder horizontale oder vertikale S-Wellenausbreitung. Diese Informationen können oft mit Hilfe von Bohrlochseismik oder Oberflächenseismik erlangt werden.

Eine weitere Art von Anisotropie wird durch geologische Spannungen hervorgerufen und deshalb als induzierte Anisotropie bezeichnet. Wenn eine

UNSERE AUFGABEN KLINGEN GUT.



NICHT NUR
IN ANZEIGEN.



Wo tritt Schall am stärksten auf?

Neue Partnerschaft zwischen SVANTEK und Wölfel

Im Bereich Messung und Monitoring von Lärm arbeiten wir ab dem 1. Juli dieses Jahres mit einem neuen Partner, der SVANTEK Deutschland GmbH, zusammen. Diese Zusammenarbeit ermöglicht es uns, unser Portfolio zu erweitern. Zukünftig bieten wir Ihnen ein noch breiteres Spektrum an innovativer Messtechnik und Software für die Bereiche Immissionsschutz, Arbeitsschutz, Lärm-Monitoring, Bauakustik, Schallquellenlokalisation und Emission von Windenergieanlagen an.

woelfel.de/suchen-finden



Gesteinsinformation unterschiedliche Spannungen in ihren verschiedenen Achsen aufweist, führt das zu einer Veränderung der S-Wellengeschwindigkeiten in den verschiedenen Achsen [17]. Der Bohrvorgang hat Felsgestein entfernt und dadurch zu einer Umverteilung der in-situ Spannungen um das Bohrloch herum geführt. Ein solches Beispiel ist in Abbildung 9 gegeben. Die Analyse dieser Dispersionsdaten erlaubt eine Einschätzung des Bohrlochzustandes bezüglich dessen Stabilität, und damit eine Antwort auf die Frage, ob das Bohrloch kurz vor dem Kollaps steht. Dies würde aufwändige Wiederherstellungsarbeiten nach sich ziehen. Weiter kann die Analyse zur Planung einer Frac-Anwendung beitragen, wo sich die Frage stellt, in welche Richtung das Gestein am einfachsten aufbrechen wird.

Inhomogenität

Die Eigenschaften der Gesteinsinformation hängen nicht nur von der Richtung der Messung an einem gegebenen Ort ab, oben als Anisotropie beschrieben, sondern variieren typischerweise auch, wenn Messungen an verschiedenen Orten ausgeführt werden. Dies wird dann als Inhomogenität oder Heterogenität bezeichnet.

Frühe Sonic-Logging-Messungen hatten nur die Möglichkeit, Inhomogenitäten als Grenzschichten von Gesteinslagen zu bestimmen. Andere Inhomogenitäten, wie zum Beispiel Zonen hoher Permeabilität oder offene Risse können mit Hilfe der Stoneleywellenanalyse charakterisiert werden, wie zuvor gezeigt wurde. Inhomogene Eigenschaften in radialer Richtung – also von der Bohrlochwand in das Gestein hinein – sind das Resultat des Bohrprozesses und schwieriger zu charakterisieren. Der Bohrvorgang entfernt nicht immer nur Gestein, um das Bohrloch anzulegen, sondern kann auch das anliegende Gestein um das Bohrloch herum plastisch beschädigen. Darüber hinaus kann flüssige Bohrspülung in die Bohrlochwand eindringen und dort zum Beispiel mit Tongestein reagieren, was zum Aufquellen und zu einer Veränderung der Schallgeschwindigkeit führen kann. Bohrspülung kann auch in den Porenraum des umliegenden Gesteinsvolumens eindringen und dort die natürliche Flüssigkeit der Gesteinsinformation verdrängen. Da sich die Eigenschaften der Bohrspülung wahrscheinlich von denen der ursprünglichen Porenflüssigkeit unterscheiden, führt dies auch zu einer Änderung der tatsächlichen Schallgeschwindigkeiten.

Die Änderung der bohrlochnahen Materialeigenschaften, verglichen mit denen der unveränderten, oder bohrlochfernen Gesteinsinformation, kann, je nach Ursache, eine Erhöhung oder Verringerung der Schallgeschwindigkeit bewirken. Typischerwei-

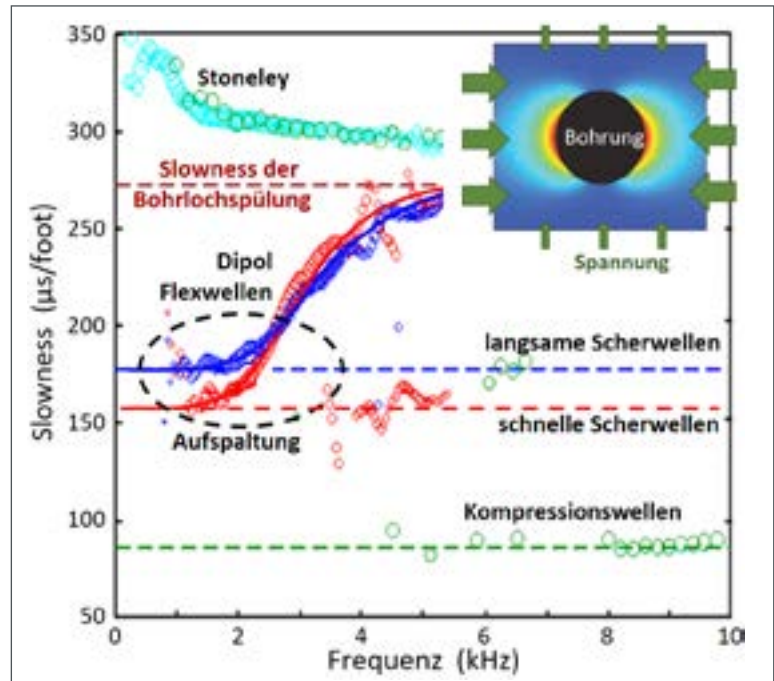


Abb. 9: Die Dispersionskurven der Dipol-Slowness spalten sich in einer Gesteinsinformation mit spannungsinduzierter Anisotropie in zwei Zweige auf. Oben rechts: Die Skizze zeigt beispielhaft die Spannungsverteilung im Gestein um das Bohrloch herum, wenn eine Richtung mehr Vorspannung (fette grüne Pfeile) als die andere aufweist. Dies resultiert in einer Veränderung der azimuthal-winkelabhängigen anisotropen Scherwellen-Slowness. .

se verringern Bohrschäden die Festigkeit der Formation, was eine Erniedrigung der bohrlochnahen Schallgeschwindigkeiten nach sich zieht. Wenn jedoch Bohrspülung in einen vorher gasgefüllten Porenraum eindringt, erhöht sich die Festigkeit, und die Kompressionswellengeschwindigkeit vergrößert sich in Bohrlochnähe.

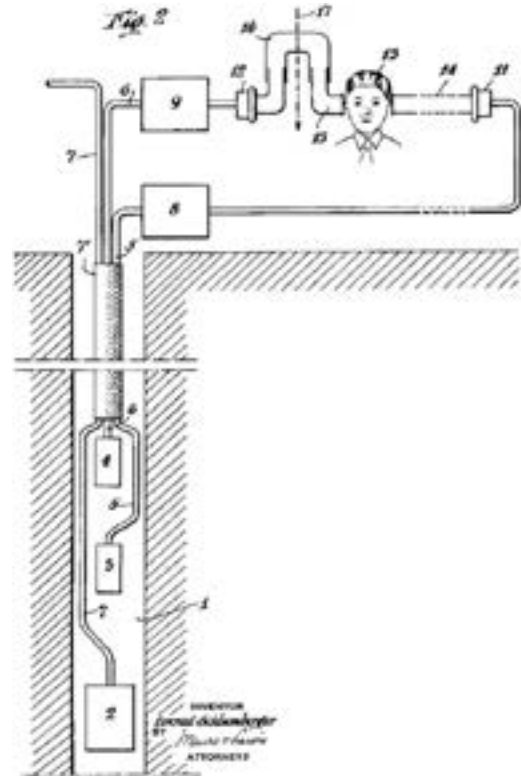
Zur vollständigen Charakterisierung von radialer Inhomogenität muss eine Analyse der radialen Abhängigkeit der Kompressions- und Scherwellenslowness durchgeführt werden. Solch eine Analyse beruht auf der Auswertung zahlreicher Wellenformen, die jeweils verschiedene Eindringtiefen in bohrlochnahe oder -ferne Zonen haben und die mit unterschiedlichen SE (Sender-Empfänger)-Abständen aufgenommen wurden. Strahlverfolgung der gebrochenen Kompressionswellen ermöglicht die Bestimmung der bohrlochnahen und bohrlochfernen Slownesses. Die radiale Abhängigkeit der S-Slowness erfolgt durch Auswertung der Dispersion der Biege- und Stoneley-Moden. Diese Moden haben eine niedrige Eindringtiefe bei hohen Frequenzen, sind also besonders empfindlich für bohrlochnahe Gesteinseigenschaften und haben eine große Eindringtiefe bei niedrigen Frequenzen, bei denen sie die Eigenschaften weiter entfernt vom Bohrloch bestimmen. Breitbandige Messungen erlauben deshalb besonders präzise Eigenschaftsbestimmungen.

Anfänge des Sonic-Loggings bei Tiefbohrungen

In einem im Jahre 1935 ausgestellten Patent [18] konzipiert Conrad Schlumberger das erste Messgerät zur Bestimmung der Schallausbreitung im Gestein, um ein Bohrloch mit Hilfe einer Schallquelle (2) und zweier Empfänger (3 und 4). Ein Techniker (13) benutzt hierbei eine Art Posaunenrohr (16), um eine zeitliche Überlagerung der von ihm wahrgenommenen Schallsignale (8 und 9) zu erreichen. In seinem Patent behauptete Conrad Schlumberger, dass mit diesem Verfahren die Schallgeschwindigkeit und -dämpfung des Gesteins bestimmt werden kann. Leider war die Erfindung ein Misserfolg, da zu jener Zeit weder Techniker noch die technischen Möglichkeiten in der Lage waren, so kurze Laufzeitunterschiede (einige Zehntel von Mikrosekunden) zwischen den beiden Empfängern zu bestimmen. Es dauert noch ein gutes Jahrzehnt, bis die Elektronik den dafür notwendigen Stand erreicht hatte. Die ersten erfolgreichen Experimente des Sonic-Loggings wurden im Jahre 1948 von der Humble Oil Research und 1952 von Magnolia Petroleum Company und Shell ausgeführt und beschrieben. Die von diesen Firmen entwickelten Messgeräte waren dafür gedacht, die Schallgeschwindigkeit des Gesteins als tiefenabhängige Kurve aufzuzeichnen und diese Information mit seismischen Messungen zu korrelieren. Die Messgeräte besaßen einen einzelnen Sender und einen oder zwei Empfänger. Mitte der fünfziger Jahre war es für Öl- und Servicefirmen schon gängige Praxis, solche Messungen standardmäßig durchzuführen.

In der ursprünglichen Magnolia-Veröffentlichung wurde die Möglichkeit beschrieben, die akustischen Messungen zur Bestimmung der Porosität und Lithographie des Gesteins zu verwenden. Es waren jedoch erfolgreiche Experimente der Gulf Oil Corporation, die als erstes diese Beziehung bestätigten. Daraufhin gab es eine explosionsartig zunehmende Nachfrage nach akustischen Messungen zur Porositätsbestimmung und in kürzester Zeit wurde diese Anwendung wichtiger als jene für die Korrelation zur Seismik.

In den sechziger Jahren war Sonic-Logging ein etabliertes Messverfahren bei Tiefbohrungen, und die Entwicklung der zweiten Generation von Messgeräten konzentrierte sich



auf drei Aspekte: Robustheit der Geräte, Signalqualität und Messgenauigkeit bei Bohrlochauswaschungen und Veränderungen. In dieser Zeit wurden spezielle Stahlgehäuse entwickelt und kompensierte Messungen eingeführt, bei denen Sender unterhalb und oberhalb der Empfänger bauartbedingte Störungen heraussubtrahierten.

In den achtziger Jahren kamen die ersten Geräte mit Empfängerarrays auf den Markt und es wurden automatisierte Datenanalyseverfahren entwickelt. Zur gleichen Zeit wurde auch begonnen, mit Dipolmessungen zu experimentieren. Die Entwicklung von integrierten Hochtemperaturschaltkreisen, die bei Temperaturen bis 200°C zuverlässig funktionieren, erlaubte es im letzten Jahrzehnt Messgeräte zu konstruieren, die mit einer Vielzahl von einzelnen Empfängern eine Fülle von Daten aufnehmen und somit hochkomplexe Analysen ermöglichen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Martin G. Lüling und Florian Karpfinger für das sorgfältige Korrekturlesen des Manuskriptes und ihr Feedback bezüglich der Aufbereitung und Präsentation des Materials.

Literatur

- [1] Exploration in der Geologie [Online]. [https://de.wikipedia.org/wiki/Exploration_\(Geologie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Exploration_(Geologie)) (letzter Aufruf: September 2018).
- [2] Ellis, D.; Singer, J.: Well Logging for Earth Scientists. Springer, 2nd Edition, 2008.
- [3] Dong, G.; Chen, P.: A Review of the Evaluation,

Control, and Application Technologies for Drill String Vibrations and Shocks in Oil and Gas Well. Shock and Vibration, Bd. 7418635, 2016.

- [4] Goujon, N.; Hori, H.; Liang, K.; Sinha, B.: Applications of piezoelectric materials in oilfield services. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Bd. 59, Nr. 9, 2012.
- [5] Schlumberger: Drill String – Shock and Vibration in Drilling. 2006. [Online]. https://www.youtube.com/watch?v=RzOnLwi_8MY (letzter Aufruf: September 2018).
- [6] Sonic Logging. [Online]. <https://en.wikipedia.org>

org/wiki/Sonic_logging (letzter Aufruf: September 2018).

- [7] Fast Formation, schnelle oder auch harte Gesteinsformation. [Online]. http://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/f/fast_formation.aspx (letzter Aufruf: September 2018).
- [8] Kopfwelle. [Online]. <https://de.wikipedia.org/wiki/Kopfwelle> (letzter Aufruf: September 2018).
- [9] Slowness (seismology). [Online]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Slowness_\(seismology\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Slowness_(seismology)) (letzter Aufruf: September 2018).
- [10] Slow Formation. [Online]. http://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/s/slow_formation.aspx (letzter Aufruf: September 2018).
- [11] Winkler, K.; Liu, H.; Johnson, D.: Permeability and Borehole Stoneley Waves. Comparison Between Experiment and Theory. Geophysics, Bd. 54, Nr. 1, S. 66–75, 1989.
- [12] Hornby, B.; Johnson, D.; Winkler, K.; Plumb, R.: Fracture Evaluation Using Reflected Stoneley Wave Arrivals. Geophysics, Bd. 54, Nr. 10, S. 1.274–1.288, 1989.
- [13] Klieber, C.; Johnson, D.L.: Nonlinear Phasing and Dephasing of Three Wave Mixing of Acoustic Guided Waves. Phys. Rev. E, Bd. 88, Nr. 033204, 2013.
- [14] Kimball, C.; Marzetta, T.: Semblance Processing of Borehole Acoustic Array Data. Geophysics, Bd. 49, Nr. 3, S. 274–281, 1984.
- [15] Murray, D.; Plona, T.; Valero, H.-P.: Case Study of Borehole Sonic Dispersion Curve Analysis. Transactions of the SPWLA 45th Annual Logging Symposium, June 6-9, 2004, Noordwijk, The Netherlands, paper BB.
- [16] Pistre, V.; Kinoshita, T.; Endo, T.; Shilling, K.; Pabon, J.; Sinha, B.; Plona, T.; Ikegami, T.; Johnson, D.: A Modular Wireline Sonic Tool for Measurements of 3D (Azimuthal, Radial, and Axial) Formation Acoustic Properties. Transactions of the SPWLA 46th Annual Logging Symposium, New Orleans, June 26–29, 2005, paper P.
- [17] Winkler, K.; Sinha, B.; Plona, T.: Effects of Borehole Stress Concentrations on Dipole Anisotropy Measurements. Geophysics, Bd. 63, Nr. 1, S. 11–17, 1998.
- [18] Schlumberger, C.: Procédé et Appareillage pour la Reconnaissance de Terrains Traversés par un Sondage. République Française Patent 786,863, 17. Juni 1935. ■



Dr. Christoph Klieber

Schlumberger – Riboud Technology Center, Clamart, Frankreich



Dr. Thilo Brill

Schlumberger – Riboud Technology Center, Clamart, Frankreich



DAMTEC®

Schall- und Schwingungsisolierung

aus Gummigranulat und PU-Schaum



Elastische Lager für Gebäude und Maschinen



Elastische Elemente für die Bahninfrastruktur



DAMTEC® ist die eigens entwickelte Produktlinie der KRAIBURG Relastec GmbH & Co. KG für Produkte zur Trittschalldämmung und Schwingungsisolierung.

Ruhe ist ein elementares Grundbedürfnis und von hoher Bedeutung in unserer Zeit. Eine wirksame Schallisolierung führt zu mehr Lebensqualität und die Erfüllung hoher Ansprüche. Effektive Schwingungsentkopplung schafft Frieden in einer immer enger bebauten urbanen Welt.

Mit der Marke DAMTEC® finden Sie eine Vielfalt von Produkten zur Schalldämmung sowie Schwingungsisolierung für Ihre Ansprüche und Einsatzfelder.

Dynamische Richtwirkung von Musikinstrumenten

Von der Analyse zur Synthese

Malte Kob, David Ackermann, Stefan Weinzierl, Franz Zotter

Neben den zeitlichen und spektralen Merkmalen liefert auch die Abstrahlung in den Raum einen wesentlichen Beitrag zum spezifischen Klangcharakter von Musikinstrumenten. Sowohl die Hauptabstrahlungsrichtung als auch die Abstrahlung zu seitlichen oder rückwärtigen Richtungen trägt, vermittelt über die Akustik des Aufführungsraums, zum perceptiven Eindruck des Instruments bei. Eine besondere Herausforderung ist die Darstellung der komplexen Richtcharakteristik musikalischer Instrumente bei der Simulation akustischer Klänge in virtuellen Umgebungen. Der folgende Beitrag geht auf die Grundlagen der Messung von Richtcharakteristiken ein, auf Ursachen für Messfehler, die Auswirkungen dynamischer Spielbewegungen von Musikern mit ihren Instrumenten sowie auf Methoden der elektroakustischen Simulation und der Auralisation von Schallquellen mit frequenzabhängiger Richtwirkung.

Abstrahlung von Musikinstrumenten

Dieser Beitrag wurde motiviert aus dem gemeinsamen Herbstworkshop "Richtwirkung von Musikinstrumenten – Physik, Messung und Simulation" der DEGA-Fachausschüsse "Musikalische Akustik" und "Virtuelle Akustik" am 4. und 5. Oktober 2017 an der TU Berlin, der die Komplexität des Themas und die Vielzahl noch ungelöster Probleme verdeutlicht hat. Die Beiträge reichten von der Schallentstehung bei Streichinstrumenten über verschiedene Aspekte der Messtechnik bis hin zur Synthese von Abstrahlcharakteristiken als Herausforderung für Elektroakustik und Signalverarbeitung und als Gestaltungsparameter für die musikalische Komposition. Die Spannweite und die Aktualität der einzelnen Themen (Programm und pdf-Dokumente zum Herbstworkshop finden sich auf der DEGA-Webseite [1].) war ein Anlass, dem Themenkomplex einen überblicksartigen Beitrag zu widmen.

Ursache der Abstrahlung von Musikinstrumenten

Die Abstrahlung stellt einen Zwischenschritt in der Kette der Musikübertragung vom Musizierenden über das Instrument und den Raum bis zu den Zuhörenden dar. Als akustischer Strahler wirken Luftsäulen oder Oberflächen des Instruments, die mit der Umgebung akustisch verbunden sind. Ursache dieser Schwingungen sind im musikalischen Kontext erzeugte und ggf.

Analysis and synthesis of dynamic directivity of musical instruments

Not only the temporal and spectral properties of musical instruments, but also their radiation characteristics are an important element of their specific timbre. Mediated through the acoustics of the performance space, also the lateral and rear radiation contributes to the sound of an instrument, both for the audience and the players themselves. A particular challenge is the representation of the complex directionality of musical instruments in virtual acoustic environments. This contribution addresses fundamentals of directivity measurements, origins of measurement errors, consequences of dynamic player motion as well as methods for the electro-acoustic simulation and auralization of sound sources with frequency-dependent directivities.

vom Instrument geformte Schallwellen. Die Effizienz, mit der die Abstrahlung erfolgt, ist oft vom Kompromiss geprägt zwischen der Klangformung innerhalb des Instruments und der Übertragung des Schalls für die Wahrnehmung außerhalb des Instruments. Während die Tonhöhen- und Klangeinstellung das Ergebnis einer Rückkopplung zwischen Resonatoren wie z. B. Zunge und Körper einer Pflöfe ist, stellt die Abstrahlung einen oft gezielt verursachten Verlust von Energie aus diesem Resonanzsystem dar, z. B. durch das Labium oder das passive (obere) Ende einer Pflöfe. Wie bei dieser kann die Abstrahlung an mehreren Orten simultan erfolgen. Aus den unterschiedlichen Schalldruckwerten, der räumlichen Anordnung und der relativen Phasenlage ergeben sich bei Musikinstrumenten oft sehr komplexe, meist schwer oder gar nicht analytisch beschreibbare Abstrahlungsverhältnisse.

Beschreibung und Darstellung der Abstrahlung

Die Abstrahlung von Instrumenten kann entweder über die Beschreibung aller an der Oberfläche des Instruments befindlichen Schwingungsquellen charakterisiert werden oder über die Wirkung der Summe aller Schwingungsquellen in einem Abstand zum Instrument. Die erste Beschreibung kann mit einer Vielzahl phasenrichtig erfasster Schallfeldgrößen wie Schalldruck oder Schallschnelle an der Oberfläche des Instruments erfolgen oder mit Hilfe einer Mik-

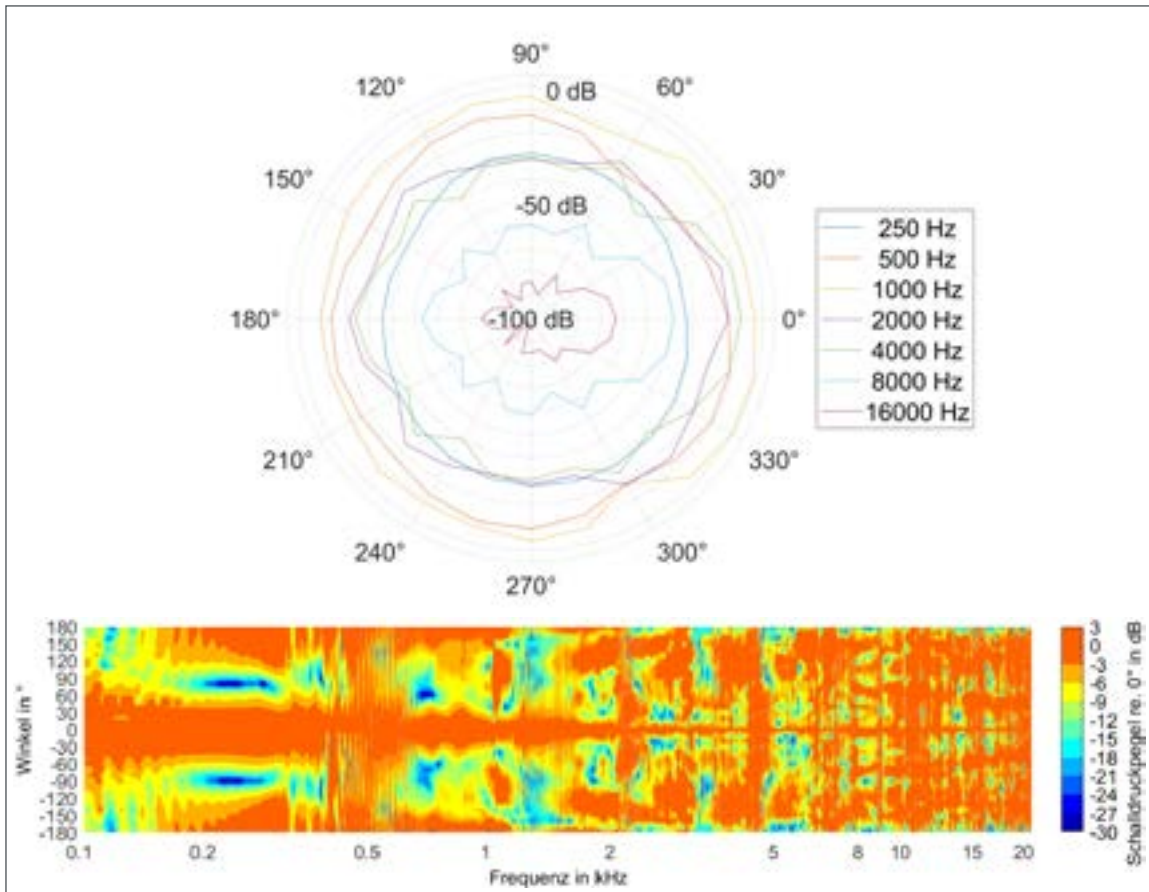


Abb. 1: Darstellung der Abstrahlcharakteristik einer Trompete mit einem Polardiagramm (oben) und einer Scheibe mit einem Isobaren-Diagramm (unten).

rofonarrayanordnung aus einer Distanz von wenigen cm auf die Oberfläche zurückgerechnet werden [2]. Die alternative Methode zur Erfassung der Abstrahlung ist die Mikrofonierung des Schallfelds in einigen Metern Entfernung vom Instrument, so dass an einem potenziellen Abhörort der von allen Abstrahlflächen und -öffnungen bewirkte überlagerte Schalldruck aufgezeichnet wird, so wie er an das Ohr eines Zuhörers oder einer ZuhörerIn gelangen würde. Diese Mikrofonierung müsste – um alle Richtungen zu erfassen – entweder auf einer Kugelfläche um das Instrument herum mit sehr vielen Mikrofonen oder aber wiederholt mit einem Mikrofon bei gedrehtem Instrument erfolgen. Ergebnisse umfangreicher Messungen an den meisten Orchesterinstrumenten finden sich in dem Standardwerk “Akustik und Musikalische Aufführungspraxis” von Jürgen Meyer [3], eine neuere Messreihe entstand in Kooperation des ITA Aachen und der TU Berlin [9].

Da die Abstrahlcharakteristik stark frequenzabhängig ist, ist ihre Auswertung in Frequenzbändern sinnvoll. Die Frequenzbreite der Bänder hängt von der Anwendung ab; oft genügt eine qualitative Beschreibung in Oktav- oder Terz-Frequenzbändern, manchmal ist eine genauere Analyse in Halbtontschritten oder noch feiner sinnvoll.

In Abbildung 1 ist oben die Abstrahlung einer Trompete in einem Polardiagramm dargestellt. Für jedes Frequenzband – hier Terzbänder im Oktavabstand – ist eine geschlossene Linie sichtbar, deren Radius dem Schalldruckpegel in einer Schnittebene (meist Horizontal- oder Vertikalebene senkrecht zur Hauptabstrahlrichtung des Instruments) entspricht. Oft erfolgt – wie hier – eine Normierung der Darstellung auf den maximalen Pegel aller Messungen. Diese Darstellung lässt erkennen, dass die Abstrahlung dieses Instruments bei tiefen Frequenzen kugelförmig, bei hohen jedoch zunehmend gerichtet ist. Beim Isobaren-Diagramm (Abb. 1 unten) werden die Schalldruckpegel über der Frequenz (Horizontal-achse) und dem Winkel (Vertikalachse) aufgetragen. Weitere Darstellungsformen der Richtcharakteristik sind z. B. der Isobarenplot, der häufig für Lautsprecher Anwendung findet und die 3D-Ballon-Darstellung (siehe Abb. 2). Die Messdaten stammen aus der Richtcharakteristik-Datenbank von Musikinstrumenten der TU Berlin [4].

Auswirkungen der Abstrahlung für die musikalische Performance

Die Abstrahlung bestimmt den Höreindruck der musikalischen Aufführung an einem Hörort im Raum und ist somit von großer Bedeutung sowohl

für z. B. die Aufstellung von Musikern auf einer Bühne als auch für die Position von Zuhörenden. Ist die Abstrahlung auf reflektierende Flächen in der Umgebung des Instruments gerichtet, wird von diesen der Schall zurückgeworfen und überlagert sich dem direkt vom Instrument abgestrahlten Schall. Dies führt zu einer Zunahme des Schalldruckpegels an der Position der Musizierenden aber auch benachbarter Personen, so dass z. B. Ensembles einander besser akustisch wahrnehmen und z. B. besser rhythmisch, intonatorisch und klanglich zusammen spielen können. Starke Reflexionen aus der Nähe können jedoch auch zu Auslöschung einiger Frequenzanteile des Klangs führen (destruktive Interferenz), was bei der Mikrofonierung zu beachten ist [5].

Auswirkungen reflektierender Körper bei Richtcharakteristik-Messungen

Idealerweise sollte die Messung der Schallabstrahlung von Instrumenten in einer reflexionsarmen Umgebung stattfinden, wie z. B. Freifeldräumen, um den Einfluss der Raumbegrenzungen und anderer schall-

reflektierender Flächen zu minimieren. Oftmals stellt aber bereits der Messaufbau mit den Befestigungen von Mikrofon(en), Drehteller und Halterungen für das Musikinstrument eine erhebliche Beeinträchtigung der Reflexionsfreiheit dar. In Abbildung 2 ist das Ergebnis einer Abstrahlungsmessung im Freifeldraum dargestellt, wobei im einen Fall keine besonderen Maßnahmen zur Unterdrückung von Reflexionen am Messaufbau durchgeführt wurden, im anderen Fall fast alle reflektierenden Flächen mit Absorptionsmaterial belegt wurden. Im Vergleich wird deutlich, dass die vermeintlich komplexe Abstrahlung im linken oberen Bild tatsächlich ein Artefakt unerwünschter Reflexionen ist. Weitere Einflüsse auf die Abstrahlung stellen auf Bühnen neben dem Boden, Wänden und anderen Musikinstrumenten insbesondere die Notenständer dar, deren Reflexionen ähnliche Schalldrücke erreichen wie der Direktschall [5]. Weitere Einflussfaktoren auf die Messung sind der Abstand des Messmikrofons bzw. der -mikrofone sowie der Einfluss der spielenden Musiker [6].

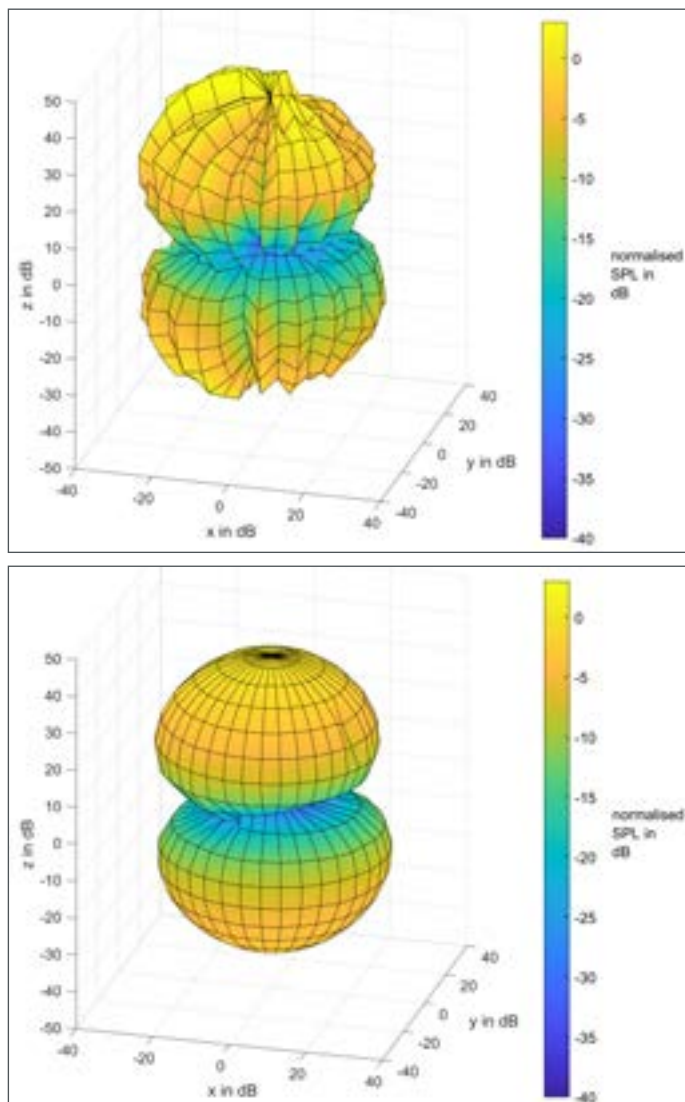


Abb. 2: Vergleich der Balloon-Darstellungen von Richtcharakteristik-Messung einer Scheibe ohne (links oben) und mit (links unten) optimierter Absorption auf reflektierenden Flächen (rechts).

Abbildungen: Nathan Flipo.



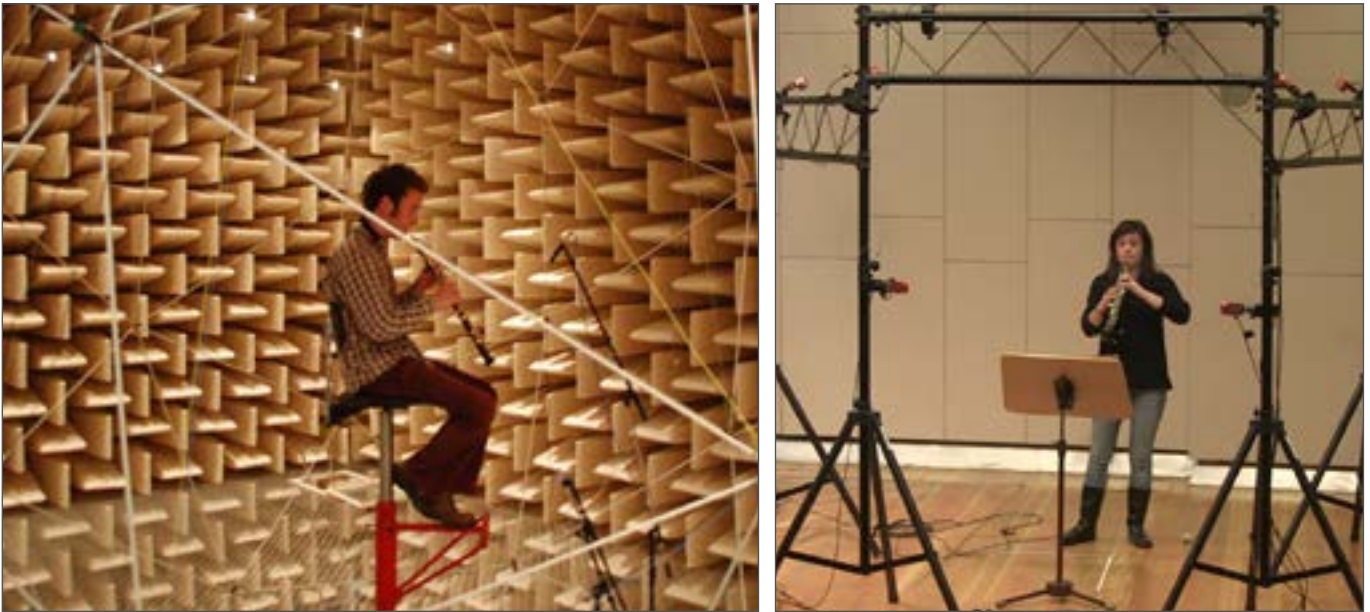


Abb. 3: Messung der Richtcharakteristik im reflexionsarmen Raum der TU Berlin (links) und Aufbau zum Aufzeichnen der Bewegungsdaten und des Audiosignals (rechts). Das Mikrophon wurde am Instrument befestigt, welches von acht Motion Tracking Kameras umgeben ist.

Dynamische Effekte

Akustische Musikinstrumente weisen, anders als technische Schallquellen, eine dynamische Richtwirkung auf. Diese variiert nicht nur mit dem gespielten Ton, sondern auch mit der Bewegung von Interpret/innen und ihrem Instrument während einer musikalischen Darbietung. Diese Spielbewegungen sind ein wichtiges Element der musikalischen Aufführungspraxis. Sie unterstützen die Kommunikation zwischen Musiker/in und Publikum nicht nur visuell [7], sondern führen auch zu einer Modulation des abgestrahlten Schallfeldes und damit zu einer Modulation des wahrgenommenen Schallereignisses am Hörerplatz. Die Größe und die perzeptive Relevanz dieser durch Spielbewegungen ausgelösten Änderungen des Schallfeldes wurde in der im Folgenden beschriebenen Studie empirisch untersucht.

Eine durch Spielbewegungen bedingte Modulation des Schallfeldes am Hörerplatz entsteht einerseits durch spektrale Änderungen, die sich aus einem Schwenken der frequenzabhängigen Richtcharakteristik ergeben, andererseits aus einer Änderung in der Anregung des Raums, wenn die frequenzabhängige Richtcharakteristik durch die Reorientierung des Instruments auf unterschiedliche Teile der Primär- und Sekundärstruktur des Raums trifft. Um den Einfluss der Bewegungen von Interpreten und Instrument auf das Klangerlebnis quantitativ zu untersuchen, wurde daher zum Einen die spektrale Modulation des Schallfeldes in nachhallfreier- und nachhallbehafteter Umgebung analysiert, zum Anderen wurde die Fluktuation raumakustischer Parameter nach ISO 3382 [8] ausgewertet. Der physikalischen

Auswertung folgte eine perzeptive Evaluation, um die Hörbarkeit von Spielbewegungen zu prüfen.

Mit Hilfe eines optischen Motion Tracking Systems (OptiTrack, Abb. 3, rechtes Bild) wurden die Spielbewegungen von 20 professionellen Musikern und Musikerinnen und ihrer Instrumente unter konzertähnlichen Bedingungen in stehender und sitzender Darbietung aufgezeichnet. Zusätzlich wurde das Audiosignal mit einem am Instrument befestigten Mikrophon aufgezeichnet. Die so erhaltenen Bewegungsdaten lassen sich auf bereits im Vorfeld gemessene Richtcharakteristiken ([4],[9]) aufprägen und somit das Abstrahlverhalten jedes Instruments synchron zu den erfassten Bewegungen virtuell rotieren. Daraus ergibt sich für den nachhallfreien Fall unmittelbar die spektrale Modulation an einem bestimmten Punkt im Raum. Eine Analyse des Schallfeldes in nachhallbehafteter Umgebung und die Untersuchung der Fluktuation raumakustischer Parameter erfolgte dann durch sequentielle raumakustische Simulationen der virtuell rotierten Schallquellen mit Hilfe der Software RAVEN, ein an der RWTH Aachen entwickeltes Programm zur raumakustischen Simulation und Auralisation [10]. Die zeitliche Auflösung der nacheinander durchgeführten Simulationen betrug 3 Hz. Bei einer Dauer der eingespielten Musiksequenzen von etwa 1 bis 4 Minuten ergaben sich so pro Musiksequenz zwischen 150 und 700 Datenpunkte. Als virtuelle akustische Umgebung diente ein Modell des Theater an der Wien, einer bekannten Aufführungsstätte für Musiktheater und Konzerte mit einer Nachhallzeit von $T_m = 1,4$ s. Der Empfänger befand sich im Zuhörerraum und 10 m entfernt von der schallabstrahlenden Quelle.

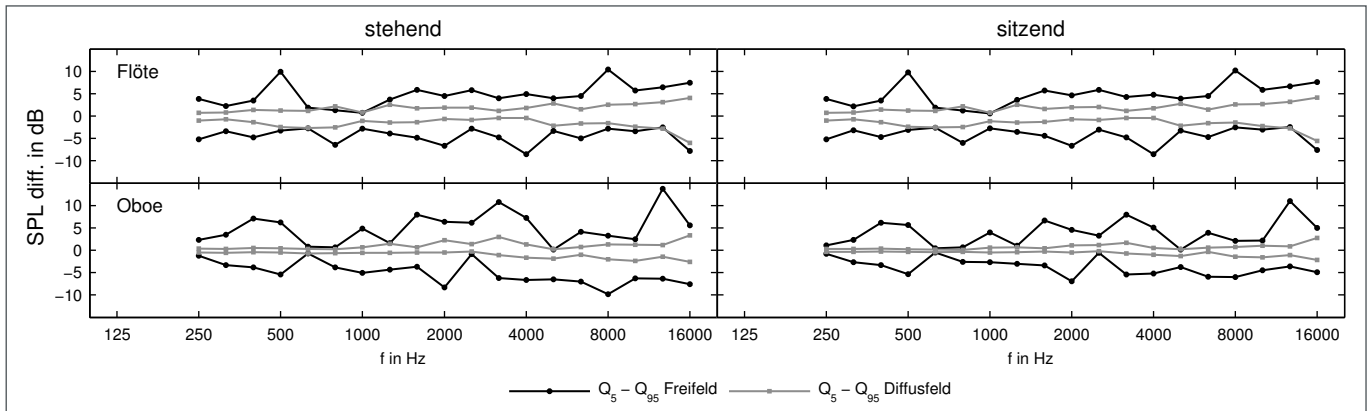


Abb. 4: Die durch die natürliche Bewegung des Musikinstruments induzierte, spektrale Fluktuation (5 %/95 % Quantile der Verteilung über die Dauer der Aufführung) für eine simulierte Schallquelle relativ zu einer statischen Quelle mit identischem Abstrahlverhalten. Gezeigt sind die Werte im Freifeld (schwarz) und im Diffusfeld (grau) sowie in sitzender und stehender Position für die Instrumente Flöte und Oboe. Bezugswert (0 dB-Linie) ist der Frequenzgang, der sich bei mittlerer Orientierung des Instruments (Medianwert der Bewegungsdaten) relativ zur Hörerposition ergibt.

Abbildung 4 zeigt, exemplarisch für die Instrumente Flöte und Oboe, die spektrale Fluktuation, welche durch die Bewegungen des Instruments, relativ zu einer statischen Quelle mit gleichem Abstrahlverhalten, am Hörerplatz induziert werden.

Die über alle spielbaren Terzbänder gemittelte spektrale Fluktuation beträgt in nachhallfreier akustischer Umgebung und in stehender Spielweise für die Flöte 9,2 dB und für die Oboe 10,1 dB. Die Werte sind etwas kleiner für die sitzende Position, ebenso in nachhallbehafteter Umgebung (Werte für alle Ins-

trumente in Tabelle 1).

Um den Einfluss der Spielbewegung auf das sich im Raum ausbildende Schallfeld zu charakterisieren, wurden zusätzlich zu den spektralen Änderungen raumakustische Parameter nach ISO 3382 aus den simulierten Raumimpulsantworten berechnet [11]. Dazu gehören gängige Werte zur Beschreibung musikalischer Aufführungsräume wie die Nachhallzeit (T_{20}), die Early Decay Time (EDT), das Klarheitsmaß (C_{80}) und die Deutlichkeit (D_{50}), das Stärkemaß (G) sowie der frühe seitliche Energieanteil (J_{LF}).

Tabelle 1: Maximale sowie über alle spielbaren Terzbänder gemittelte spektrale Fluktuation (Abstand der 5 % und 95 % Quantile der Verteilung über die Dauer der Aufführung), im Freifeld und Diffusfeld, in sitzender und stehender Position. Bezugswert (0 dB-Punkt) ist das Spektrum bei mittlerer Orientierung des Instruments (Medianwert der Bewegungsdaten) relativ zur Hörerposition.

	stehend						sitzend					
	Freifeld			Diffusfeld			Freifeld			Diffusfeld		
	mean in dB	max in dB	$f_{\max}$ in Hz	mean in dB	max in dB	$f_{\max}$ in Hz	mean in dB	max in dB	$f_{\max}$ in Hz	mean in dB	max in dB	$f_{\max}$ in Hz
Violine	9,7	17,8	500	2,8	5,6	10.000	8,1	14,5	3.150	2,7	6,0	6.300
Viola	8,8	18,1	800	2,0	3,7	500	7,8	15,8	800	1,7	3,3	500
Cello	–	–	–	–	–	–	0,9	3,5	630	0,4	0,8	10.000
Bass	1,6	4,7	2.000	0,4	0,6	3.150	–	–	–	–	–	–
Flöte	9,2	15,3	8.000	3,7	10,0	8.000	9,1	15,2	8.000	3,6	9,7	8.000
Oboe	10,1	20,1	12.500	2,1	5,9	8.000	7,6	14,6	6.300	1,4	4,9	8.000
Klarinette	4,9	10,4	8.000	1,8	4,8	6.300	5,4	11,9	6.300	2,2	6,6	6.300
Fagott	4,7	9,6	2.000	1,7	3,7	16.000	5,3	12,0	2.000	1,9	4,4	16.000
Trompete	3,9	8,4	1.600	3,9	5,3	1.600	2,9	6,1	1.600	2,9	4,2	1.600
Horn	6,9	12,3	5.000	1,4	2,7	16.000	4,7	8,2	5.000	1,0	2,2	800
Posaune	2,3	8,1	2.000	2,9	4,9	2.000	1,9	7,1	2.000	2,4	4,2	2.000

Tabelle 2: Die durch die natürliche Bewegung des Musikinstruments induzierte Modulation raumakustischer Parameter nach ISO 3382-1 (5 %/95 % Quantile der Verteilung über die Dauer der Aufführung). Werte, die den ebenwahrnehmbaren Unterschied (JND) überschreiten, sind rot markiert; st = stehend, si = sitzend.

	T ₂₀ in ms		C ₈₀ in dB		D ₅₀ in %		EDT in ms		G in dB		L _j in dB		J _{LF} in %	
	st	si	st	si	st	si	st	si	st	si	st	si	st	si
Violine	20	17	2,0	1,6	12,2	9,8	35	42	1,8	1,4	4,3	4,4	8,4	7,4
Viola	20	20	3,4	3,4	24,2	23,6	77	54	4,9	4,5	4,3	3,7	7,7	6,4
Cello	–	6	–	0,3	–	1,9	–	34	–	0,4	–	0,4	–	2,4
Bass	2	–	0,3	–	1,8	–	20	–	0,4	–	0,6	–	0,5	–
Flöte	29	30	2,9	2,9	12,6	13,0	461	461	1,9	1,9	3,7	3,8	16,4	16,4
Oboe	3	3	1,0	0,6	6,8	3,8	57	29	1,2	0,7	2,4	1,7	3,0	2,0
Klarinette	6	7	1,0	1,3	6,9	9,4	54	54	0,4	0,4	1,1	1,6	1,8	1,5
Fagott	22	30	1,4	1,3	10,4	9,1	35	25	1,7	1,5	4,0	4,4	7,1	7,8
Trompete	19	17	2,2	1,6	7,1	4,7	331	218	0,9	0,6	3,4	2,2	3,3	2,4
Horn	5	3	1,5	1,2	8,0	6,1	147	123	1,1	0,9	4,0	2,9	9,0	7,9
Posaune	18	13	1,5	1,3	3,6	2,8	152	155	0,6	0,5	3,3	2,7	1,5	1,1

und der späte seitliche Schallpegel (L_j). Sie beschreiben den Einfluss des Raums auf die Lautstärke der Schallquelle, die Dauer des Nachhalls, die Klarheit und Deutlichkeit von Musik und Sprache im Raum sowie die räumliche Verteilung der Schallreflexionen am Hörerplatz. Auch hier wurden die 5 %/95 % Quantile der Verteilung über die Dauer der Aufführung als Indikator für die Stärke der Modulation des räumlichen Schallfelds berechnet (siehe Tab. 2). Sie können im Hinblick auf ihre Wahrnehmbarkeit mit den in [8] angegebenen Unterscheidungsschwellen (just notable differences, JND) verglichen werden. Parameteränderungen oberhalb des JND sind ein Hinweis auf die Hörbarkeit dieser Modulationen. Sie sind in Tabelle 2 rot markiert.

Es zeigt sich, dass Parameter, die vor allem den frühen Anteil der Impulsantwort auswerten, wie C_{80} , D_{50} , EDT, J_{LF} , empfindlicher gegenüber Bewegungseinflüssen sind als Parameter für den späten Anteil der Impulsantwort, wie L_j und T_{20} . Für fast alle Instrumente überschreiten die Modulationen von C_{80} , D_{50} , EDT, J_{LF} und Modulationen des Stärkemaßes G die Schwelle der Hörbarkeit.

Da diese Streuungsmaße jedoch aus der Verteilung der Werte über die gesamte Dauer der musikalischen Darbietung abgeleitet sind, wurde zusätzlich ein Hörversuch durchgeführt, bei dem Versuchspersonen (VP) die Hörbarkeit des konkreten zeitlichen Verlaufs dieser spektralen und räumlichen Schallfeldmodulationen bewerten sollten. Es wäre schließlich denkbar, dass diese Änderungen jeweils so graduell erfolgen, dass sie während einer musika-

lischen Aufführung zu keinem Zeitpunkt hörbar in Erscheinung treten.

Im Hörversuch wurden 11 Probanden binaurale Auralisationen der Instrumente Violine, Flöte und Trompete vorgespielt. Jedes der drei Instrumente wurde dafür mit korrekter Richtcharakteristik im Raummodell des Theater an der Wien einmal mit statischer und einmal mit natürlich bewegter Richtwirkung simuliert. Die VP führten ABX-Tests durch, die aus jeweils 23 Trials bestanden. Konnte die VP den randomisiert vorgespielten Teststimulus X 18-mal oder häufiger richtig den beiden Referenzstimuli A (unbewegte Simulation) oder B (bewegte Simulation) zuordnen, so kann auf einem Signifikanzniveau von 5 % davon ausgegangen werden, dass sie die Simulation mit natürlich bewegtem Instrument zuverlässig von der statischen Simulation unterscheiden kann.

Abbildung 5 zeigt die Erkennungsrate des Tests für alle Versuchspersonen und Testbedingungen. Die nachhallfreien Auralisationen konnten von fast allen Probanden richtig zugeordnet werden. Nur zwei VP verfehlten das Signifikanzniveau um jeweils eine falsche Zuordnung. In nachhallbehafteter Umgebung sind die Unterschiede, wie bereits die technische Analyse gezeigt hat, geringer. Die nachhallbehafteten Auralisationen konnten von 6 VP nicht richtig zugeordnet werden, in 3 Fällen lag die Erkennungsrate nahe der Ratewahrscheinlichkeit von 50 %.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Spielbewegungen von musikalischen Interpreten als gestaltendes Element nicht nur einen visuellen Einfluss auf das wahrgenommene Musikereignis ausüben, sondern auch

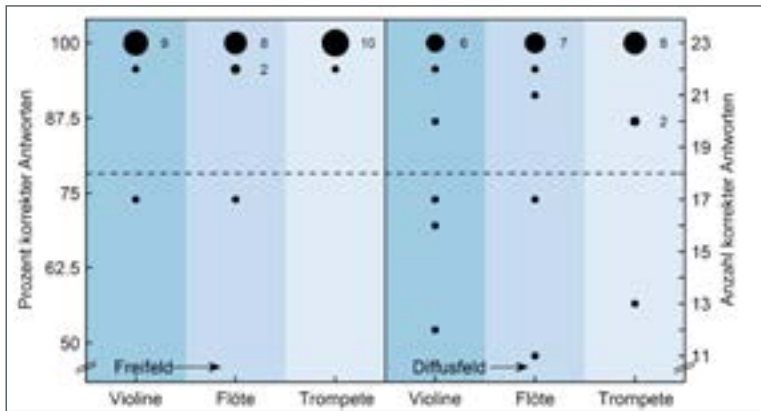


Abb. 5: Hörbarkeit von klanglichen Modulationen, die durch die natürliche Bewegung von Musikinstrumenten ausgelöst werden. Gezeigt sind die Erkennungsraten eines ABX-Tests für 11 Versuchspersonen und 6 Testbedingungen (drei Musikinstrumente $\times$ 2 räumliche Bedingungen). Die Größe der Punkte und die nebenstehenden Zahlen geben die Anzahl der Versuchspersonen mit identischen Ergebnissen an. Werte auf oder über der gestrichelten Linie sind signifikant über der Ratewahrscheinlichkeit und zeigen, dass der Unterschied zwischen einer statischen und einer bewegten Quelle zuverlässig erkennbar war.

auf akustischem Weg als Teil der Kommunikation zwischen Musiker/in und Publikum wirksam werden. Für die virtuelle Akustik stellt sich somit die Aufgabe, auch das bewegungsbedingte, dynamische

Verhalten musikalischer Instrumente und musikalischer Aufführungen bei der Auralisation natürlicher Schallquellen zu berücksichtigen, wenn alle perzeptiv relevanten Aspekte des akustischen Geschehens in der Simulation erhalten bleiben sollen.

Repräsentation und Wiedergabe

Musikinstrumente (einschließlich Musikerin/Musiker, etc.) können als kompakte Klangkörper aufgefasst werden, deren Richtwirkung am besten in ausreichend großer Entfernung in Richtungsanteile zerlegt wird. Ein solches richtungsbezogenes Klangabbild des Instruments ist theoretisch ein Zeitsignal $s(t)$, das für jede Abstrahlrichtung anders klingen darf, $s(t) = s(\theta, t)$, wobei θ der betrachtete Richtungsvektor ist. In dieser Form lässt sich ein richtungskontinuierliches Klangabbild in einer virtuellen Umgebung leicht durch Entnahme von Signalen an den benötigten Abstrahlrichtungen auralisieren, die über Schallausbreitungspfade im Raum an den Hörort übertragen werden. Alternativ kann die Auralisation durch einen geeigneten Kugellautsprecher erfolgen, der in den umgebenden physikalischen Raum projiziert. Dazu werden die Einzeltreiber des Kugellautsprechers so betrieben, dass sie das richtungskontinuierliche Klangabbild möglichst gut nachbilden.

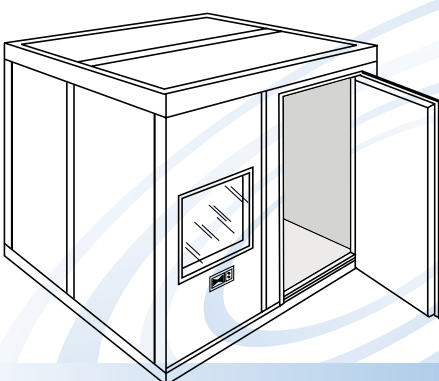
IAC Acoustics für Medizin und Forschung

Ein- und doppelwandige Akustikkabinen

IAC ist weltweit führender Hersteller und Lieferant von Akustik-Räumen, Kabinen und echofreien Kammern für die Hörforschung und -entwicklung sowie einer Vielzahl von Akustikprodukten mit nachgewiesener Wirksamkeit.

Akustiklösungen von IAC Acoustics

Langjährige Expertise, der Sie vertrauen können.



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

Dem benötigten Ideal eines richtungskontinuierlich auslesbaren Klangabbilds kann man sich mit endlichem Speicheraufwand nähern. Dazu wird ein in reflexionsarmer Umgebung an diskreten Richtungen aufgenommenes Instrument zur Interpolation in Kugelfunktionen $Y_n^m(\theta)$ zerlegt (Abb. 6). Ihre Richtungsauflösung lässt sich auf die Ordnung N begrenzen, und daraus resultiert ein begrenzter Bedarf an $(N+1)^2$ Koeffizientensignalen $\sigma_{nm}(t)$ für das richtungskontinuierliche Klangabbild

$$s(\theta, t) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n \sigma_{nm}(t) Y_n^m(\theta). \quad (1)$$

Das Signal des Klangabbilds $s(\theta, t)$ und seine zugehörigen Koeffizientensignale $\sigma_{nm}(t)$ werden häufig auch im Frequenzbereich ausgedrückt. Die Zerlegung $s(\theta, f) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n \sigma_{nm}(f) Y_n^m(\theta)$ gilt dort auch für die Signale $s(\theta, f)$ und $\sigma_{nm}(f)$ der zugehörigen Frequenzkomponenten.

Manche Instrumente führen zu starker Bündelung des Klangs, so z. B. Trompeten oder Posaunen, die den Schall stark gebündelt in die Austrittsrichtung am Schalltrichter abgeben. Solche Instrumente können gezielt Wandreflexionen bespielen, die dann im Publikum als scheinbarer Ursprung des Klangs gehört werden. Steht das Instrument selber nicht zur Verfügung, kann die Wirkungsweise durch Auralisation erzeugt werden.

Auralisation im physikalischen Raum: Kugellautsprecher

Kugellautsprecher (Abb. 7) bieten eine Möglichkeit, richtungsabhängige Klangabbilder in den umgebenden physikalischen Raum zu projizieren. Die Ansteuerung eines Kugellautsprechers ist mehrkanalig und erwartet im Falle des Ikosaederlautsprechers (IKO, [12]) die Koeffizientensignale $\sigma_{nm}(t)$

Abb. 7: Kugellautsprecher zur Projektion von Klängen mit Richtwirkung in den umgebenden Raum. Aus praktischen Gründen bildet häufig ein hohler Polyeder das tragende Gehäuse, auf dessen Flächen einzeln gespeiste Lautsprecher sitzen.

(a) 20-Kanal Ikosaederlautsprecher (IKO)



(b) 4-Kanal Würfellautesprecher



Abb. 6: Kugelflächenfunktionen bis zur Ordnung 3.

bis zur Ordnung $N=3$ als Eingang. Die Aufgabe der Signalverarbeitung bleibt somit, für jeden Eingang eine Richtwirkung entsprechend der Kugelflächenfunktionen (Abb. 6) zu erzeugen. Abbildung 8 zeigt die Bündelungswirkung des Ikosaederlautsprechers (IKO) beim Erzeugen einer technisch maximal möglichen Schallbündelung. Zum Zeichnen wurden offene Datensätze und Software verwendet: $12^\circ \times 11,25^\circ$ Richtwirkungsmessungen der Einzellautesprecher (<http://phaidra.kug.ac.at/o:67614>), ein 20×16 Filtersatz (<http://phaidra.kug.ac.at/o:67618>), und freie Softwarewerkzeuge (<http://opendata.iem.at>). Es wird deutlich, dass Schallbündelung ab 250 Hz bis 1.500 Hz auf $\pm 30^\circ$ fokussiert werden kann, und darüber hinaus mit räumlichen Fehlabbildungen gerechnet werden muss.

Auch bereits ohne die Bündelung natürlicher Instrumente zu simulieren, wird die künstliche Schallbündelung in der elektroakustischen Musik als kompositorisches Ausdrucksmittel genutzt. Wendt [13] hat für diese Anwendung zeitlich variierte Schallbünde-

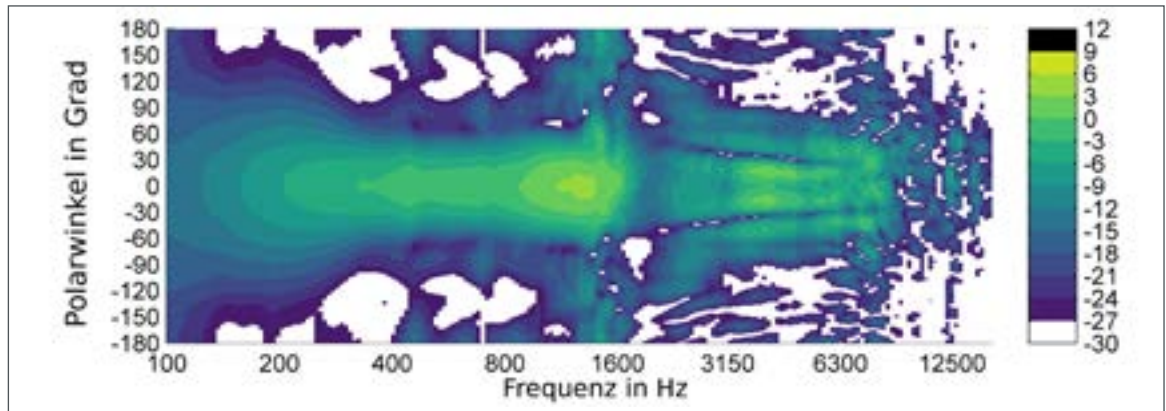


Abb. 8: Bündelungswirkung des Ikosaederlautsprechers (IKO) mit Farbstufen für den Schalldruck in dB für einen Horizontalschnitt, wenn die Bündelung auf 0 Azimut eingestellt ist. Die Bündelung fokussiert den Schallstrahl zwischen 150 Hz und 800 Hz auf den Winkelbereich von $\pm 30^\circ$ um die eingestellte Richtung. Bei hohen Frequenzen wird sie durch räumliche Aliase chaotischer, bleibt aber ausgerichtet.

lung untersucht. Die Ergebnisse in Abbildung 9 zeigen, wo man ein am Horizont abgegebenes Schallbündel hören würde, dessen Bündlungsrichtung entlang einer gleichförmig rotierenden Bahn kreist (Abb. 9(a)), oder ein solches, das auf den Hörplatz bündelnd beginnt, an Bündlung verliert, und wieder an Bündlung zunimmt (Abb. 9(b)).

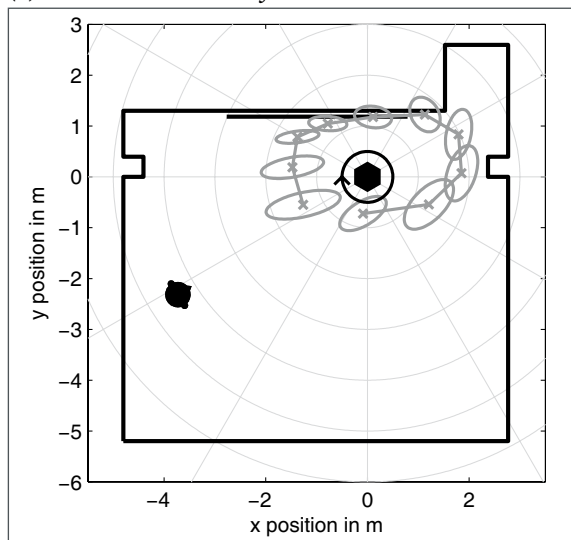
Mit der einstellbaren Schallbündelung wird nun auch beispielhaft ein gesamtes Richtungsabbild eines Instrumentes vorgestellt. Der Datensatz von TU Berlin und RWTH Aachen [4] bildet die Grundlage für das folgende Beispiel. Die Richtwirkungsdaten liegen für vereinfachte Richtwirkungskoeffizienten $\sigma_{nm}(f)$ in Terzbänder zusammengefasst im Frequenzbereich vor. Abbildung 10 zeigt für die laut gespielte, moderne Tenorposaune und ausgewählte Terzbänder um 1 kHz, 2 kHz und 4 kHz die Bündelung aus

diesem Datensatz (schwarz gestrichelt) und die mit dem IKO erreichbare Nachbildung im energetischen Terzbandmittel.

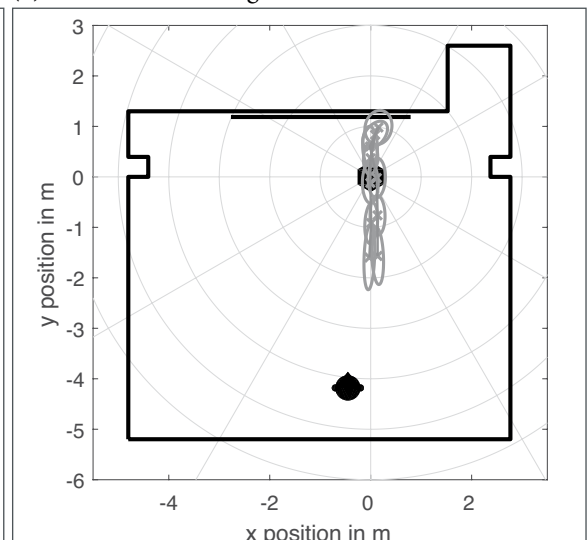
Dabei ergeben sich teilweise erhebliche Unterschiede aufgrund der begrenzten Bündelung des Kugellautsprechers (der Ikosaederlautsprecher bündelt bis maximal 3. Ordnung, die Messung bis 4. Ordnung), und über 1 kHz aufgrund räumlicher Fehlabbilder, hier stark ausgeprägt bei 2 kHz. Diese Abweichungen wirken groß, sie erweisen sich aber auch als etwas weniger kritisch im Vergleich zu Richtmustern, die ein beliebiger, nicht an die Abstrahlung der Trompete angepasster, fest orientierter Mehrweglautsprecher liefern würde. Entscheidend ist aber, dass sich nicht alle der technisch fehlerhaften Abbildungen perzeptiv als störend im Wiedergaberaum in Erscheinung erweisen. Ein fehlerbehafteter, gut gemachter Versuch, Schall-

Abb. 9: Positionen, die bei einer Projektion eines entlang des Horizont rotierenden Schallstrahls im Raum gehört werden können; Hörposition und Lautsprecher sind eingezeichnet, die Ellipsen geben die 95%-Vertrauensbereiche der halbsekündlich abgefragten Antworten an.

(a) Schallstrahl in umlaufender Kreisbahn



(b) variierte Bündelungsstärke



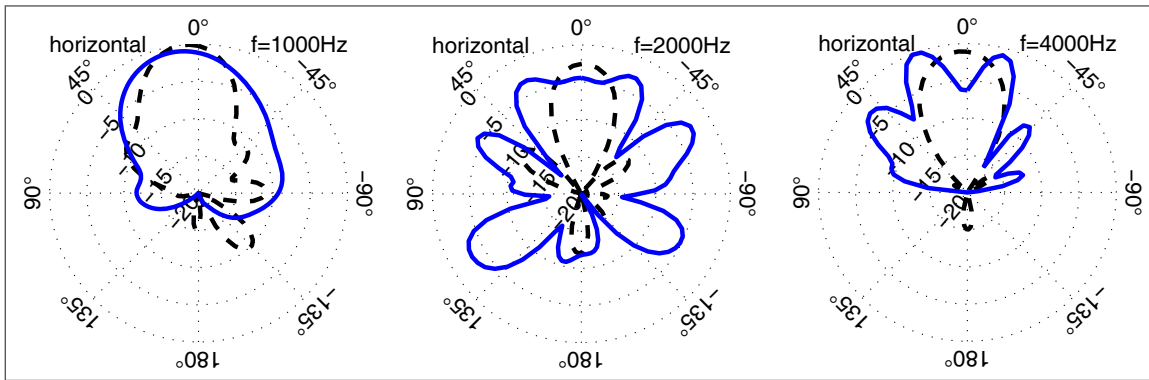


Abb. 10: Richtcharakteristik einer Tenorposaune (Polardiagramm, gestrichelt) und mit dem Ikosaederlautsprecher (blau) erreichbare Nachbildung in der Horizontalebene.

wiedergabe mit korrekter Schallbündelung über Kugellautsprecher zu erreichen, kann durch Anpassung des Direkt-zu-Diffusverhältnisses und der Wiedergabe dynamischer Spielbewegungen zu einer erfreulichen Natürlichkeitssteigerung führen.

Wiedergabe in der virtuellen Welt

Auralisationen bilden den Gesamtklang einer akustischen Umgebung in der computergestützten, virtuellen Welt nach, unter Einbeziehung der richtungsabhängigen Abstrahlung der Schallquellen $s(\theta, t)$. Dazu wird jeder einzelne akustische Ausbreitungsweg des Schalls, Reflexionen an Boden, Decke, Wänden, mit den betreffenden Richtungssignalen beschickt und an einem frei wählbaren Hörort zum Beispiel zu einem binauralen Signal zusammengesetzt. Anhand von Koeffizientensignalen $\sigma_{nm}(t)$ und einer Raumimpulsantwort mit der Richtungsabhängigkeit auf Quell- und Empfangsseite in Kugelflächenfunktionen $h_{nm}^{n'm'}(t)$ kann ein Ambisonisches Surround-Wiedergabesignal $\chi_{nm}(t)$ berechnet werden, vgl. [14, 15],

$$\chi_{n'm'}(t) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n h_{nm}^{n'm'}(t) * \sigma_{nm}(t). \quad (2)$$

Die gesuchte Raumimpulsantwort $h_{nm}^{n'm'}(t)$ mit Quell- und Empfangsrichtmustern in Kugelflächenfunktionen kann entweder gemessen [16] oder in hoch entwickelten Raumakustiksimulationsumgebungen simuliert werden [17, 18].

Dabei geht die Anwendung der Technologie schon über die raumakustische Betrachtung hinaus. Für die Musikproduktion in Digital Audio Workstations existieren mittlerweile des Plugins wie RoomEncoder und FdnReverb (<https://plugins.iem.at/>), die eine Auralisierung unter Berücksichtigung der Richtcharakteristik von Quelle und Empfänger durchführen. Auch moderne Spieleumgebungen und Simulationen im Bereich Augmented wie Virtual Reality bauen heutzutage auf diese Auralisierungskonzepte auf.

Zusammenfassung

Die Abstrahlung von Musikinstrumenten ist ein physikalisch besonders komplexes Phänomen, das sich unmittelbar auf die Wahrnehmung musikalischer Klänge im Raum auswirkt. Die Beschreibung der frequenzabhängigen Richtcharakteristik ist bereits für die akustische Messtechnik eine Herausforderung, die aufgrund der räumlichen Komplexität, aufgrund von Störeinflüssen durch den messtechnischen Aufbau und nicht zuletzt durch den Einfluss der Spielerinnen und Spieler selbst einen erheblichen Aufwand erfordert. Ein weiterer Aspekt sind die natürlichen Bewegungen von Musikerinnen und Musikern mit ihrem Instrument, die zu dynamischen Änderungen der Richtcharakteristik führen. Mit diesen Änderungen geht eine hörbare Modulation des Klangeindrucks im Raum einher, wie in einem Hörversuch gezeigt werden konnte. Eine perzeptiv überzeugende Simulation von Musikinstrumenten erfordert daher eine Nachbildung sowohl ihrer statischen wie dynamischen Eigenschaften. Im physischen Raum kann dies durch mehrflächig abstrahlende Lautsprecher erreicht werden, die eine Annäherung an die komplexen Richtcharakteristiken realer Instrumente liefern. In raumakustischen Simulationen können Raumimpulsantworten erzeugt werden, welche die Richtcharakteristik von Quelle und Empfänger als Parameter enthalten. Beide Verfahren beruhen auf der Zerlegung der Richtwirkung in Kugelflächenfunktionen. Für eine natürliche Darstellung musikalischer Instrumente in akustischen Simulationen könnte sich eine solche Behandlung der statischen und dynamischen Abstrahlung in ausreichend hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung als ein entscheidender Schritt erweisen.

Literatur

- [1] Programm und Folien des gemeinsamen Workshops der Fachausschüsse Musikalische Akustik und Virtuelle Akustik, Berlin, 2017.
<https://www.dega-akustik.de/fachausschuesse/ma/dokumente/herbstworkshop-2017/>

- [2] Bader, R.: Reconstruction of radiating sound fields using minimum energy method. *J. Acoust. Soc. Am.* 127(1), S. 300–308, 2010.
- [3] Meyer, J.: *Acoustics and the Performance of Music – Manual for Acousticians, Audio Engineers, Musicians, Architects and Musical Instrument Makers*. 5th Edition. Springer, New York, 2009.
- [4] Weinzierl, S.; Vorländer, M.; Behler, G.; Brinkmann, F.; von Coler, H.; Detzner, E.; Krämer, J.; Lindau, A.; Pollow, M.; Schulz, F.; Shabtai, N.R.: *A Database of Anechoic Microphone Array Measurements of Musical Instruments*. 2017.
<http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-5861.2>
- [5] Amengual Garí, S.V.; Kob, M.: Investigating the impact of a music stand on stage using spatial impulse responses. 142nd Convention of the Audio Engineering Society, Berlin, May 2017.
- [6] Kob, M.: Impact of Excitation and Acoustic Conditions on the Accuracy of Directivity Measurements. *Proc. ISMA, Le Mans, France*, S. 639–643, 2014.
- [7] Vines, B.W.; Krumhansl, C.L.; Wanderley, M.M.; Dalca, I.M.; Levitin, D.J.: Music to my eyes: Cross-modal interactions in the perception of emotions in musical performance. *Cognition*. 118(2), S. 157–170, 2011.
- [8] ISO 3382–1:2009 *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces*, 2009.
- [9] Shabtai, N.R.; Behler, G.; Vorländer, M.; Weinzierl, S.: Generation and analysis of an acoustic radiation pattern database for forty-one musical instruments. *J. Acoust. Soc. Am.* 141(2), S. 1.246–1.256, 2017.
- [10] Schröder, D.; Vorländer, M.: RAVEN: A Real-Time Framework for the Auralization of Interactive Virtual Environments. *Proc. of Forum Acusticum, Aalborg, Denmark*, S. 1.541–1.546, 2011.
- [11] Berzborn, M.; Bomhardt, R.; Klein, J.; Richter, J.G.; Vorländer, M.: The ITA-Toolbox: An Open Source MATLAB Toolbox for Acoustic Measurements and Signal Processing. *Fortschritte der Akustik – DAGA 2017, Kiel*, S. 222–225, 2017.
- [12] Zotter, F.; Zaunschirm, M.; Frank, M.; Kronlachner, M.: The Icosahedral Loudspeaker: A Beamformer to Play with Wall Reflections. *Computer Music Journal* 41(3), S. 50–68, 2017.
https://doi.org/10.1162/comj_a_00429
- [13] Wendt, F.; Sharma, G.K.; Frank, M.; Zotter, F.; Höldrich, R.: Perception of Spatial Sound Phenomena Created by the Icosahedral Loudspeaker. *Computer Music Journal* 41(1), S. 76–88, 2017.
https://doi.org/10.1162/COMJ_a_00396
- [14] Weinzierl, S.; Vorländer, M.: Room Acoustical Parameters as Predictors of Room Acoustical Impression: What Do We Know and What Would We Like to Know? *Acoustics Australia* 43(1), S. 41–48, 2015.
<https://doi.org/10.1007/s40857-015-0007-6>
- [15] Zotter, F.; Staackmann, A.U.: Simulation of Room Transfer Functions with Directivity on the Basis of Modes. *Fortschritte der Akustik – DAGA 2017, Kiel*, S. 1.430–1.433, 2017.
- [16] Noisternig, M.; Klein, J.; Berzborn, M.; Reicher, A.; Warusfel, O.: High-Resolution MIMO DRIR Measurements in an Opera Hall. *Fortschritte der Akustik – DAGA 2016, Aachen*, S. 1.115–1.117, 2016.
- [17] Pelzer, S.; Aspöck, L.; Schröder, D.; Vorländer, M.: Interactive Real-Time Simulation and Auralization for Modifiable Rooms. *Building Acoustics* 21(1), S. 65–73, 2014.
<https://doi.org/10.1260/1351-010X.21.1.65>
- [18] Poirier-Quinot, D.; Katz, B.F.G.; Noisternig, M.: EVERTims: Open source framework for real-time auralization in architectural acoustics and virtual reality. *DAFx-2017, Edinburgh*. ■

Prof. Dr.**Malte Kob***Hochschule für Musik, Detmold***David Ackermann***TU Berlin,**Fachgebiet Audio-kommunikation***Prof. Dr.****Stefan Weinzierl***TU Berlin,**Fachgebiet Audio-kommunikation***Dr. Franz Zotter***Kunstuniversität**Graz, Institut für**Elektronische Musik und Akustik*

Thesen zur Akustik anspruchsvoller Räume

Teil 2: Bass-Verhältnis und Schallbelastung in kleineren Räumlichkeiten

Helmut V. Fuchs

Die Nachhallzeit als raumakustisches Kriterium

In Teil 1 wird diskutiert, warum die Absorption an Decke und Wänden eines Raumes viel über dessen akustische Qualität aussagt. Ihr tieffrequenter Anteil ist bei den größeren Räumen stets von besonderer Bedeutung. Man könnte zwar meinen, dass ein $BR > 1$ (Erläuterung siehe [1]) die meist schwächere Schallemission der Instrumente und Stimmen sowie die geringere Empfindlichkeit und das schnellere Abklingen der Lautstärke im menschlichen Hören durch längeres Nachhallen im Raum bei den Tiefen irgendwie ausgleichen könne. Dieser rein energetischen Vorstellung stehen aber destruktive Interferenzen der direkten Schallwellen mit frühen Reflexionen von den lateralen Raumbegrenzungen bei tiefen Frequenzen entgegen. Diese können die Klarheit von Musik und Deutlichkeit von Sprache beim Hörer beeinträchtigen und daher ein $BR \leq 1$ nahelegen. Sollte bei kleineren Räumen etwa ein $BR > 1$ eher tolerierbar sein? Dagegen spricht schon eine ganz simple praktische Beobachtung: Wenn ein Büro, Unterrichts- oder Speiseraum mit rundum schallharten Begrenzungen sich sukzessive mit Personen füllt, bringen diese mindestens so viel Absorption mit wie eine konventionelle „Akustikdecke“ und entsprechend absorbierende Wandpaneele, allerdings wie diese nur bei hohen und mittleren Frequenzen. Und immer steigt deswegen der Schallpegel im Raum mit der Belegung und gemeinsam mit dem BR kontinuierlich an. Erst wenn man dafür sorgt, dass die Nachhallzeit (als einfaches integrales Maß für die Absorption im Raum) auch bei den Tiefen begrenzt wird, sinkt der Pegel deutlich, weil diese Maßnahme nicht nur physikalisch, sondern auch psychoakustisch auf die Nutzer einwirkt, die hier Täter und Opfer zugleich sind.

Die Schallbelastung durch schlechte Raumakustik

Hier geht es um die große Masse der kleineren Büro-, Konferenz-, Unterrichts-, Probe- und Speiseräume. In diesen sollte eigentlich nicht das architektonische Design, sondern die ergonomische Funktion ganz im Vordergrund stehen – getreu dem Prinzip „*form follows function*“. Jede Kommunikation zwischen Sprechern oder Musikern verlangt gleichermaßen nach Deutlichkeit und Klarheit in allen Details, um Arbeit bzw. Freizeit effizient bzw. behaglich zu gestalten.

Insbesondere sollte der Raum nicht schuld daran sein, dass die von seinen Nutzern darin erzeugten Schalldruckpegel die Ohren betäubend, die Nerven belastend, das Verstehen und Lernen erschwerend sowie die Gesundheit schädigend anwachsen können. Aber unter diesen Belastungen hat z. B. ein großer Teil der Lehrenden und Lernenden in Deutschland täglich stundenlang zu leiden!

Auch dieser skandalöse Zustand hat etwas mit fehlender Absorption bei tiefen Frequenzen zu tun: in den genannten Räumlichkeiten liegt das Bassverhältnis nach Gleichung (2) in [1] fast immer weit über 1, nicht selten bei Werten um 2. Dazu heißt es bei H. Kuttruff: „Nach tiefen Frequenzen zu sollte die Nachhallzeit eher etwas kürzer sein, da sonst die für die Sprachverständlichkeit wichtigen höheren Komponenten des Sprachspektrums verdeckt werden“ [2] und auch bei M. Vorländer: „Für die Sprachverständlichkeit ist vorteilhaft, wenn die Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen niedriger ist als im mittleren Frequenzbereich“ [3] sowie in einem Sachbuch zum Thema: „Für tiefe Frequenzen sollte die Nachhallzeit nicht ansteigen“ [4]. Alle könnten sich dabei auf die einleitend zitierten alten Meister berufen, siehe auch [5, Abschn. 11.6 und 13.4]. Ebenso empfahl die DIN 18041–2004 eine solche Auslegung der Nachhallzeit. 2005 wurde dergleichen in ÖNORM B 8115 sogar baurechtlich festgelegt. Umso unverständlicher ist der in der DIN 18041–2016 tolerierte Anstieg gemäß Abbildung 1 in [1]. Gegen diesen Rückschritt wendet sich auch dieser Teil 2, weil er wissenschaftlichen Erkenntnissen zur Sprachverständlichkeit und praktischen Erfahrungen aus Sanierungen z. B. von Klassenzimmern, Speisräumen oder Orchestergräben widerspricht. Tatsächlich lässt sich mit der richtigen Bedämpfung der Räume nicht nur Schall physikalisch angemessen absorbieren, sondern zusätzlich rückwirkend die „Lärmemission an der Quelle“, den Stimmen und Instrumenten, mindern. Aber der Reihe nach:

Die Verwischung von Sprache durch Nachhall

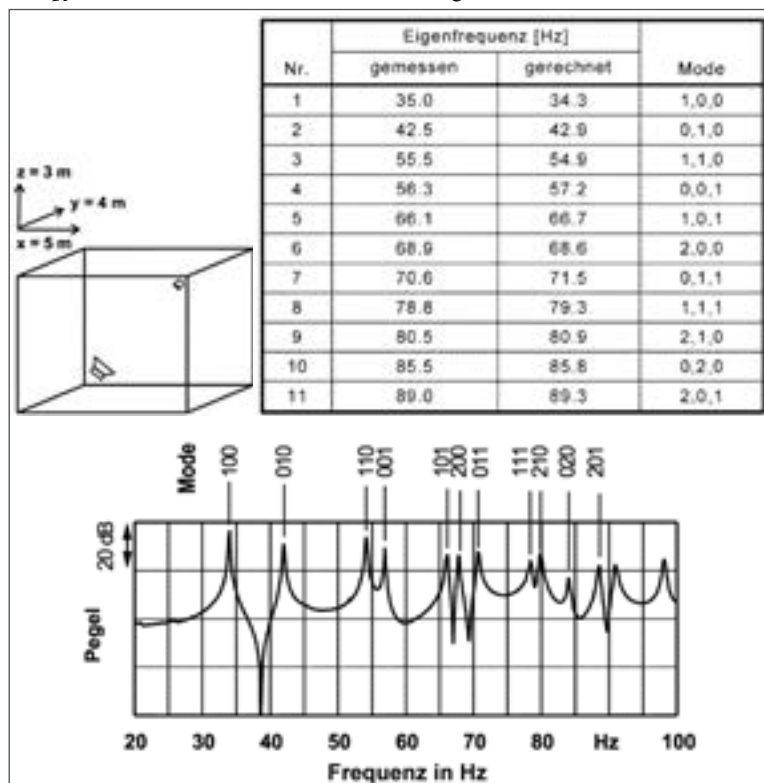
Dass ein Sprecher, eine Sprecherin trotz bester Artikulation nicht verstanden wird, kann an einer zu schwachen Stimmkraft oder/und einem zu langen Nachhall liegen. Dieser kann in einem größeren Raum aufeinander folgende Silben mit ähnlichem Spektrum bis zur Unkenntlichkeit verschmelzen.

Tab. 1: Verwischung von Silbenfolgen mit der Frequenz f_p durch ihren eigenen Nachhall T in s im Raum

f_p [s ⁻¹]	Δt_p [ms]		ΔL_T [dB]				
		T [s]	5	2,5	1,25	0,63	0,31
16	63		0,8	1,5	3	6	12
8	125		1,5	3	6	12	24
4	250		3	6	12	24	
2	500		6	12	24		
1	1.000		12	24			

Nach [6, Abschn. 3.5] beträgt die durchschnittliche Silbendauer Δt_p etwa 125 bis 500 ms entsprechend einer Folgefrequenz f_p von 2 bis 8 Silben pro s. Wenn nur eine Silbe pro Sekunde ausgesendet würde, könnte diese selbst bei Nachhallzeiten von $T = 2,5$ bzw. 5 s nicht mit einer (gleich laut angenommenen) nachfolgenden verschmelzen, weil ihr Raumpegel inzwischen (überschlägig) schon um $\Delta L_T = 24$ bzw. 12 dB abgeklungen wäre (siehe Tabelle 1). Bei normaler Sprechweise ($f_p = 4 \text{ s}^{-1}$, $\Delta t_p = 250 \text{ ms}$, Zeile 3 in Tab. 1) sollte aber schon $T = 2,5 \text{ s}$ mit $\Delta L_T = 6 \text{ dB}$ einen Verwischungseffekt verursachen, insbesondere wenn

Abb. 1: Diagonal über Eck gemessene Übertragungsfunktion eines unge-dämpften Quader-raumes mit den Abmessungen $5 \times 4 \times 3 = 60 \text{ m}^3$



die nachfolgende Silbe derselben oder einer anderen Quelle beim Hörer nicht mit gleichem, sondern mit einem etwas geringeren Anfangspegel ankommt. Dass bei viel schnelleren Tonfolgen von Musikinstrumenten ($f_p = 16$ oder 32 pro Sekunde) in einem großen Raum mit einer mittleren Nachhallzeit von bis zu 3 s, etwa wie in Teil 1 (dort Abb. 2) beschrieben, das Nachklingen zu keiner Verwischung führen muss, liegt daran, dass der Raum zwischen zwei Tönen überhaupt nicht anklingen kann und das Zuhören hier ganz wesentlich vom Direktschall und den frühen Reflexionen bestimmt wird. Bei einem Nachhall unter 1 s, wie er in kleinen Räumen generell anzustreben ist, sollte diese Art der Verwischung aber eigentlich nicht stören. Dass man aber gerade hier oft sein eigenes Wort nicht mehr versteht, hat ganz andere Gründe, die im Folgenden besprochen werden sollen.

Die Anregung diskreter Raum-Resonanzen bei tiefen Frequenzen

In großen Räumen kann die Überlagerung von Direktschall mit frühen Reflexionen von Begrenzungsflächen bei tiefen Frequenzen die Klarheit von Musik und Verständlichkeit von Sprache einschränken [1, Tab.2]. Dem gegenüber werden in kleinen Räumen durch jede Stimme und alle Geräusche ganz unmittelbar (ohne merkliches Einschwingen) stehende Wellen nach Art eines kompakten Hohlraum-Resonators angeregt. Diese Eigenresonanzen (Moden) des Raumes stören unterhalb einer nach M. R. Schröder benannten Frequenz f_s

$$f_s / \text{Hz} = 2000 \sqrt{\frac{T / \text{s}}{V / \text{m}^3}}, \quad (1)$$

bei akustischen Messungen und – von weniger sensiblen Nutzern oft unbemerkt – ebenso jede Unterhaltung. Die Frequenz f_s ist nicht von den Proportionen des Raumes abhängig, sondern wesentlich von dessen Volumen V und Nachhallzeit T . Mit den mittleren Abmessungen l_x, l_y, l_z lassen sich die diskreten Resonanzfrequenzen auch bei schrägen Wänden, wie oft in Hallräumen, nach

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}; \quad n_x, n_y, n_z = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

mit der Schallgeschwindigkeit c_0 gut berechnen und in der Übertragungsfunktion durch entsprechende Pegelspitzen bestätigen, siehe z. B. Abbildung 1 und [5, Kap. 2]. Diese können nicht nur alle tonalen Spektren stark verfärben, sondern auch tieffrequente Sprachkomponenten, die im Freifeld gemessen weniger Energie als bei mittleren Frequenzen aufweisen, erheblich verstärken – mit schädlichen Folgen, die im Folgenden angesprochen werden.

Die Verdeckung hoher durch tiefe Frequenzen

Die Moden können, wenn sie nicht angemessen bedämpft werden, den Raum mit einem für Sprache wie für Musik inhaltsleeren, für jede Art des Kommunizierens und Musizierens schädlichen Dröhnen füllen. Dieses kann aber nicht nur die tieferen bis mittleren Frequenzkomponenten verdecken, die gemäß Abbildung 2 zwar im Mittel energetisch dominant erzeugt werden, die aber gemäß Abbildung 3 für die Sprachverständlichkeit von geringerer Bedeutung sind. Wie in Abbildung 4 am Beispiel eines Störpegels von 20 bis 80 dB bei 200 Hz dargestellt, sorgt vor allem eine unsymmetrische Maskierung dafür, dass die für die Verständigung viel wichtigeren, jedoch stets schwächeren Frequenzanteile der Konsonanten im kHz-Bereich viel stärker verdeckt werden. In größeren Räumen liegen dessen Eigenresonanzen im interessierenden Frequenzbereich viel dichter beieinander und stören nicht in gleicher Weise.

Die Lombard-Effekte beim Sprechen

Die Störung und Verdeckung durch die Anregung akustisch unzureichend konditionierter Räume wäre weniger schwerwiegend, wenn nicht beim Kommunizieren wie beim Musizieren ein nach E. Lombard benannter Effekt einträte. Danach wird die Stimme angehoben, wenn der Störpegel ansteigt, der durch andere Stimmen hervorgerufen wird, die wiederum ihrerseits als Reaktion auf den für sie jetzt stärkeren Störpegel im Raum angehoben werden u.s.w. [9]. Dieses Phänomen ist zwar seit Langem bekannt. Aber erst kürzlich wurden dazu in [10] sehr aufschlussreiche quantitative Ergebnisse präsentiert: Man ermittelte diese unwillkürliche Stimmanhebung

Abb. 3: Beitrag der Frequenzkomponenten in der Sprache für deren Verstehen nach [7, Kap. 10]

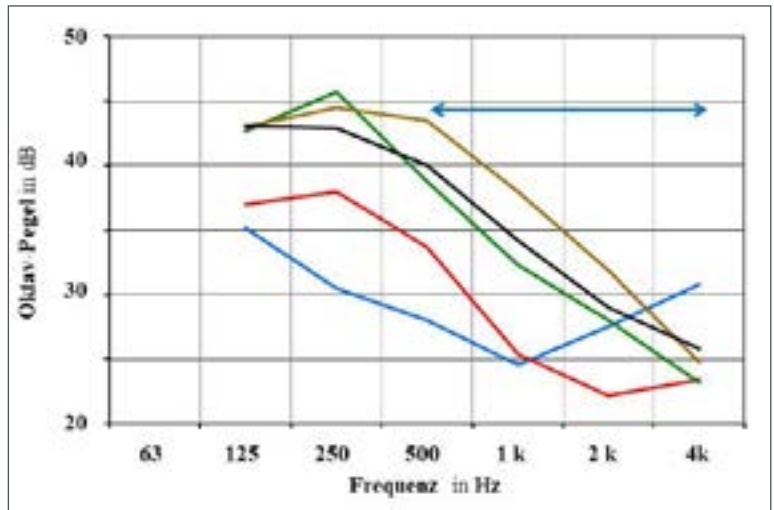
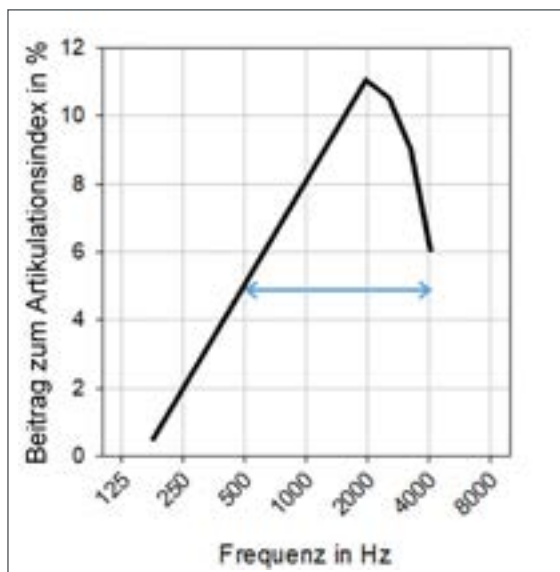
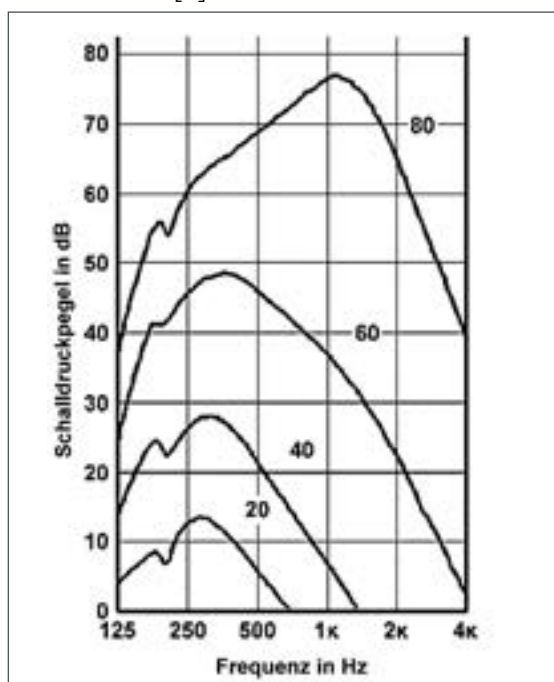


Abb. 2: Charakteristische Spektren von Sprachlauten, gemessen ab 125 Hz im Freifeld nach [6, Abschn. 3.3]; Frikative f,s,x (blau), Explosive p,t,k (rot), Halbvokale w,l,r (grün), Vokale a,e,o (braun), Mittelwert (schwarz)

(„vocal effort“) mit nacheinander 10 weiblichen und 10 männlichen normal hörenden Sprechern im Alter zwischen 18 und 34 (im Mittel 22) Jahren. Diese wurden in einer 14 m³ großen reflexionsarmen Kabine einem scheinbar aufmerksamen Zuhörer-Dummy in 2,5 m Abstand gegenüber gesetzt. Sie waren angehalten, einen ausgewählten, aus 6 Sätzen bestehenden Text so vom Blatt vorzulesen, dass sie sich vom so dargestellten Zuhörer bei unterschiedlichen Störpegeln immer gleich gut verstanden fühlten. Beim Vorlesen wurden sie über einen Studio-Monitor aus 2,5 m Entfernung in 5 dB-Schritten mit Pegeln zwi-

Abb. 4: Verschiebung der Hörschwellen durch einen maskierenden Ton bei 200 Hz und Pegeln zwischen 20 und 80 dB nach [8]



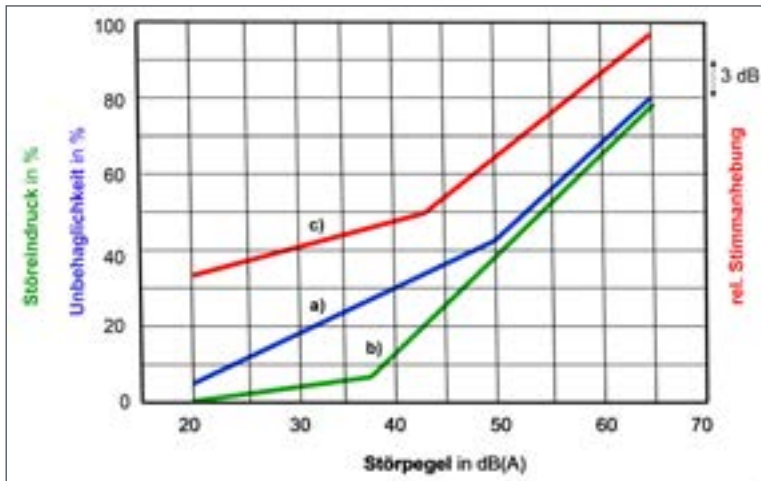


Abb. 5: Lombard-Effekte als Funktion stationärer Störpegel („rosa“ Rauschen), gemessen als a) Unbehaglichkeit, b) Störeindruck und c) Stimmanhebung bei jungen, normal hörenden Erwachsenen nach [10]

schen 20 und 65 dB(A) beschallt. Sie lasen so mit einem Störabstand $\text{SNR} \geq 17$ dB. Außerdem sollten die Testpersonen dabei zu jeder dieser 10 Geräuschsituationen zum einen den von ihnen subjektiv wahrgenommenen Grad der Störung ihrer Vorlesung („perceived noise disturbance“) beurteilen und zum anderen ihr eigenes Unbehagen („perceived vocal discomfort“) einschätzen.

Im Blick auf die Anregung tiefer und die Verdeckung hoher Frequenzen gemäß den vorstehenden beiden Abschnitten erscheint die bei dieser Untersuchung gewählte spektrale Charakteristik des stationären Störgeräusches sehr sinnvoll, nämlich „rosa“ Rauschen, dessen Energiedichte zu tiefen Frequenzen hin umgekehrt proportional zunimmt. Sowohl der objektiv festgestellte Anstieg des mittleren Sprechpegels ΔL in dB als auch die subjektiv bestimmten Parameter Störung und Unbehaglichkeit in % zeigten, wie nicht anders zu erwarten, zwar eine unterschiedlich starke Streuung. Trotzdem erscheinen die hier aus [10, Figure 1] in Abbildung 5 zusammengestellten Ergebnisse logisch.

Die Forscher fanden zwar wider Erwarten keinen richtigen Startpegel für das Einsetzen der Lombard-Effekte, aber doch eine Art Knick in allen 3 Anstiegen, etwa bei 49,5 dB(A) für die persönliche Unbehaglichkeit, 37,4 dB(A) für den funktionellen Störeindruck und 43,3 dB(A) für die sehr starke Stimmanhebung, den eigentlichen Lombard-Reflex. Wie gut ein Sprecher sich selbst hören kann, hat also tatsächlich einen deutlichen Einfluss auf die von ihm produzierte Sprache. Man bedenke, dass beim Anwachsen des Raumpegels von moderaten 50 auf schon etwas unangenehme 65 dB(A) nach Abbildung 5c eine Stimmanhebung um 10 dB zur Folge hat. Doch mit 65 dB(A) ist für viele Lehrer, Schüler und Restaurantbesucher die Spitze des Leidens noch längst nicht erreicht –

ganz zu schweigen von den Expositions-Pegeln über 90 dB(A), denen Musiker an ihren Arbeitsplätzen wie Orchestergräben und Proberäumen leider ausgesetzt sind, siehe [5, Abschn. 13.8]!

Ornithologen haben übrigens beobachtet, dass Singvögel ebenfalls in lauter Umgebung ihre Stimmkraft, etwa angepasst an den wachsenden innerstädtischen Lärm, verstärken, um sich so ihrem Auditorium besser hörbar zu machen. Die Ergebnisse in [10] machen deutlich, warum eine andere sehr nützliche Fähigkeit des menschlichen Hörsystems, jedenfalls in raumakustisch schlecht konditionierten kleinen wie großen Räumen, keine Chance bekommt: der Cocktail-Party-Effekt.

Der Cocktail-Party-Effekt

Mit gesunden binauralen Hörsystemen können Menschen und Tiere bei entsprechender Ausrichtung und Konzentration Schallquellen gut orten und wahrnehmen. Nur so werden die wunderbaren Hörerlebnisse bei stereophoner Wiedergabe von Sprache und Musik in Studioqualität erst möglich. Nach [11, Abschn. 1.2.5] hilft diese Fähigkeit nicht nur Musikern im Ensemblespiel, sondern auch einem Hörer bei mehreren ihn umgebenden Sprechern, eine Stimme gezielt herauszuhören, sofern der interessierende Schall um etwa 10 bis 15 dB über der durch den Störpegel bedingten Mithörschwelle liegt. Nach [12] kann demnach durch diesen „Cocktail-Party“-Effekt die Verständlichkeitsschwelle bei rundum verteilten Schallquellen einen bis zu 9 dB günstigeren Wert annehmen, als wenn sämtliche Schallsignale aus nur einer Richtung kämen. Übrigens haben z. B. Katzen auf der Jagd nach einer Maus nicht nur dieses „Ohrenspitzen“ optimal trainiert, sondern können ihr Hörsystem gezielt auf die hohen Frequenzen des Raschels im Gras scharf einstellen und die Störung durch tiefe Frequenzen gleichzeitig stark reduzieren. Eine solche Fähigkeit besitzt der Mensch leider nicht und ist deshalb den Raum-Moden und Lombard-Effekten schutzlos ausgeliefert, wenn er sie raumakustisch nicht in den Griff bekommt. Umso wichtiger ist es daher, auch in kleineren Räumen von vornherein mit absorbierenden Maßnahmen für akustische Transparenz zu sorgen:

Das Sprachverstehen bei unterschiedlicher Nachhall-Charakteristik

Die zuvor nach [9, 10] dokumentierten rein subjektiven bzw. intuitiven Befunde beruhen auf unterschiedlich gutem Verstehen der eigenen Sprache, welches bereits ohne einen Einfluss des jeweiligen Raumes, z. B. durch Hinzutreten weiterer Sprecher, reduziert werden und so eine Lautheitsspirale in Gang setzen kann. Aber bekanntlich bestimmen ne-

ben den Quellen im Raum auch dieser selbst den kumulierten Schalldruckpegel und damit rückwirkend auch die Sprachverständlichkeit. In einem ersten Versuch, diese quantitativ zu bestimmen, wurde der in Abbildung 1 angesprochene Laborraum gemäß Abbildung 6 mit unterschiedlichen Schallabsorbern konditioniert [13, Abschn. 11.4]:

- a) stark zu den tiefen Frequenzen abfallend ($BR \approx 0,63$) entsprechend dem Foto in Abbildung 6
- b) näherungsweise konstant zwischen 63 und 8 kHz ($BR \approx 1$)
- c) stark zu den tiefen Frequenzen ansteigend ($BR \approx 3,2$).

Probanden im Alter zwischen 20 und 50 Jahren testeten, frontal vor einem Studio-Monitor (etwa wie der Kunstkopf in Abbildung 6) im Abstand von ca. 3 m platziert, die Silbenverständlichkeit nach einem standardisierten Verfahren mit Logatomen bei stets gleichem Nutz- und Störsignal („rosa“ Rauschen zwischen 20 Hz und 20 kHz). Im unbedämpften Raum mit einer Nachhallzeit bis über 4 s wurden so im Mittel kaum mehr als 10 % der Silben richtig verstanden. Im Fall a) lag die Verständlichkeit mit etwa 68 % am höchsten und im Fall c) mit 53 % deutlich darunter, obgleich hier die mittlere Nachhallzeit nur etwa halb so groß gemessen wurde. Die gleichmäßig niedrige Nachhallzeit von ca. 0,4 s im Fall b) ergab wider Erwarten mit 59 % nicht den höchsten Wert.

Von nahezu allen Testpersonen wurde die Testumgebung a) als die behaglichste empfunden und die Silbenverständlichkeit auch subjektiv hoch geschätzt. Demgegenüber wurde Situation c) von allen Beteiligten als deutlich unbehaglicher eingestuft. Wenn also die Probanden hier, etwa wie in der Studie [11], selbst zum deutlichen Sprechen aufgefordert worden wären, hätten sie ihre Stimme also im Fall der Absorption vor allem oberhalb 250 Hz deswegen wohl intuitiv stärker als im Fall a) angehoben, um sich verständlich zu machen. Dies weist darauf hin, die Dämpfung bei mittleren Frequenzen gegenüber den tiefen nicht zu übertreiben (vgl. auch Abbildung 13 und 14). Sonst fördert die stärkere Dämpfung im mittleren Frequenzbereich die Verdeckung der für die Sprachverständlichkeit wichtigen mittleren bis höheren Frequenzkomponenten.

In sechs mit dem ODEON-Programm simulierten Räumen der Abmessung 8,4 x 7,7 x 3,9 m gemäß Abbildung 7 konnten die früheren Ergebnisse in ausführlicheren Tests nach aktuellem Stand audiometrischer Versuchstechnik (binaural über Kopfhörer) bestätigt werden [14]: Das rechte Säulenpaket (KG) in Abbildung 8 zeigt, noch ohne jedes Störgeräusch, den erwarteten geringen Einfluss der raumakustischen Gestaltung der Räume. Wenn ein zunächst

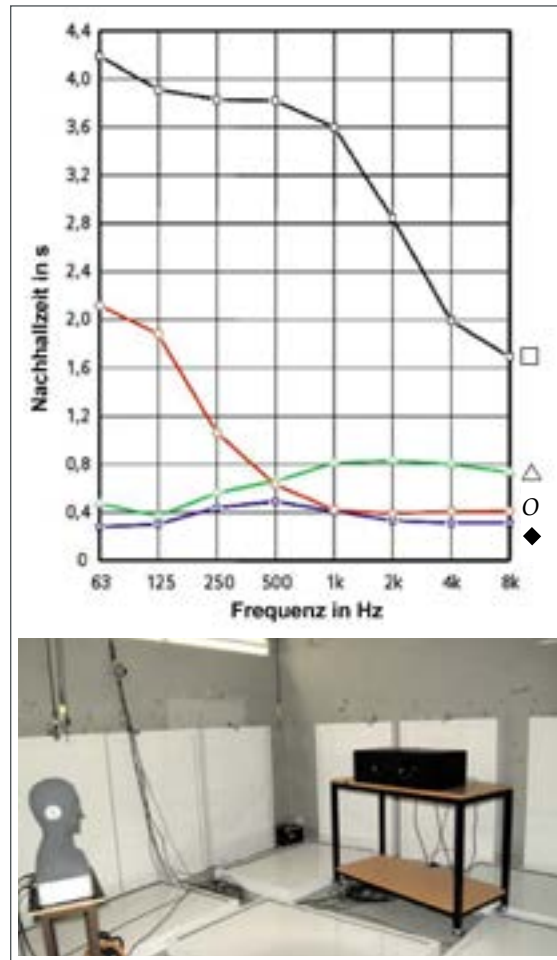
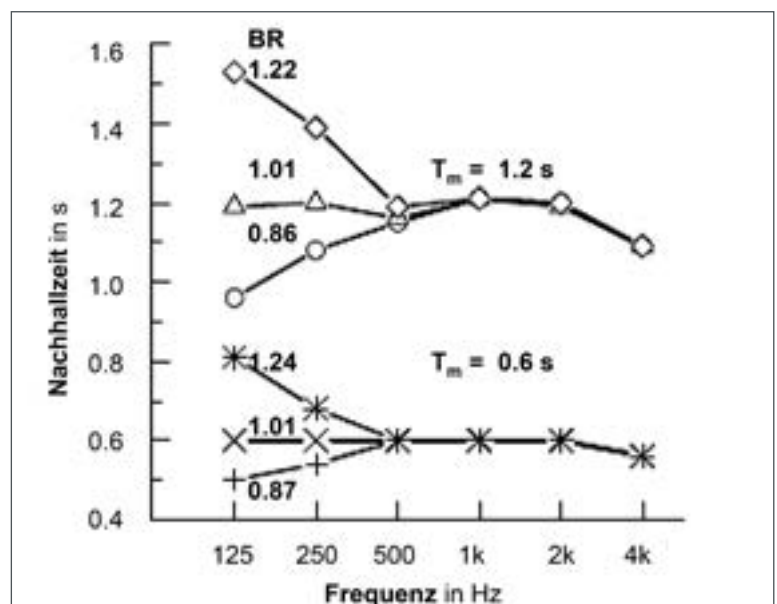


Abb. 6: Unterschiedliche raumakustische Konditionierung eines Laborraumes für Sprachtests im Fraunhofer-Institut; Leerraum (□), starke Tiefen-Absorption für $BR < 1$ (Δ), starke Höhen-Absorption für $BR \gg 1$ (O), Breitband-Absorption für $BR \approx 1$ (◆)

Abb. 7: Die verschiedenen Nachhallzeiten, wie sie sich aus der Impulsantwort der sechs simulierten Raum-Situationen 1.a (+), 1.b (x), 1.c (+), 2.a (o), 2.b (Δ), 2.c (◇) ergeben [14]



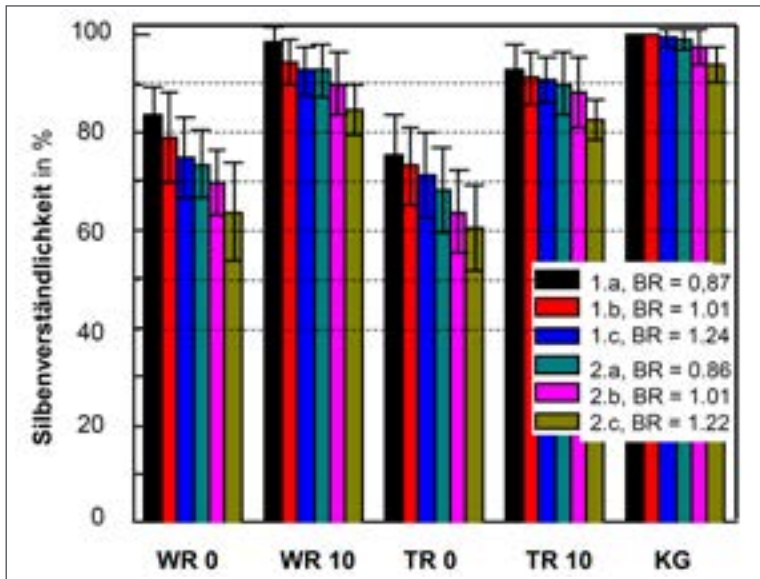


Abb. 8: Mittelwerte und Streubereiche der Silbenverständlichkeit bestimmt bei 32 Studenten in unterschiedlichen Raum- und Geräusch-Situationen; 1. Raum: $T_m = 0,6$ s, 2. Raum: $T_m = 1,2$ s; versch. Bass-Verhältnisse BR und Störabstände: WR(0)/WR(10) ► Weißes Rauschen 0 dB / 10 dB, TR(0)/TR(10) ► Tiefenbetontes Rauschen 0 dB / 10 dB, KG ► Kein Geräusch [14]

nur schwaches tiefenbetontes Störsignal mit einer Charakteristik, wie in Abbildung 9 dargestellt, mit einem Störabstand von $SNR=10$ dB(A) überlagert wird (Paket TR 10 in Abb. 8), sinken die ermittelten Werte um bis zu 10 %. Bei einem um 10 dB(A) stärkeren Störsignal gleichen Spektrums (TR 0) fällt die Verständlichkeit aber bis auf 60 % ab. Gleichzeitig wächst der durch die schwarzen Spangen angedeutete jeweilige Streubereich erheblich an. Der Störeinfluss durch „weißes Rauschen“ (WR 10 und WR 0 in Abb. 9) mit gleichem A-bewerteten Schalldruckpegel ist deutlich geringer.

Abb. 10: Silbenverständlichkeit bei Störung durch unterschiedliches stationäres Rauschen bestimmt bei 8 bis 9 Jahre alten Schülern (blaue Kurve), 10 bis 11 Jahre alten Schülern (rote Kurve) und Erwachsenen (schwarze Kurve) in zwei Raum-Situationen; a) Nachhallzeit bei 0,6 s, b) bei 1,2 s [15]

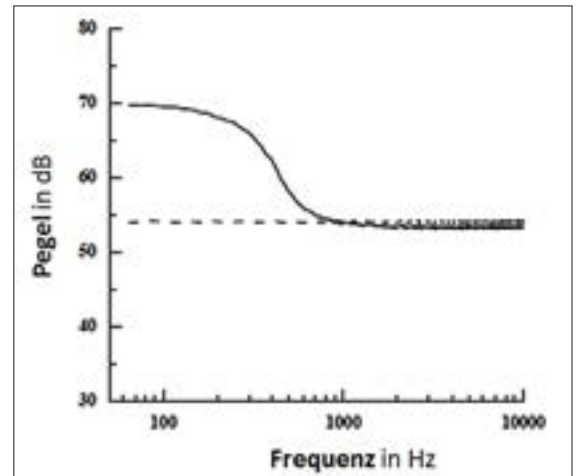
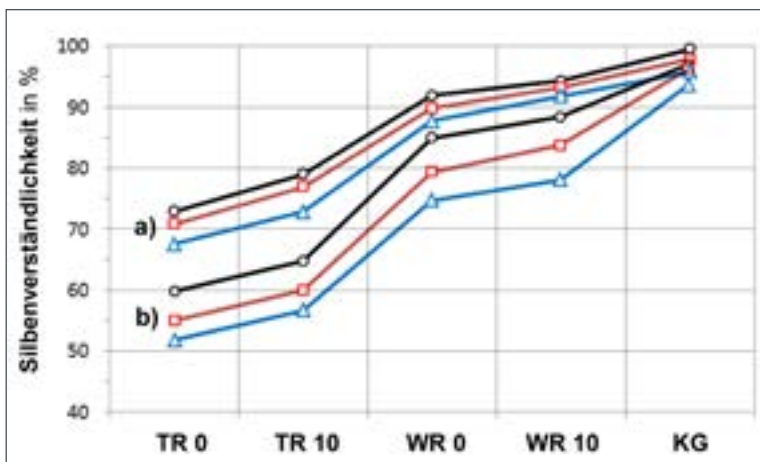


Abb. 9: Störgeräusch-Spektren, die in die gemäß Abbildung 7 simulierten Räume eingespielt wurden; tiefenbetontes (durchgezogen) bzw. „weißes“ (strichliert) Rauschen [14]

Schließlich wird in Abbildung 10 der Einfluss des Alters der Probanden nach [15] deutlich gemacht: Je jünger diese sind, umso schwerer fällt ihnen offensichtlich das Verstehen und zum umso lauterem Artikulieren tendieren sie selbst z. B. in einer realen Unterrichtssituation – mit den bekannten fatalen Folgen. Umso wichtiger ist für sie eine angemessene akustische Gestaltung des Raumes. Diese Ergebnisse lassen keinen Zweifel zu, dass die tiefen Frequenzen bei der raumakustischen Gestaltung hohe Aufmerksamkeit verdienen, besonders wenn man an junge und/oder sprachbehinderte sowie nicht muttersprachliche Personen denkt. Sie widersprechen fundamental den in [16] präsentierten Ergebnissen. In [16] wurden, ähnlich wie in [14 und 15], unterschiedliche Nachhallzeiten mit einem CAIT-Programm simuliert. Den Probanden wurde darin binaural über Kopfhörer ein 10 s dauerndes Sprachsignal (ohne ein Störsignal), jeweils im Paarvergleich, angeboten. Sie sollten nur jeweils subjektiv beurteilen, „bei welchem Beispiel die Sprachverständlichkeit besser ist“. Man kommt so in [16] zu dem fatalen Schluss, dass der Nachhallzeit unter 250 Hz keine wesentliche Bedeutung für die Sprachverständlichkeit zukomme, so wie es dann leider in dem gegenüber früheren Norm-Anforderungen stark ausgeweiteten Toleranzbereichs gemäß Abbildung 1 in [1] seinen Niederschlag fand. Welchen dominanten Einfluss aber unterschiedliche Störgeräusche auf die Silbenverständlichkeit haben, wird im Folgenden quantifiziert.

Das Sprachverstehen bei verschiedenen Geräuscharten

Nach den Ausführungen zur Verdeckung überrascht es natürlich nicht, dass die Ergebnisse in Abbildung 8

und 10 mit höhenbetontem Störsignal („weißem“ Rauschen) bei gleichem Störabstand grundsätzlich besser ausfallen als mit tiefenbetontem, vgl. jeweils Paket WR 10 mit TR 10 sowie WR 0 mit TR 0. Noch bedeutsamer, auch zur Erklärung der Diskrepanz zu den Untersuchungen ganz ohne Störsignale in [16], sind die Ergebnisse in [17]: Abbildung 11 zeigt die quantitativen Ergebnisse der richtig erkannten Logatome bei Überlagerung mit sehr verschiedenen Geräuschen, aber mit konstantem $\text{SNR} = 10$ bzw. 0 dB(A) , für zwei simulierte Räume mit konstantem, in der Praxis leider „normalem“ Bassverhältnis $\text{BR} \approx 1,3$, aber unterschiedlicher mittlerer Nachhallzeit $T_m = 0,83$ bzw. $1,3 \text{ s}$.

Bei der niedrigeren Nachhallzeit und hinreichend großem Störabstand (Abb. 11 a) bleibt die Verständlichkeit für alle Geräuscharten größer als 90 %, selbst für die jüngsten Schüler. Am wenigsten überrascht, dass in regelmäßigen Abständen von $1,6 \text{ s}$ eingespielte Schlaggeräusche in allen Fällen die geringsten Einbußen verursachen, wohl weil den Probanden zwischen zwei Pegelspitzen Zeit bleibt, um bei um 11 dB niedrigeren Pegeln Testsilben noch gut zu verstehen. Etwas kritischer stellt sich, insbesondere bei geringem Störabstand (Abb. 11 b und d), schon ein gleichmäßiges Verkehrsgeschall dar. Noch etwas geringere Verständlichkeit ergibt sich für eingespieltes, wahrscheinlich tonhaltiges Gebläsegeräusch. Deutlich schlechtere Ergebnisse werden erzielt bei gleichlauter Störung durch ein gleichmäßiges Geräusch, dessen Spektrum der Sprache nachgebildet wurde. Das wichtigste aus [17] ablesbare Ergebnis ist aber, dass Personen jeden Alters bei gleichem Störpegel objektiv am stärksten durch ein lautes natürliches Stimmengewirr gestört werden, besonders in akustisch schlecht konditionierten Räumen. Wieder sind es die jüngsten Schüler, die von jedem „Gebrabbel“ am meisten gestört werden, abzulesen an Ergebnissen von 54 % für $T_m = 0,83 \text{ s}$ und nur noch 40 % für $1,3 \text{ s}$. Auch nach [18] stört ein ganz gleichmäßiges Geräusch ohne jeden Informationsgehalt viel weniger als impulsartiges, selbst mit völlig irrelevanten Informationen. Sogar eine noch nicht richtig verstandene oder Fremdsprache, sogar rückwärts abgespielte Sprache, können demnach, völlig nutzlos, Aufmerksamkeit binden und Anspannung erzeugen, die dann die kognitiven Ressourcen verknappen und so zur Überforderung des für das Verstehen wichtigen Kurzzeitgedächtnisses und zu rascher Ermüdung führen. Die raumakustische Qualität offenbart sich deshalb auch besser inmitten einer im Raum munter diskutierenden Gesprächsgruppe, als durch das übliche Händeklatschen. Um aber mit dem hier propagierten raumakustischen Konzept ($\text{BR} \leq 1$) Praktiker zu überzeugen, muss seine Überlegenheit im direkten Vergleich mit

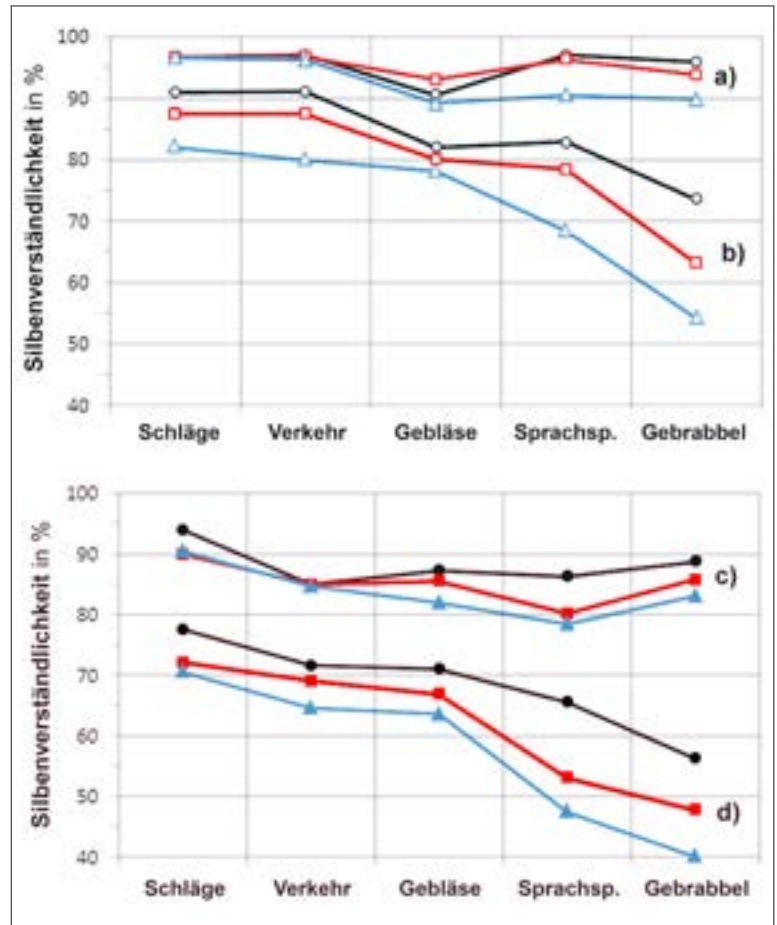


Abb. 11: Silbenverständlichkeit bei Schülern mit zunehmendem Alter wie in Abbildung 10 (jeweils Kurven von unten nach oben tendierend); a) $T_m = 0,83 \text{ s}$, $\text{BR} \approx 1,3$, $\text{SNR} = 10 \text{ dB(A)}$, b) $T_m = 0,83 \text{ s}$, $\text{BR} \approx 1,3$, $\text{SNR} = 0 \text{ dB(A)}$, c) $T_m = 1,30 \text{ s}$, $\text{BR} \approx 1,3$, $\text{SNR} = 10 \text{ dB(A)}$, d) $T_m = 1,30 \text{ s}$, $\text{BR} \approx 1,3$, $\text{SNR} = 0 \text{ dB(A)}$ nach [17]

der konventionellen Technik in realen Räumen wie im Folgenden vorführbar gemacht werden.

Drei charakteristische raumakustische Gestaltungen

Aus dem Vorstehenden sollte klar werden, dass die Nachhallzeit kleinerer Räume nicht zu groß und ein wie auch immer definiertes Bass-Verhältnis kleiner oder zumindest nicht viel größer als 1 sein sollte – ganz unabhängig von seiner Nutzungsart. Unter den meist unverrückbar vorgegebenen baulichen Gegebenheiten wäre es allerdings eine Illusion, mit entsprechenden Zahlenwerten, etwa allein aus dem Raumvolumen abgeleitet, planen zu können. Dagegen sprechen fast regelmäßig architektonische und finanzielle Randbedingungen sowie ernst zu nehmende individuelle Wünsche anspruchsvoller Auftraggeber. Dem beratenden Akustiker sollte deshalb eine möglichst breite Palette von Schallabsorbentien, insbesondere für den tiefen Frequenzbereich, zur Verfügung stehen, siehe z. B. [5, 13] mit zahlreichen dort ausgeführten Fallbeispielen, die vielerorts bereits zum Vorbild für



Abb. 12: Blick zur Flurwand eines der bemängelten Hörsäle (i14) an der TU Graz im Ausgangszustand mit einer großflächig abgehängten Akustikdecke

Unterricht und Freizeit geworden sind.

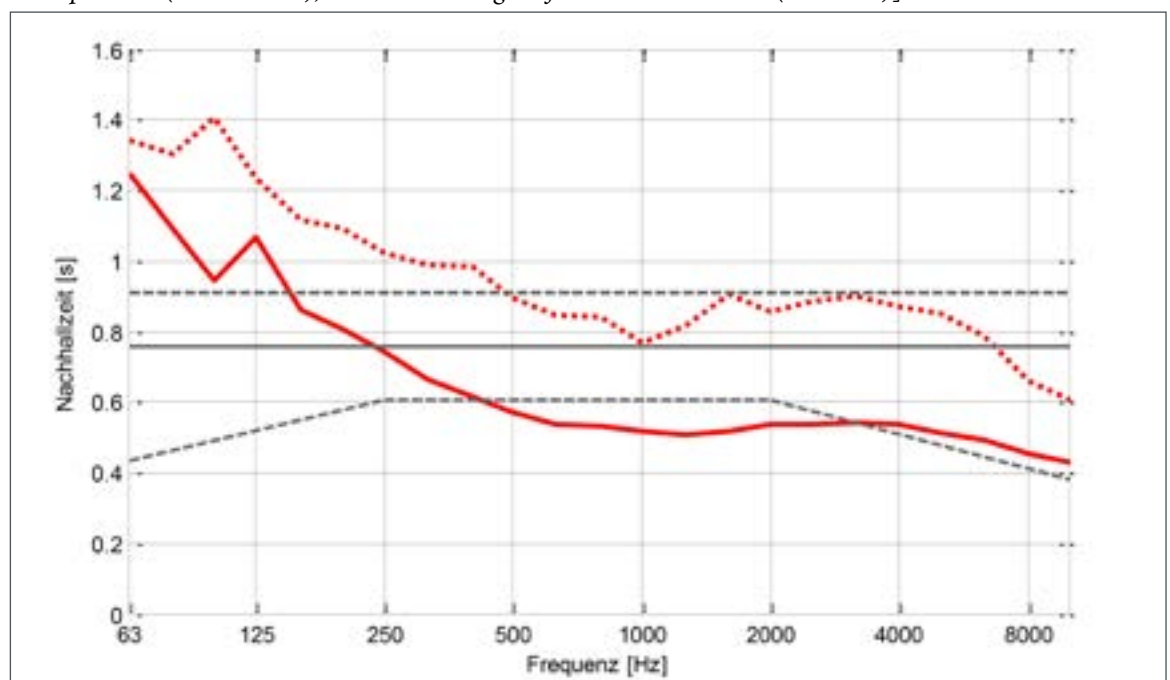
Hier sollen 3 aktuelle Fälle mit sehr unterschiedlichem BR beschrieben werden. Bei den ersten beiden geht es um etwa baugleiche, unmittelbar nebeneinander angeordnete Hörsäle der TU Graz. Beide wurden von Dozenten und Studenten wegen ihrer unangenehmen Akustik nur ungern aufgesucht, obgleich beide ganz konventionell, bereits in 1 m Abstand zur Fensterwand, mit 50 cm tief abgehängten „Akustikdecken“ aus Mineralfaserplatten ca. 3,6 m über dem schallharten Boden ausgestattet wurden.

Diese Räume wurden kürzlich im Rahmen einer Bachelorarbeit zum einen konventionell mit relativ dünnen porösen Wandpaneelen, zum anderen mit besonders kompakt gebauten Kanten-Absorbern nachgerüstet [19]. So können dort exemplarisch ein Vortrags- und Unterrichtsraum mit $BR \gg 1$ und ein fast baugleicher mit $BR \approx 1$ direkt miteinander verglichen werden. Der dritte Raum wurde mit $BR < 1$ eigens für die Stiftung Casa Acustica eingerichtet zur Demonstration optimaler Raumakustik für die naturgetreue Wiedergabe von Sprache und Musik auf höchstem Niveau [20].

Auskleidungen konventionell mit flächigen dünnen Schallabsorbern

Der 72 m² große Hörsaal i14 (Abb. 12) offenbart mit seiner Nachhallzeit in Abbildung 13 sofort das raumakustische Problem: Seine von hohen zu tiefen Frequenzen abfallende Absorption wird, wenn mit etwa 30 Personen besetzt, noch steiler. Der Raum hat der Anregung seiner Eigenresonanzen durch Geräusche von Stühlerücken und Stimmen seiner Nutzer nur wenig entgegenzusetzen. Eine solche Nachhall-Charakteristik ist aber leider sehr häufig nicht nur in Unterrichtsräumen anzutreffen. Diese konventionelle Ausstattung sorgt zwar oft für die Einhaltung der Sollwerte bei mittleren Frequenzen, z. B. nach der ÖNORM B 8115-3 aus dem Jahr 2005 oder DIN 18041 von 2004, in diesem Fall $T_m \approx 0,76$ s plus maximal 20 %. Aber die Werte bei 250, 125 und 63 Hz übersteigen den Sollwert um ca. 35, 62 und 77 %.

Abb. 13: Nachhall-Spektren gemessen im möblierten, noch unbesetzten Hörsaal nach Abbildung 12; nur mit 50 cm tief gehängter Mineralfaser-Unterdecke (obere), zusätzlich mit 10 mittel- und hochfrequent absorbierenden porösen Wandpaneelen (untere Kurve), Toleranzbereich gemäß ÖNORM B 8115-3 (strichliert)]



In diesem Raum wurden zusätzlich 10 Wandpaneele aus Akustikvlies in den Abmessungen $1,8 \times 1,2 \times 0,05$ m, also $21,6 \text{ m}^2$, auf 3 Wände verteilt, was immerhin 30 % der Grundfläche entspricht (Abb. 14). Das so erzielte Ergebnis in Abbildung 13 kann nicht überraschen: In einem breiten mittleren Bereich zwischen 500 und 2.500 Hz unterschreitet die Nachhallzeit jetzt den Sollwert um 30 %. Bei 125 und 63 Hz beträgt die Überschreitung aber immer noch 40 bzw. 65 %. Besonders negativ für die akustische Behaglichkeit in diesem Raum wirkt sich der nun noch steilere Anstieg des Nachhalls zu tiefen Frequenzen aus, der bei Besetzung zudem noch zunimmt. Beim Betreten des Raumes fällt bei etwas Hörerfahrung sofort auf, dass der geringe Nachhall bei mittleren Frequenzen nicht den Erwartungen bei einem Raum dieser Größe entspricht. Auf tieffrequente Laute antwortet der Raum nach wie vor mit starkem Dröhnen, die Sprachverständlichkeit ist entsprechend schlecht und die Stimmanhebung bleibt.

Nachrüstung alternativ mit kompakten Breitband-Absorbern

Im Nachbarraum fügen sich 65 cm breite, vertikale und horizontale, mit Mineralwolle gefüllte Gipskarton-Koffer in die stark gegliederte Flurwand ein, siehe die Strukturen 1 bis 3 in Abbildung 15. Die GK-Lochplatten, die in einem 42 cm breiten Streifen die Unterdecken-Paneele an den beiden Querwänden auf einer Länge von jeweils 3,6 m ersetzen und mit einer 30 cm dicken Mineralwolle-Auflage versehen wurden, fallen kaum ins Auge (Abb. 16). Diese bereits vielfach in ganz unterschiedlichen architektonischen Situationen realisierten Kanten-Absorber sind sehr robust und können bei jeder Renovierung einfach mit übergestrichen werden. Jedenfalls fiel das Erscheinungsbild bei den Nutzern eindeutig zugunsten dieses sanierten Hörsaals aus.

Der eigentliche Vorteil aller hier durchgeführten Maßnahmen, die deutlich weniger als diejenigen nebeneinander gekostet haben, liegt aber natürlich in ihrer eindeutig besseren schalltechnischen Wirksamkeit: Die Nachhallzeit im bemängelten Zustand wies ein zu den Tiefen stark ansteigendes Spektrum auf, ganz ähnlich wie im Nachbarraum, vgl. die oberen Kurven in Abbildung 17 und Abbildung 13. Dieses wurde durch die Sanierung zwischen 100 und 4.000 Hz fast konstant auf den Sollwert von hier 0,73 s vergleichmäßig. Damit wurde die Abschätzung in der Planungsphase, die auf den Erfahrungen aus früheren Sanierungen ähnlicher Art beruht, recht gut bestätigt, siehe auch Abbildung 18. Angesichts der in kleinen Räumen stets sehr starken örtlichen Streuungen aller Messwerte bei den Tiefen sollten die Abweichungen bei 63 Hz nicht verwundern. Das Dröhnen



Abb. 14: Der Raum nach Abbildung 12 mit 10 zusätzlichen, 5 cm dicken Akustikpaneelen an drei Wänden



Abb. 15: Kanten-Absorber (1 bis 3) greifen die vorgefundene Gliederung der Flurwand (ähnlich derjenigen in Abbildung 12) auf und harmonisieren optisch mit den schallharten Pfeilern (4)

Abb. 16: Die mit einer zusätzlichen Mineralwolle-Auflage belegten GK-Lochplatten (4) ersetzen die bereits vorhandenen UD-Platten in einem 42 cm breiten und 3,6 m langen Randstreifen



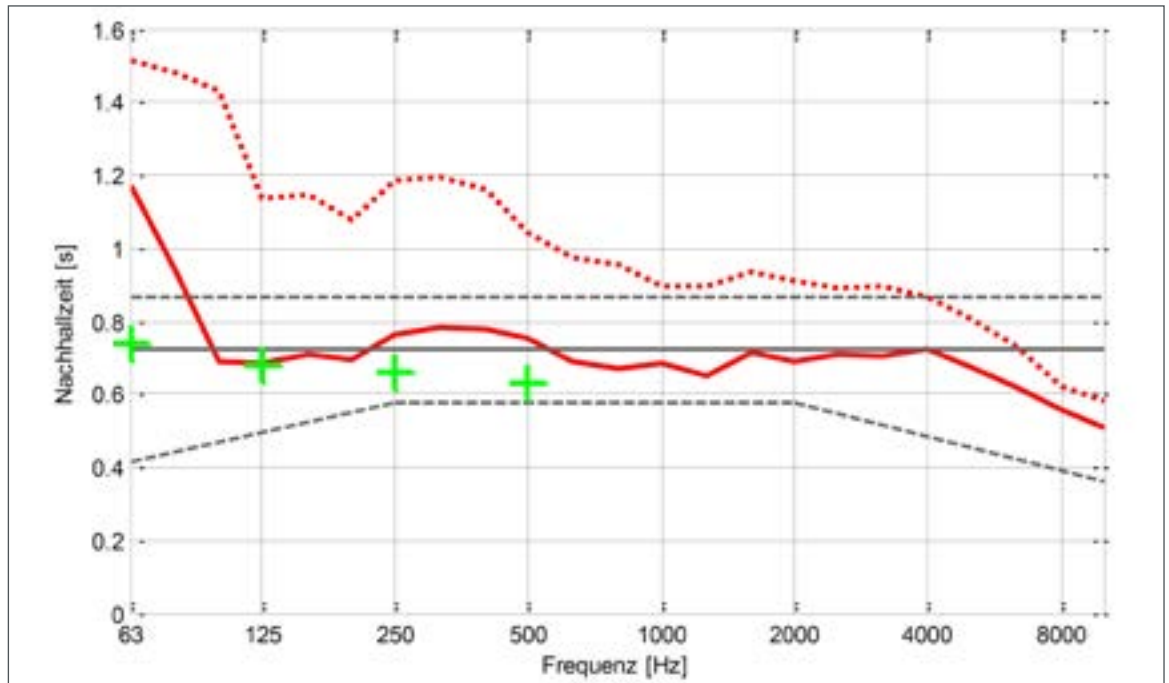


Abb. 17: Nachhall-Spektren des möblierten Hörsaals i15; nur mit 50 cm tief gehängter Mineralfaser-Unterdecke (obere), plus Kanten-Absorber nach Abbildung 15 und 16 (untere Kurve), Toleranzbereich gemäß ÖNORM B 8115-3 (strichliert) sowie Prognose (+)

ist jedenfalls wohltuend reduziert worden. Und der akustische passt hier gut mit dem visuellen Eindruck zusammen. Beide Räume stehen nunmehr für weitere psychoakustische Studien zur Verfügung.

Ausstattung eines Hörraumes mit Kanten-Absorbern
Live- und Studioproduktionen von Musik höchster Qualität sind heute für jeden preiswert verfügbar. In der Übertragungskette vom exzellenten Künstler zum anspruchsvollen Hörer ist aber z. B. sein Wohnzimmer als „Hörraum“ längst das schwächste schalltechnische Glied, auch und gerade in Immo-

lien der oberen Preisklasse mit modern karger Möblierung. Dank zeitgemäß stereophoner Wiedergabe sind auch hier dem räumlichen Hören [12] keine Grenzen gesetzt. Voraussetzung ist allerdings, wie bei der Lösung des Lärmproblems, dass man dem Raum die Möglichkeit nimmt, das von den Lautsprechern abgestrahlte Schallfeld lokal oder spektral zu verzerren. Wiederum liegt hier die größte Herausforderung, genau wie bei den in Teil 1 [1] behandelten größeren Räumen, keinesfalls bei den mittleren und hohen, sondern eindeutig bei den tiefen Frequenzen. Um auch hierfür ein raumakustisches Konzept vorzustellen, das einfach, preiswert und ohne Einschränkung der Wohnqualität möglich ist, wurde in

Abb. 18: Grob aus den Nachhallmessungen abgeschätzter mittlerer Absorptionsgrad der nachträglich eingebauten Breitband-Schallabsorber gemäß Abbildung 15 und 16 sowie Erfahrungswerte (+)

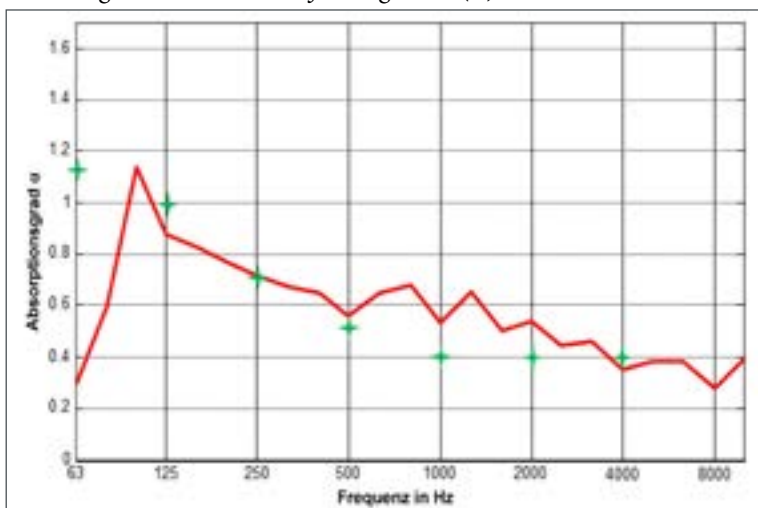
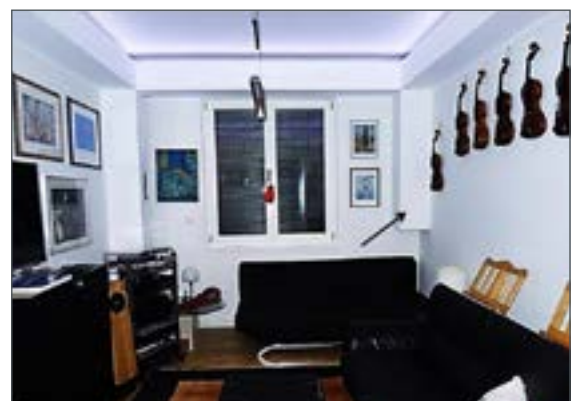


Abb. 19: Kanten-Absorber in „verdeckter“ Bauweise an Decke und einer Wand beidseitig der Stereo-Anlage sowie zwei $\lambda/4$ -Resonatoren an der gegenüberliegenden Wand im „Hörraum“ der Casa Acustica



der Stiftung Casa Acustica ein kleiner Demoraum in den Abmessungen 5 x 3,3 x 2,9 m dauerhaft eingerichtet [20]. Diesem vorgelagert sind ein normal eingerichteter Vorraum und Flur sowie ein ohrenbetäubend dröhnendes Treppenhaus. Die Besucher können also die unterschiedlichen raumakustischen Umwelten für das Verstehen, Kommunizieren und Musizieren ohne viele Erklärungen körperlich spürbar erleben und testen.

Abbildung 19 zeigt die Ausstattung mit insgesamt 4 Decken- und 2 Wand-Absorbern in den Querabmessungen 33 x 26 cm. Zwei auf die Decke/Boden-Eigenresonanz des Raumes bei ca. 60 Hz abgestimmte $\lambda/4$ -Resonatoren (siehe Pfeil) ergänzen die raumakustische Gestaltung. Durch die im ca. 12 cm breiten Decken-Hohlraum integrierte Beleuchtung können die Kanten-Absorber auch diesen bisher wohl kleinsten damit ausgestatteten Raum optisch nicht überlasten. Dessen Einrichtung besteht aus einem Teppich, einer dick gepolsterten Couch und einem dünn gepolsterten Dreisitzer in der klassischen Abhörposition. Vor der Medienwand haben auch ein Schallplattenschränk und darauf ein TV-Set Platz gefunden. Fenster und Wände blieben frei für andere lieb gewordene Funktionen, Gegenstände und Dekorationen.

Tatsächlich wird das Schallfeld durch die nur in den Raumkanten installierten Absorber nicht nur an der Abhörposition sondern überall spektral weitgehend entzerrt. Das zeigen auch die Terz-Messungen der Nachhallzeit an 3 Positionen in Abbildung 20. So

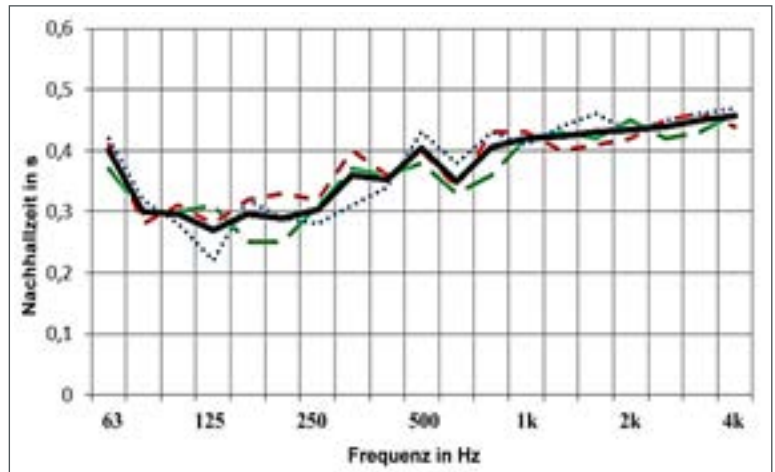
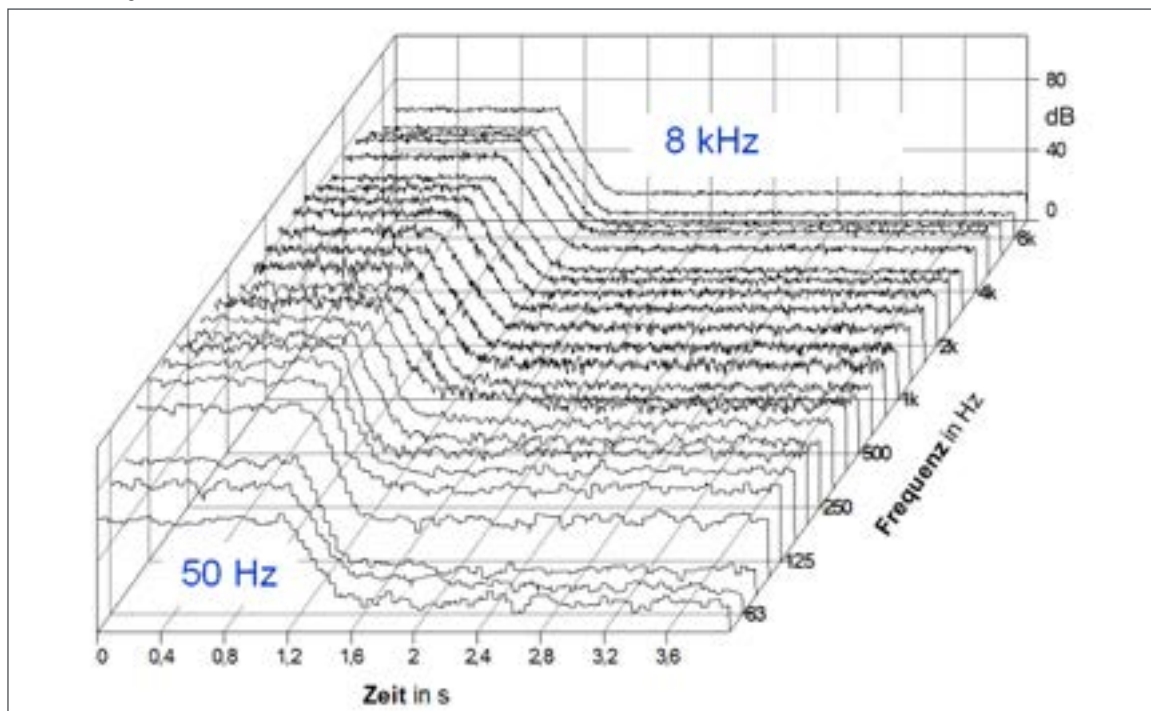


Abb. 20: In Terzen an drei Positionen sowie als Mittelwert (fett) gemessene Nachhallzeiten im „Hörraum“ von Abbildung 19

werden die ITU-R BS.1116-Empfehlungen insbesondere bei den wichtigen Frequenzen unter 250 Hz sehr gut erfüllt. Noch wesentlicher erscheint es aber, dass das zwischen 50 und 8.000 Hz gemessene Abklingen des Raumes bei jeglicher Anregung sehr gleichmäßig verläuft, siehe Abbildung 21. So wird demonstriert, dass man auch dem kleinsten Raum seinen stets nur negativen Einfluss auf die Klarheit aller in ihm stattfindenden Schallereignisse ohne besonders hohen Aufwand leicht nehmen kann.

Manch einem ambitionierten HiFi-Freak kann man jedenfalls raten, nicht sein ganzes Budget für die Abspielanlage auszugeben, sondern einen kleinen Teil davon besser in eine derartige Aufwertung der

Abb. 21: In Terzen und breitbandig (oben) zwischen 50 und 8.000 Hz gemessene Abklingkurven des „Hörraumes“ in Abbildung 19



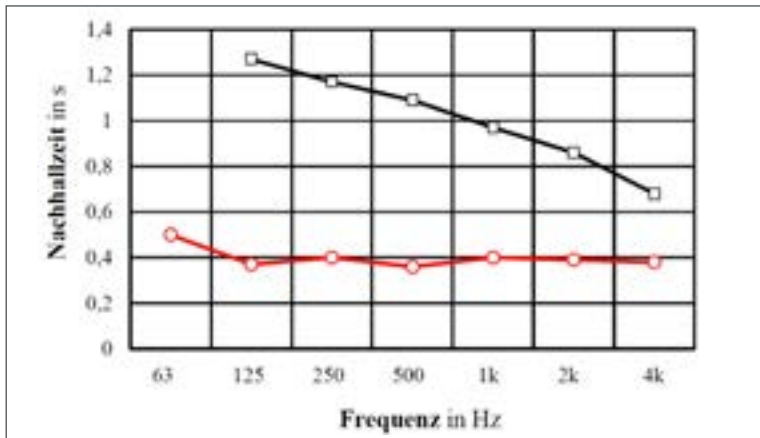


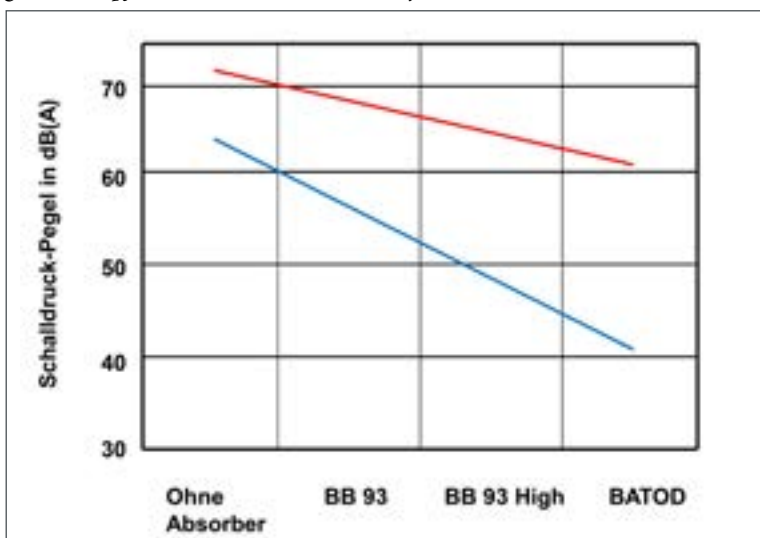
Abb. 22: Nachhallzeit eines unbesetzten möblierten Klassenzimmers mit ca. 168 m^3 gemäß Fig. 7 und Appendix A in [21] der Swayne Park School; unbehandelt (□), nach der Empfehlung der British Association of Teachers of the Deaf BATOD breitbandig behandelt (○)

Raumakustik zu investieren. Dann kann er auch beim Live-Musizieren und Kommunizieren ein ziemlich ungewohntes, aber wohltuendes akustisches Ambiente genießen. Im fortgeschrittenen Alter kann er so beim Hören von Nachrichten oder Talkshows verblüfft feststellen, dass er nun auch bei geringerer Lautstärke und ohne Hörgerät jedes Wort wieder viel besser verstehen kann, weil der tieffrequente „Murm“ beseitigt wurde.

Der Calm-Library-Effekt

Der zuvor angesprochene „Cocktail-Party“-Effekt kann seine positive Wirkung auf die Unterhaltung in größerer Runde eigentlich nur in gut konditionierten Räumen richtig entfalten. Derartige Klassenzimmer können den Lehrer in all seinen Bemühungen fundamental unterstützen, indem sie einen breiten Spiel-

Abb. 23: Äquivalenter Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ (obere Kurve) und Grundgeräuschpegel $L_{A,90}$ (untere Kurve) für die nach unterschiedlichen Anforderungen bedämpften Klassenzimmer der Swayne Park School nach [22]



raum für die Schallemission an den Quellen schaffen. Dieser leider noch viel zu wenig bekannte und noch weniger verstandene und erlebte pädagogische Effekt des Raumes lässt sich vielleicht vergleichen mit demjenigen, der auf eine ungehemmt plaudernde Besuchergruppe einwirkt, wenn diese aus einem lauten Ambiente in eine Bibliothek geführt wird, in der Studierende lautlos zwischen hohen Bücherregalen in Literatur vertieft arbeiten. Die zu diesem „Calm-Library“-Effekt gegenteilige Wahrnehmung kann man erfahren, wenn dieselbe oder gar mehrere Gruppen mit unvermeidlich lauten Erklärungen durch üblicherweise sehr hallige Museumssäle geführt werden. Gute Raumakustik kann also einen Beitrag zur Kultivierung von Information und Kommunikation leisten – in kleinen wie in großen Räumen.

Schlussfolgerung und Ausblick

Es gibt wohl noch wichtigere Bauregeln wie diejenigen zum Brandschutz und Wärmeschutz; aber im Vergleich zum Schallschutz etwa nach DIN 4109 führt die Raumakustik gerade in kleineren Räumen ein sehr bedauerliches Schattendasein. Da es dabei aber z.B. in Schulen um einen die Gesundheit und den Bildungserfolg erheblich gefährdenden Lärm geht, findet sich in [5, Abschn. 13.4] eine breite Diskussion entsprechender Richtlinien, die hier nur kurz ausfallen kann.

Auf DIN 18041–2004 und ÖNORM B 8115–3 wird gern Bezug genommen, da diese Normen bis 63 Hz herunter einen Anstieg von nur 20 % gegenüber der Nachhallzeit bei mittleren Frequenzen tolerieren. Im britischen Building Bulletin BB 93–2003, welches nur den Mittelwert der Nachhallzeit bei 500, 1.000 und 2.000 Hz bewertet, wird zwar mit 0,8 s für höhere Schulen und 0,6 s für Grundschulen sowie 0,4 s nach BB 93 „High“ für behinderte Schüler ein hoher Anspruch erhoben, aber leider eben nur für die mittleren Frequenzen. In einer umfangreichen Studie [21] wird aber überzeugend dargestellt, dass erst ein Ergebnis wie in Abbildung 22, das breitbandiger den Empfehlungen der British Association of Teachers of the Deaf BATOD folgt, ein geradezu überschwängliches Lob bei allen Nutzern des Klassenzimmers erhält. Tatsächlich zeigen diese Ergebnisse, dass sowohl die A-bewertete gemessenen äquivalenten Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ als auch die Grundgeräuschpegel $L_{A,90}$ während einer Unterrichtsstunde viel stärker sinken, als es der jeweils gesteigerten Absorption bei reduziertem Nachhall physikalisch entsprechen würde. Gemäß Abbildung 23 kann so der mittlere Störabstand für eine Stimme (meist die des Lehrers) auf bis zu 20 dB vergrößert werden – ein Segen für Lernprozesse, die auf verbal-auditiver Kommunikation beruhen, also auf Sprechen (Informieren und Erklä-

ren) und Hören (Verstehen und Verarbeiten) [22]! Dagegen würde der große Toleranzbereich in Bild 2 von DIN 18041–2016 (siehe Abb. 1 in Teil 1), wenn man ihn voll ausschöpft, einen monotonen Anstieg der Nachhallzeit um den Faktor 2,4 zulassen. Einen solchen findet man dort tatsächlich auch in dem einzigen Zitat aus der umfangreichen aktuellen Literatur zum Thema, und zwar zwischen 4 kHz (0,36 s) und 125 Hz (0,9 s)! Dazu wird in einer Fußnote nur behauptet, dies sei „aus raumakustischer Sicht akzeptabel“ (siehe Zitat [10] der Norm und dort Abb. 7.1). Auch wenn man die in [5, Kap. 12 und 14] zahlreich dokumentierten Beispiele guter Raumakustik in vorgefundenen oder sanierten Räumlichkeiten nicht als repräsentativ für die heutige Situation im Markt ansähe, kann man doch festhalten, dass diese Norm so jedenfalls nicht dem aktuellen Stand des Wissens und der Technik entspricht.

Literatur

- [1] Fuchs, H. V. (2018): Thesen zur Akustik anspruchsvoller Räume. Teil 1: Bass-Verhältnis und Hörsamkeit in größeren Räumlichkeiten. In: Akustik Journal, Nr. 2, S. 31–45, 2018.
- [2] Kuttruff, H.: Raumakustik. In: Heckl, M.; Müller, H. A. (Hrsg.): Taschenbuch der Technischen Akustik, Kap. 23. Springer, Berlin. 1994.
- [3] Vorländer, M.: Raumakustik und Sprachverstehen. In: Huber, L. et al (Hrsg.): Die akustisch gestaltete Schule – Auf der Suche nach dem guten Ton. Edition Zuhören, Band 3. Vandenhoeck&Ruprecht, Göttingen, 2002.
- [4] Mommertz, E.: Muss es im Unterricht immer so laut sein? In: Huber, L. et al (Hrsg.): Die akustisch gestaltete Schule – Auf der Suche nach dem guten Ton. Edition Zuhören, Band 3. Vandenhoeck&Ruprecht, Göttingen, 2002.
- [5] Fuchs, H. V.: Raum-Akustik und Lärm-Minderung. Springer, Berlin, 2017.
- [6] Lazarus, H.; Sust, C. A.; Steckel, R.; Kulka, M.; Kurtz, P.: Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation. Springer, Berlin, 2007.
- [7] Davis, D.; Davis, C.: Sound system engineering. MacMillan, Indiana, 1987.
- [8] Slawin, I. I.: Industrielärm und seine Bekämpfung. Verlag Technik, Berlin, 1960.
- [9] Lombard, E.: Le signe de l'élévation de la voix. Ann. Maladies Oreille, Larynx, Nez, Pharynx 37, S. 101–119, 1911.
- [10] Bottalico, P.; Passione, I. I.; Graetzer, S.; Hunter, E. J.: Evaluation of the starting point of the Lombard effect. Acta Acustica united with Acustica 103, S. 169–172, 2017.
- [11] Meyer, J.: Akustik und musikalische Aufführungspraxis. Bochinsky, Frankfurt, 2015.
- [12] Blauert, J.: Räumliches Hören. Hirzel, Stuttgart, 1974.
- [13] Fuchs, H. V.: Schallabsorber und Schalldämpfer. Springer, Berlin, 2010.
- [14] Wu, S.; Peng, J.; Bi, Z.: Chinese speech intelligibility in low frequency reverberation and noise in a simulated classroom. Acta Acustica united with Acustica 100, S. 1.067–1.072, 2014.
- [15] Peng, J.; Wang, J.: Comparison of syllable recognition for children in low-frequency noise and white noise (in Chinesisch). J. South China Univ. Technol. 41, S. 127–130, 2013.
- [16] Mommertz, E.; Reents, P.; Graber, G.: Bedeutung kurzer Nachhallzeiten bei tiefen Frequenzen für die raumakustische Qualität in Unterrichtsräumen. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2006, 32. Jahrestagung für Akustik, Braunschweig, S. 575–576.
- [17] Peng, J.; Zhang, H.; Yan, N.: Effect of different types of noises on Chinese speech intelligibility of children in elementary school classrooms. Acta Acustica united with Acustica 102, S. 938–944, 2016.
- [18] Hellbrück, J.: Wahrnehmung und Wirkung von Schall – Akustik zwischen Physik und Psychologie. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2007, 33. Jahrestagung für Akustik, Stuttgart, S. 17–22.
- [19] Fuchs, H. V.; Graber, G.; Hetz, S.; Kordes, J.; Balint, J.: Harte Kanten für klare Worte. Trockenbau Akustik 34, H. 6, S. 70–73, 2017.
- [20] Fuchs, H. V.: High Fidelity Genuss im Wohnzimmer? VdT-Magazin 33, H. 3, S. 55–57, 2017.
- [21] Canning, D.; James, A.: The Essex Study – Optimised classroom acoustics for all. Association of Noise Consultants, St. Albans, 2012.
<http://www.theanc.co.uk>
- [22] Brokmann, H.: Schulakustik und Inklusion. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 8 (2013), Nr. 5, S. 216–219. ■

**Prof. Dr.-Ing.
Helmut V. Fuchs,**
Casa Acustica,
Berlin

Veranstaltungen

■ Veranstaltungshinweise

31.10.2018

ALD-Veranstaltung

Lärmarme Innenstadt-Logistik



Zu den Beeinträchtigungen durch Lärm infolge des Straßenverkehrs tragen auch die konventionellen Lieferfahrzeuge für den Kurier-Express-Paketdienst (KEP) bei. Dieser Wirtschaftssektor ist durch ein hohes Wachstum gekennzeichnet. So hat sich die Anzahl der gelieferten Pakete seit 2000 fast verdoppelt. Die Lieferungen führen in den Innenstädten zu einer Störung des Verkehrsflusses, die wiederum besondere Belästigungen durch Einzelgeräusche (z. B. Bremsen, Hupen) verursachen. Wegen der Verkehrsstörungen wird zunehmend über eine Verlagerung von Lieferungen in die sensiblen Abend- und Nachtstunden nachgedacht.

Auf Grund der zunehmenden Bedeutung der Lieferdienste ist es geboten, spezifische Minderungskonzepte für den Paketdienst zu entwickeln.

Die Lieferdienste haben in der Kenntnis dieser Probleme bereits zahlreiche innovative Konzepte für eine nachhaltige Innenstadtlogistik entwickelt. Aktuell werden verschiedene Pilotprojekte durchgeführt. Diese Lösungsansätze sind auch für alle anderen Sektoren des Straßenverkehrs beispielgebend.

Die Veranstaltung des ALD hat deshalb zum Ziel, die innovativen Lösungskonzepte aus der Sicht der beteiligten Akteure für eine breite Öffentlichkeit vorzustellen und die Chancen einer nachhaltigen Innenstadtlogistik mit dem besonderen Akzent auf dem Lärmschutz zu diskutieren.

Sie wendet sich an interessierte Bürgerinnen und Bürger und an die mit der Verkehrslogistik befassten Fachleute in Wirtschaft, Politik, Verwaltung und Wissenschaft.

Veranstaltungsort:

Verkehrszentrum des Deutschen Museums
Seminarraum
Am Bavariapark 5
80339 München

Programm und Anmeldung:

<http://www.ald-laerm.de/ald/projekte-des-ald/2018/ald-veranstaltung-innenstadtlogistik/> ■

20.11.2018

ALD-Veranstaltung

Freizeitlärm – Probleme und Lösungen in Städten



Im Freizeitbereich kommt es zunehmend zu Konflikten zwischen dem Ruhebedürfnis der Anwohner/innen und Veranstaltern oder der Nutzung von Sportanlagen, die sich durch Auflagen zum Schallschutz eingeschränkt sehen. Die Konflikte führen vermehrt zu gerichtlichen Auseinandersetzungen.

Diese Konflikte werden sich verschärfen, wenn das aktuelle Leitbild einer nachhaltigen Stadtentwicklung – die Stadt der kurzen Wege und des sparsamen Umgangs mit Flächen durch Mischung der Nutzungen und Innenentwicklung – umgesetzt wird. Beispielfhaft dafür ist die Aufweichung der Lärmstandards durch die Einführung des „Urbanen Gebiets“, hier ist das Heranrücken der Wohnbebauung an lärmintensive Quellen vorprogrammiert. Das Ziel eines umweltverträglichen Nebeneinanders von Wohnen, Gewerbebetrieben, sportlichen Aktivitäten und Freizeiteinrichtungen wird schwieriger zu erreichen sein.

Die Veranstaltung will Wege zu einem verträglichen Miteinander von Wohnen und den Einrichtungen der Freizeitgestaltung aufzeigen. Die Vorträge werden einen aktuellen Überblick über die Situationen in Ballungs- und ländlich geprägten Räumen sowie über die rechtlichen Rahmenbedingungen geben. Es werden technische, planerische, kommunikative und rechtliche Ansätze zu Problemlösungen und zu Gestaltungsmöglichkeiten zur Verbesserung der Immissionssituation und der Akzeptanz der Betroffenen aufgezeigt.

Die interessierte Öffentlichkeit, Fachleute aus der Verwaltung und aus Ingenieurbüros sowie Vertreter/innen der Verbände und der Politik sind herzlich eingeladen.

Veranstaltungsort:

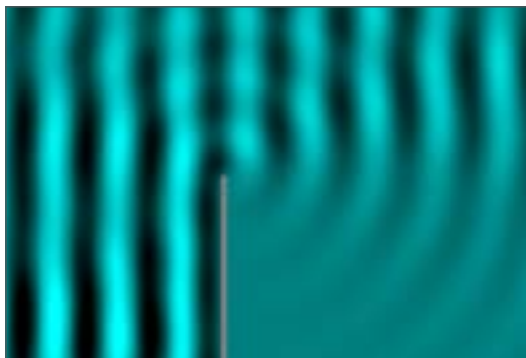
Landesvertretung Rheinland-Pfalz
In den Ministergärten 6
10117 Berlin

Programm und Anmeldung:

<http://www.ald-laerm.de/ald/projekte-des-ald/2018/ald-veranstaltung-freizeitlaerm/> ■

06.–08.03.2019

DEGA-Akademie

Kurs „Grundlagen der Technischen Akustik“

Der Kurs „Grundlagen der Technischen Akustik“ findet vom 6. bis 8. März 2019 in Berlin statt. Er richtet sich an Mitarbeiter(innen) von Industriefirmen, Beratungsbüros und Behörden, die im Bereich Akustik tätig sind und ihre Kenntnisse und Fähigkeiten im Bereich der Grundlagen der Technischen Akustik festigen wollen. Außerdem sind alle diejenigen angesprochen, die über mathematisches und technisches Grundwissen verfügen, aber in ihrer Tätigkeit erstmals mit Fragestellungen der Technischen Akustik konfrontiert sind und sich deshalb eingehender mit diesem Gebiet befassen wollen.

Veranstaltungsort:

Technische Universität Berlin (Gebäude EN)
Einsteinufer 17c
10587 Berlin

Leitung und Referent(inn)en:

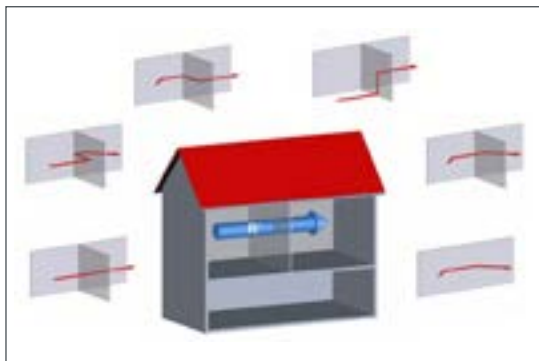
- Dr.-Ing. Judith Galuba (Müller-BBM GmbH, Berlin)
- Prof. Dr.-Ing. Ennes Sarradj (TU Berlin, Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik)

Programm und Anmeldung:

siehe beiliegendes Faltblatt oder <http://www.dega-akustik.de> ■

01.–03.04.2019

DEGA-Akademie

Kurs „Bauakustik – von den Grundlagen zur Anwendung“

Der Kurs „Bauakustik – von den Grundlagen zur Anwendung“ findet das nächste Mal vom 1. bis 3. April 2019

in Braunschweig statt. Er richtet sich insbesondere an Mitarbeiter(innen) von Beratungsbüros, Architekten und Bauingenieure, die sich mit diesem Thema intensiver auseinander setzen wollen.

Leitung und Referenten:

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

Veranstaltungsort:

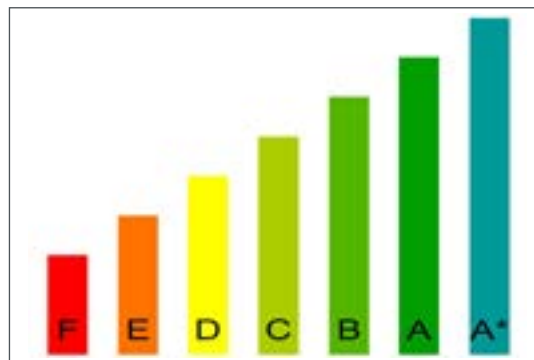
Haus der Wissenschaft Braunschweig
Pockelsstraße 11
38106 Braunschweig
<http://www.hausderwissenschaft.org>

Programm, Leistungen, Gebühren und Anmeldung:

siehe beiliegendes Faltblatt oder <http://www.dega-akustik.de> ■

10.04.2019

DEGA-Akademie

Kurs „DEGA-Schallschutzausweis“

Der Kurs „DEGA-Schallschutzausweis“ findet das nächste Mal am 10. April 2019 in Aachen statt. Er richtet sich an alle Interessierten, die ihre Fachkenntnis zur Anwendung bzw. Ausstellung von DEGA-Schallschutzausweisen erweitern wollen und sich über Details zur überarbeiteten DEGA-Empfehlung (siehe Seite 62) informieren möchten.

Leitung und Referent:

- Dipl.-Ing. Christian Burkhart (Akustikbüro Schwarzenberger und Burkhart, Pöcking)

Veranstaltungsort:

Hotel Ibis Marschierter
Friedlandstr. 6-8
52064 Aachen

Programm, Leistungen, Gebühren und Anmeldung:

siehe beiliegendes Faltblatt oder <http://www.dega-akustik.de> ■

■ Vorschau

18.–21.03.2019

DAGA 2019

45. Deutsche Jahrestagung für Akustik



Einladung

Im Namen der Universität Rostock, der Tagungsleitung und aller Veranstalter möchten wir Sie herzlich einladen, zur DAGA 2019 die Hansestadt Rostock zu besuchen.

Die Anmeldung zur Tagung ist ab sofort möglich. Tagungsbeiträge können bis zum 1. November eingereicht werden.

Die Hansestadt Rostock zusammen mit seinem Seebad Warnemünde ist ein beliebtes Urlaubsziel an der Ostsee und eine Stadt mit langer Historie. Im Jahr 2018 feiert Rostock sein 800-jähriges Bestehen. In Jahr 2019 darf dann auch die Wissenschaft, die ebenfalls auf eine lange Tradition in Rostock zurückblicken kann, einen runden Geburtstag begehen – 1419 gegründet, ist die Volluniversität Rostock die älteste Universität im Ostseeraum. Wir freuen uns, die DAGA zum 600-jährigen Jubiläum der Universität das erste Mal in Rostock ausrichten zu dürfen.

Tagungsleitung

Sascha Spors und Frank-Hendrik Wurm



Anmeldung zur Teilnahme

Die Anmeldung zur Teilnahme erfolgt über das Online-Anmeldeformular auf <http://www.daga2019.de/anmeldung>.

Auf der angegebenen Seite finden Sie auch die Übersicht der Teilnahmegebühren.

Anmeldung von Vorträgen und Postern

Sie sind herzlich eingeladen, Beiträge als Poster oder als mündliche Vorträge zur Tagung einzureichen und zu präsentieren. Die Anmeldung von Beiträgen erfolgt bis zum 01.11.2018

über die Webseite <http://www.daga2019.de/autoren> bei zeitgleicher Eingabe einer Kurzfassung mit bis zu 200 Wörtern. Die Tagungssprache ist Deutsch, Beiträge in englischer Sprache sind jedoch zugelassen.

In der Teilnahmegebühr ist die Präsentation eines Beitrags (Vortrag oder Poster) bereits enthalten. Zusätzliche Beiträge können gegen eine Gebühr von jeweils 140,- € ausschließlich als Poster eingereicht werden.

Fachgebiete

Aktive akustische Systeme, Akustische Messtechnik, Audiologische Akustik, Audiotechnik, Bauakustik, Bioakustik, Elektroakustik, Fahrzeugakustik, Geräuschbeurteilung, Geschichte der Akustik, Hydroakustik, Körperschall, Lärmausbreitung, Lärmschutz, Lärmwirkungen, Lehre der Akustik, Medizinische Akustik, Musikalische Akustik, Numerische Akustik, Physikalische Akustik, Psychoakustik, Raumakustik, Schwingungstechnik, Signalverarbeitung, Soundscapes, Sound Design, Sprachverarbeitung, Strömungsakustik, Technische Akustik, Ultraschall, Virtuelle Akustik

... und alle anderen Gebiete der Akustik.

Vortragsprogramm



Schwerpunkte des Tagungsprogramms werden neben Plenarvorträgen zu aktuellen Themen wieder die angemeldeten Vorträge und Poster zu den oben genannten Themenkreisen sein. In vielen Arbeitsgebieten werden darüber hinaus strukturierte Sitzungen angeboten, bei denen die Beiträge von den Organisator*innen initiiert werden. Eine Auflistung finden Sie auf <http://www.daga2019.de/programm/vortraege-und-poster/>.

Vorkolloquien

Am Montag, den 18. März 2019, finden zwei Vorkolloquien und ein Workshop statt.

Die Themen sind:

- Akustik von Strömungsmaschinen
- Räumliche Wiedergabeverfahren
- Workshop EARS II: Perception and impact of infrasound on humans (Christian Koch, PTB)

Postersitzungen

Posterbeiträge sind ausdrücklich erwünscht und sollen gemäß der Linie aus den letzten Jahren aufgewertet werden. Die Poster werden in einem zentralen Bereich des Tagungsortes präsen-

tiert und sollen, wenn möglich, die gesamte Konferenzdauer hängen. Für die Präsentation und Diskussion der Poster sind an jedem Konferenztag eigene Zeitabschnitte reserviert, zu denen es keine parallelen Veranstaltungen geben wird. Im Programmheft und im Tagungsband wird einer Poster-Präsentation der gleiche Umfang eingeräumt wie einem mündlichen Beitrag. Zur Förderung der Diskussion wird es für Posterbeiträge gesonderte Postersitzungen geben. Besonders herausragende Posterbeiträge werden zudem prämiert.

Tagungsbegleitende Ausstellung



Die wissenschaftliche Tagung wird von einer Firmenausstellung begleitet, welche die Kontaktvernetzung zwischen Theorie und Praxis pflegt und Unternehmen die Möglichkeit bietet, ihre Produkte und Dienstleistungen vorzustellen. Sie ist von Dienstag, den 19.03.2019 (10:00 Uhr) bis Donnerstag, den 21.03.2019 (14:00 Uhr) geöffnet.

Die Anmeldung zur Ausstellung beginnt im Oktober 2018. Nähere Informationen für Aussteller (Standpläne, Standortfotos, Preise, Zufahrt- und Parkmöglichkeiten) sowie das Anmeldeformular zur Ausstellung finden Sie in Kürze auf der Seite <http://www.daga2019.de/ausstellung>.

Geselliger Abend

Als besonderes Highlight möchten wir Sie zu einem geselligen Abend in das Kreuzfahrtterminal in Warnemünde einladen. Der freie Blick auf die Hafeneinfahrt bietet die Gelegenheit zum abendlichen Beobachten des regen Schiffsverkehrs.

Unterkunft und Reise

Ihr Tagungsausweis gilt im Zeitraum vom 18. bis 21. März 2019 als Fahrausweis in der Tarifzone Rostock. Diese schließt die Stadt Rostock und Warnemünde ein.

Das Hotelkontingent zur Tagung steht unter <http://www.daga2019.de/tagungsort> für Sie bereit.

Zentrale Termine zur DAGA 2019

- ab sofort: Online-Anmeldung zur Teilnahme und Einreichung von Poster- und Vortragsanmeldungen
- 1. November 2018: letzter Termin für die Anmeldung von Beiträgen (Vorträge und Poster)
- 31. Januar 2019: letzter Termin für die Anmeldung zu den günstigen „frühen“ Teilnahmegebühren

- Anfang Februar 2019: Versand des Programms an die angemeldeten Teilnehmer, Programm in Internet und App
- 18. März 2019: Vorkolloquien, DEGA-Mitgliederversammlung
- 18.–21. März 2019: Tagung DAGA 2019
- Frühjahr 2019: Alle Teilnehmer erhalten per E-Mail den Online-Zugang zum Tagungsband

Veranstaltungsort



Stadthalle Rostock

Südring 90

18059 Rostock

<http://www.messe-und-stadthalle.de>

Veranstalter

- Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA)
- Institut für Nachrichtentechnik, Fakultät für Informatik und Elektrotechnik, Universität Rostock
- Lehrstuhl Strömungsmaschinen, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Universität Rostock

unter Mitwirkung von

- Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG)
- Informationstechnische Gesellschaft (ITG) im VDE
- DIN/VDI – Normenausschluss NALS

Wissenschaftlicher Beirat

- Daniel Beer
- André Fiebig
- Michael Pfadenhauer
- Alexander Raake
- Uwe Ritschel
- Wolfgang Schmiedt
- Sascha Spors
- Frank-Hendrik Wurm
- Berndt Zeitler

Kontakt

Julia Schneiderheinze

Deutsche Gesellschaft für Akustik e. V.

Tel: 030 / 340 60 38 03

E-Mail: tagungen@dega-akustik.de ■

09.–13.09.2019

ICA 2019 / EAA Euroregio
in Aachen

23rd International Congress on Acoustics
integrating 4th EAA Euroregio 2019
Aachen, 09. bis 13. September 2019

Einladung

Die DEGA lädt Sie herzlich zum „23rd International Congress on Acoustics“ (ICA 2019) ein, der vom 9. bis zum 13. September 2019 in Aachen (siehe folgendes Bild) stattfindet. Als Besonderheit schließt die ICA 2019 auch den „4th EAA Euroregio“ Kongress mit ein. Die ICA findet im dreijährigen Rhythmus statt. Sie wird regulär von der International Commission for Acoustics und in 2019 von der Deutschen Gesellschaft für Akustik organisiert. Zur ICA 2019 erwarten Sie international besetzte Vortrags- und Postersessions, hochkarätige Plenarvorträge sowie mehrere Satellitensymposien. Die Konferenzsprache ist Englisch.

**Tagungsort**

Die ICA ist 2019 im Kongresszentrum „Eurogress Aachen“ zu Gast, welches in den Stadtpark eingebettet und daneben gut an die historische Innenstadt Aachens angebunden ist.

Themengebiete

Die Topics zur ICA 2019 sind:

Active acoustic systems, Acoustic measurements and sensor technologies, Array technology, Audiological acoustics, Bioacoustics, Building acoustics, Education in acoustics, Effects of noise and noise policy, Electroacoustics and audio signal processing, Flow acoustics, History of acoustics, Hydroacoustics, Noise assessment, Noise control, Numerical acoustics, Machine Acoustics, Musical acoustics, Physical acoustics, Physiological Acoustics, Psychoacoustics, Room acoustics,

Signal processing, Soundscape, Sound design, Speech processing, Structure-borne sound, Ultrasound, Ultrasound in medical science, Vehicle acoustics, Vibration engineering, Virtual acoustics.



Im Programm werden auch zahlreiche strukturierte, auf Themenschwerpunkte bezogene Sitzungen mit eingeladenen internationalen Vorträgen enthalten sein, die Sie ab Dezember auf der Tagungswebseite finden: <http://www.ica2019.org/program>

Anmeldung/Einreichung

Ab Dezember 2018 haben Sie die Möglichkeit, sich über die Tagungswebseite für die Konferenz zu registrieren:

<http://www.ica2019.org/registration>

Ebenfalls können Sie ab Dezember Vorträge und Poster zur ICA einreichen: <http://www.ica2019.org/authors>

Für Begleitpersonen bietet die ICA ein spezielles Programm, auch dafür ist eine Registrierung über die Webseite erforderlich.

Satellites

Der ICA werden in 2019 eine Summer School sowie mehrere Satellitensymposien zur Seite gestellt:

- „EAA Summer School“ für junge Akustiker*innen in Leuven (06.–08.09.2019, siehe folgendes Bild),
siehe <http://www.ica2019.org/eaa-summer-school>
- „EAA Spatial Audio Signal Processing Symposium“ in Paris (06.–07.09.2019), siehe <https://sasp2019.ircam.fr>
- „ISMA 2019 – International Symposium on Musical Acoustics“ in Detmold (13.–17.09.2019),
siehe <http://www.isma2019.de>
- „ISRA 2019 – International Symposium on Room Acoustics“ in Amsterdam (15.–17.09.2019),
siehe <http://www.isra2019.eu>



Hotels und Tourismus

Nützliche Informationen zu Ihrem Aufenthalt in Aachen finden Sie auf der Webseite <http://www.ica2019.org/about-aachen>.

Im Unterpunkt „accomodation“ ist das Hotelkontingent zur Tagung bereitgestellt.

Informationen zu Aachens kulturellem und touristischen Angebot bietet die Seite <https://www.aachen-tourismus.de>.

Ausstellung/Sponsoring

Die ICA 2019 wird begleitet von einer internationalen Ausstellung mit Vertretern aus Industrie und Forschung. Informationen zu Standflächen, Ausstattung, Preisen und Anmeldemodalitäten finden Sie zum Jahreswechsel 2018/19 auf der Webseite <http://www.ica2019.org/exhibition-sponsorship>.

Ab diesem Zeitpunkt sind auch Anmeldungen möglich.

Firmen sind ebenfalls eingeladen, die ICA 2019 durch Sponsoring zu unterstützen oder Werbeleistungen in Anspruch zu nehmen. Zum Jahreswechsel werden hierzu verschiedene Angebote auf der o. g. Webseite veröffentlicht.

Organizing Committee

- Congress Chair: Michael Vorländer
- Congress Vice-Chair: Janina Fels
- Technical Program Committee:
Program Chair: Martin Ochmann
EUROREGIO co-chair: Dick Botteldooren

EUROREGIO co-chair: Gijsjan van Blokland

Brigitte Schulte-Fortkamp

Janina Fels

Klaus Genuit

- EAA Summer School Co-Chairs:

Monika Rychtáriková

Armin Kohlrausch

- Treasurer:

Klaus Genuit

- Professional Congress Organizers:

Teresa Lehmann

Julia Schneiderheinze

International Advisory Board

Mathias Basner, Giovanni Brambilla, Marion Burgess, Luis Bento Coelho, Julio A. Cordioli, Patricia Davies, Antonino Di Bella, Bertrand Dubus, Grazyna Grelowska, Jeong-Guon Ih, Mark Hamilton, Dorte Hammershøi, Chan Hoon Haan, Andrés Mayo, Jorge Patricio, Antonio Perez Lopez, Kerstin Persson Waye, J. Salvador Santiago, Rajendra Singh, Michael Stinson, Michael Taroudakis, Nilda Vechiatti, Suk Wang Yoon, Jerzy Wiciak, Kohei Yamamoto

Kontakt

Julia Schneiderheinze

E-Mail: contact@ica2019.org ■

Das wegweisende SoundPLAN Schallteilchenmodell

Wir bringen sie um die Ecke und durch die Wand



Lassen Sie Ihrer Phantasie freien Lauf. Setzen Sie das SoundPLAN Schallteilchenmodell mit seinen einzigartigen Beugungsalgorithmen für Projekte ein, die Sie so mit keinem anderen Produkt bearbeiten können.

Ingenieurbüro für
Softwareentwicklung
Lärmschutz
Umweltplanung



SoundPLAN GmbH
Etzwiesenberg 15
71522 Backnang
phone +49.7191.9144-0
www.soundplan.de

■ Veranstaltungsrückblicke

11.–14.09.2018

Rückschau auf die 3rd Polish-German Structured Conference on Acoustics im Rahmen der „Acoustics 2018“-Konferenz in Ustka in Polen

Dzień dobry! (Guten Tag!) Ich möchte Ihnen von der Konferenz „Acoustics 2018“ berichten, die vom 11. bis zum 14. September 2018 in der Hafenstadt Ustka an der polnischen Ostseeküste stattfand und an der insgesamt 165 Personen, davon 28 von deutscher Seite teilnahmen. Sie umfasste neben der 65. polnischen Jahrestagung für Akustik „65. Otwarte Seminarium z Akustyki“ (65th Open Seminar on Acoustics) und dem „35. Sympozjum z Hydroakustyki“ (35th Symposium on Hydroacoustics) auch die „Polsko-Niemiecka Strukturalna Konferencja z Akustyki“ (Polish-German Structured Conference on Acoustics). Dies war bereits die dritte Kooperation dieser Art zwischen der DEGA und der polnischen Akustik-Gesellschaft „Polskie Towarzystwo Akustyczne“ nach den Polish-German Structured Conferences on Acoustics in den Jahren 2004 in Sobieszewo bei Danzig und 2011 in Jurata auf der Halbinsel Hel. Daneben gab es in der Vergangenheit auch gemeinsame strukturierte Sitzungen bei den DAGAs 2002 in Bochum (auf Initiative von Jens Blauert) und 2017 in Kiel.

Sieben strukturierte Sitzungen mit insgesamt 49 Vorträgen wurden jeweils gemeinsam von einer/einem polnischen und einer/einem deutschen Organisator/in gestaltet und geleitet (An dieser Stelle noch einmal herzlichen Dank dafür!):

- „Acoustical imaging in medicine“ (Krzysztof Opieliński und Klaus-Vitold Jenderka; 4 Vorträge von polnischer und 3 von deutscher Seite)
- „Active systems for noise and vibration control“ (Marek Pawelczyk und Joachim Bös; 4 Vorträge von polnischer und 4 von deutscher Seite)
- „Building acoustics“ (Elżbieta Nowicka und Volker Wittstock; 3 Vorträge von polnischer und 3 Vorträge von

deutscher Seite)

- „Electroacoustics and room acoustics“ (Andrzej Dobrucki und Michael Vorländer; 5 Vorträge von polnischer und 4 von deutscher Seite)
- „Psychological acoustics“ (Anna Preis und Armin Kohlrausch; 4 Vorträge von polnischer und 3 von deutscher Seite)
- „Traffic noise“ (Janusz Piechowicz und Joachim Scheuren; 2 Vorträge von polnischer und 1 von deutscher Seite)
- „Ultrasonic spectrometry and molecular acoustics of liquids“ (Marzena Dzida und Udo Kaatz; 7 Vorträge von polnischer und 2 von deutscher Seite)

DEGA-Präsident Michael Vorländer hielt im Rahmen der Eröffnungs- und der Abschlussveranstaltung jeweils eine kurze Ansprache und einer der Plenarvorträge wurde von der diesjährigen Preisträgerin des Lothar-Cremer-Preises der DEGA, Anna Warzybok von der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, gehalten.

Weitere Informationen zur „Acoustics 2018“-Konferenz (wahlweise auf Polnisch oder Englisch) finden sich derzeit noch unter <http://www.acoustics2018ustka.pl/>, das Tagungsprogramm ist momentan noch unter <http://www.acoustics2018ustka.pl/download/ProgramAcoustics2018EN.pdf> abrufbar.

Neben einem sehr interessanten und abwechslungsreichen wissenschaftlichen Tagungsprogramm gab es aber auch zahlreiche soziale und kulturelle Veranstaltungen, die die Tagungsteilnehmenden einander näherbrachten. Die Konferenz fand im mondänen „Grand Lubicz Hotel“ statt, das seine Gäste mit gewaltigen (und sehr leckeren!) Buffets und unzähligen Möglichkeiten zur Freizeitgestaltung verwöhnte. Am Mittwochabend wurde für die Konferenzteilnehmer ein großes Bankett veranstaltet. Und am Donnerstagvormittag gab es eine Exkursion zum Freilichtmuseum („Slowinisches Dorf“) Kluki in der Nähe des Lebasees, in dem die Lebensweise der Slowinzen, die manchmal auch als Kaschuben bezeichnet werden, sich selbst jedoch „Deutsche“ nannten,

vor 100 bis 200 Jahren gezeigt und erläutert wurde.

Insgesamt eine erfolgreiche und sehr gelungene Veranstaltung, die die bereits bestehenden Kontakte zwischen polnischen und deutschen Akustikerinnen und Akustikern gefestigt und noch intensiviert hat. Ein ganz herzliches „Dziękuję!“ (Danke schön!) nach Polen für die tolle Organisation der Tagung! ■

Joachim Bös

(Mitglied des Organisationskomitees der 3rd Polish-German Structured Conference on Acoustics)

17.–18.09.2018

DEGA Symposium: Interdisciplinary Topics in Acoustics: Physiology and Virtual Reality in Aachen

Das Thema des 12. DEGA-Symposium war stark interdisziplinär ausgerichtet und bot ca. 40 internationalen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus den Bereichen der Physiologischen und Virtuellen Akustik sowie der Psychoakustik ein interessantes Diskussionsforum. Das Symposium wurde durch einen inspirierenden Plenarvortrag von Prof. Georg Klump (Universität Oldenburg) eröffnet, in dem das Potenzial interdisziplinärer Arbeit in den Bereichen zwischen Biologie, Physiologie, Ingenieurwissenschaften und der Physik herausgestellt wurde. Die Themenbereiche der eingeladenen Vorträge umfassten visionäre Fragestellungen im klinischen Zusammenhang (Prof. Jesko Verhey, Magdeburg), der experimentellen Audiologie (Prof. Sarah Verhulst, Universität Gent, Belgien; Prof. Bastian Epp, DTU, Dänemark), grundlegende Fragestellungen der räumlichen Orientierung exklusiv durch Schallinformation (Prof. Lutz Wiegrebe, LMU München) und die Abbildung von neuronaler Aktivität auf Verhalten und multisensorische Wahrnehmung (Prof. Björn Kampa, RWTH Aachen; Dr. André Rupp, Universitätsklinikum Heidelberg). Eingefasst wurden diese Themen durch innovative Ansätze, virtuelle Realität im Bereich der Hörforschung anzuwenden (Prof.



der Geschäftsstelle der DEGA für die Unterstützung bei der Organisation. Wir hoffen, dass dieser Themenbereich einen festen Platz auf den kommenden DAGA-Tagungen finden wird. ■

*Bastian Epp
Janina Fels*

Janina Fels, RWTH Aachen; Prof. Volker Hohmann, Universität Oldenburg). Die fachliche Breite der Veranstaltung ermöglichte angeregte Diskussionen, um neue Fragestellungen und Synergien zu formulieren. Es zeigte sich deutlich die hohe gesellschaftliche und wissenschaftliche Relevanz dieses Forschungsgebietes und die vielen Möglichkeiten durch konstruktive Zusammenarbeit große Fragestellungen im gesamten Spektrum der Hörforschung zu bearbeiten. Es hat sich ausserdem gezeigt, dass neue Entwicklungen und Erkenntnisse

aus den Bereichen der Biologie und der technischen Akustik die Relevanz der Akustik und der DEGA in der Gesellschaft noch weiter festigen und ausbauen kann.

Die Teilnahme der Nachwuchswissenschaftler wurde durch eine großzügige Spende von HEAD acoustics ermöglicht.

Wir danken allen Vortragenden und Teilnehmern des Symposiums für ihre Beiträge, dem Institut für Technische Akustik an der RWTH Aachen für das Bereitstellen der Räumlichkeiten und

Regupur®

REGUPUR® >>> AUSGLEICHSSCHÜTTUNG

Regupur® comfort S1 » wasserfreier Einbau » nachhaltig » gesundheitlich unbedenklich » schnell und kostensparend » trittschalldämmend



NEU

■ Kalender

- **11.10.2018 in Oldenburg:**
Herbsttreffen des FA „Sprachakustik“,
siehe Seite [64](#)
- **18.–19.10.2018 in Bad Honnef:**
24. Workshop „Physikalische Akustik“,
siehe Seite [63f](#) und <https://www.dega-akustik.de/aktuelles/>
- **31.10.2018 in München:**
ALD-Veranstaltung „Lärmarme Innenstadt-Logistik“,
siehe Seite [52](#) und <http://www.ald-laerm.de/ald/projekte-des-ald/2018/ald-veranstaltung-innenstadtlogistik/>
- **02.–04.11.2018 in Detmold:**
Konferenz „Technologien des Singens“,
siehe <http://www.hfm-detmold.de/die-hochschule/forschung/aktuelle-projekte/technologien-des-singens-dfg/>
- **20.11.2018 in Berlin:**
ALD-Veranstaltung „Freizeitlärm – Probleme und Lösungen in Städten“,
siehe Seite [52](#) und <http://www.ald-laerm.de/ald/projekte-des-ald/2018/ald-veranstaltung-freizeitlaerm/>
- **04.12.2018 in Deggendorf:**
13. Deggendorfer Akustik-Seminar,
siehe <http://www.th-deg.de/de/et-mt/akustikseminar>
- **06.–08.03.2019 in Berlin:**
DEGA-Akademie-Kurs „Grundlagen der Technischen Akustik“,
siehe Seite [53](#) und <https://www.dega-akustik.de/aktuelles/>
- **18.–21.03.2019 in Rostock:**
Jahrestagung DAGA 2019,
siehe Seite [54f](#) und <http://www.daga2019.de>
- **01.–03.04.2018 in Braunschweig:**
DEGA-Akademie-Kurs „Bauakustik – von den Grundlagen zur Anwendung“,
siehe Seite [53](#) und <https://www.dega-akustik.de/aktuelles/>
- **10.04.2019 in Aachen:**
DEGA-Akademie-Kurs „DEGA-Schallschutzausweis“,
siehe Seite [53](#) und <https://www.dega-akustik.de/aktuelles/>
- **24.04.2019 bundesweit:**
22. Tag gegen Lärm,
siehe <http://www.tag-gegen-laerm.de>
- **16.–19.06.2019 in Madrid (E):**
Inter-Noise 2019,
siehe <http://www.internoise2019.org>
- **06.–07.09.2019 in Paris (F):**
EAA Spatial Audio Signal Processing Symposium,
siehe <https://sasp2019.ircam.fr/>
- **06.–08.09.2019 in Leuven (B):**
EAA Summer School,
siehe <http://ica2019.org/eea-summer-school/>
- **09.–13.09.2019 in Aachen**
23rd Int. Congress on Acoustics (ICA 2019) / EAA Euroregio,
siehe Seite [56f](#) und <http://ica2019.org>
- **13.–17.09.2019 in Detmold:**
International Symposium on Musical Acoustics (ISMA),
siehe <http://isma2019.de>
- **15.–17.09.2019 in Amsterdam:**
International Symposium on Room Acoustics (ISRA),
siehe <http://isra2019.eu>

Weitere Termine (International) finden Sie im Newsletter „EAA Nuntius“:
<http://euracoustics.org/news/eea-newsletter> ■

Menschen

Ehrungen und Gratulationen

■ Wir gratulieren

zum 80. Geburtstag (Juni 2018):
Prof. Dr. Jens Blauert, ehem. Präsident der DEGA (2001–2004), Träger der Helmholtz-Medaille (2001) und internationaler Auszeichnungen, Leiter der DAGA-Tagungen 1978, 1991 und 2002, Vorsitz der European Acoustics Association EAA (1993–1999) ■

Nachrichten und Mitteilungen aus der Fachgesellschaft

■ **Wahlausschreibung: Neuwahl des Vizepräsidenten, des Schatzmeisters und des Vorstandes**

Im Frühjahr 2019 stehen drei Wahlen an, die gemäß § 6 der DEGA-Wahlordnung hiermit ausgeschrieben werden:

- Wahl zum Amt des Vizepräsidenten bzw. designierten Präsidenten,
- Wahl zum Amt des Schatzmeisters,
- Wahl von drei weiteren Vorstandsmitgliedern.

Alle DEGA-Mitglieder sind aufgerufen, Kandidat(inn)en für die drei Wahlen vorzuschlagen (s. u.).

Im Folgenden gelten Personenbezeichnungen gleichermaßen für Personen männlichen und weiblichen Geschlechts.

1. Wahl des Vizepräsidenten (d.h. des designierten Präsidenten)

Im Jahr 2019 wird gemäß § 16(3) der Satzung ein neuer Vizepräsident vom Vorstandsrat gewählt, dessen Wahl hiermit ausgeschrieben wird. Er ist gleichzeitig designierter Präsident und übernimmt nach drei Jahren, d.h. im Sommer 2022, gemäß § 16(2) der Satzung automatisch für weitere drei Jahre das Amt des Präsidenten.

In gleicher Weise wird auch der derzeitige Vizepräsident, Prof. Dr. Jesko Verhey, im Sommer 2019 das Amt des Präsidenten bis zum Jahr 2022 übernehmen. Die bisherigen Präsidenten der DEGA waren bzw. sind:

1989–1992 Prof. Dr. Fridolin P. Mechel
 1992–1995 Prof. Dr. Volker Mellert
 1995–1998 Prof. Dr. Jürgen Meyer
 1998–2001 Prof. Dr. Joachim Scheuren
 2001–2004 Prof. Dr. Jens Blauert
 2004–2007 Prof. Dr. Hugo Fastl
 2007–2010 Prof. Dr. Joachim Scheuren
 2010–2013 Prof. Dr. Otto von Estorff
 2013–2016 Prof. Dr. Martin Ochmann
 2016–2019 Prof. Dr. Michael Vorländer

2. Wahl des Schatzmeisters

Der Schatzmeister wird gemäß § 17(3) der Satzung vom Vorstandsrat gewählt; seine Wahl wird hiermit ausgeschrieben. Bei Beschlüssen des Vorstands über Angelegenheiten des Haushaltes

und Vermögens der DEGA ist seine Zustimmung erforderlich. Seine Amtszeit beträgt drei Jahre und er kann zweimal wiedergewählt werden.

Die bisherigen Schatzmeister der DEGA waren bzw. sind:

1989–1990 Prof. Dr. Joachim Herbertz
 1991–1992 Prof. Dr. Volker Mellert
 1992–1995 Prof. Dr. Günther Schomartz
 1995–2004 Prof. Dr. Hugo Fastl
 2004–2007 Prof. Dr. Joachim Scheuren
 2007–2010 Dr. Ulrich Widmann
 2010–2019 Prof. Dr. Klaus Genuit

3. Wahl der weiteren Vorstandsmitglieder

Der Vorstand ist gemäß § 17(1) der Satzung für alle Angelegenheiten der DEGA zuständig, die nicht anderen Gremien übertragen worden sind.

Der Vorstand besteht aus dem Präsidenten, dem Vizepräsidenten (designierten Präsidenten), dem Schatzmeister sowie drei weiteren Vorstandsmitgliedern. Für diese drei weiteren Mitglieder wird die Wahl ebenfalls hiermit neu ausgeschrieben. Sie werden gemäß § 17(4) der Satzung vom Vorstandsrat für eine Amtszeit von drei Jahren gewählt und können in unmittelbarer Folge einmal wiedergewählt werden.

Zur Zeit setzt sich der Vorstand wie folgt zusammen:

- Prof. Dr. Michael Vorländer, Präsident
- Prof. Dr. Jesko Verhey, Vizepräsident
- Prof. Dr. Klaus Genuit, Schatzmeister
- Prof. Dr. Ennes Sarraj
- Prof. Dr. Brigitte Schulte-Fortkamp
- Prof. Dr. Bernhard Seeber

Für alle drei Wahlen gilt:

- Alle DEGA-Mitglieder sind berechtigt und aufgefordert, Kandidatinnen und Kandidaten für die drei Wahlen vorzuschlagen (d.h. Vizepräsident, Schatzmeister und drei Vorstandsmitglieder). Jedes persönliche Mitglied der DEGA darf als Kandidat(in) für alle drei Ämter vorgeschlagen

werden, unabhängig von der Mitgliedschaft in Gremien des Vereins. Bitte reichen Sie Ihre Vorschläge in schriftlicher Form bei der DEGA-Geschäftsstelle ein (Adresse siehe Impressum, Seite 70). Der Abgabeschluss für die Wahlvorschläge ist **Mittwoch, der 02. Januar 2019.**

- Die vorgeschlagenen Kandidaten haben danach drei Wochen Zeit, ihre Bereitschaft zur Kandidatur schriftlich zu erklären.
- Wahlberechtigt sind in allen drei Fällen die Mitglieder des DEGA-Vorstandsrates. Die Wahl erfolgt im Briefwahlverfahren, und zu den Wahlterminen werden die abgegebenen Stimmen vom Wahlausschuss ausgezählt.
- Der Wahlausschuss, bestehend aus Prof. Dr. Otto von Estorff (Wahlleiter), Dr. Stephan Lippert und Dr. Martin Klemenz, ist über die DEGA-Geschäftsstelle zu erreichen.

Gemäß der DEGA-Wahlordnung werden die drei Wahlen im Abstand von jeweils etwa vier Wochen zeitlich gestaffelt durchgeführt. Diese Regelung soll den Fall regeln und vereinfachen, wenn ein Kandidat für mehrere Ämter kandidieren will. Sollte er in ein Amt gewählt werden und diese Wahl annehmen, würde seine Kandidatur bei der jeweils folgenden Wahl hinfällig werden.

In Anlehnung an § 5(2) der Wahlordnung sind folgende Vorlaufzeiten zur Durchführung der Wahlen festgelegt worden:

- Abgabeschluss für Wahlvorschläge: Mi., 02.01.2019
- Abgabeschluss der Bereitschaft zur Kandidatur: Mi., 23.01.2019
- Bekanntgabe der gültigen Wahlvorschläge für die drei Ämter: Mi., 30.01.2019
- Abgabefrist, die Bereitschaft zur Kandidatur ggf. zu widerrufen: Mi., 13.02.2019
- Versand der Wahlunterlagen (1. Wahl – Vizepräsident): Mi., 27.02.2019

- **1. Wahl – Vizepräsident/designierter Präsident: Mi., 24.04.2019**
- Versand der Wahlunterlagen (2. Wahl – Schatzmeister): Fr., 26.04.2019
- **2. Wahl – Schatzmeister: Di., 21.05.2019**
- Versand der Wahlunterlagen (3. Wahl – Vorstandsmitglieder): Do., 23.05.2019
- **3. Wahl – drei weitere Vorstandsmitglieder: Di., 25.06.2019**
- Amtsantritt der gewählten Personen: Mo., 01.07.2019 ■

Der Wahlleiter

■ Neues Excel-Tool für DEGA-Schallschutzausweis

Nachdem die neue Version der DEGA-Empfehlung 103 „Schallschutz im Wohnungsbau – Schallschutzausweis“ im Januar 2018 veröffentlicht wurde, steht auf der Webseite <http://www.dega-schallschutzausweis.de/> nun auch eine neue Excel-Datei zur Berechnung und Erstellung von Schallschutzausweisen zur Verfügung. Ab sofort sollen die Ausweise ausschließlich mit diesem neuen Tool erstellt werden. Ausweise, die vor Oktober 2018 mit der früheren Version von 2009 ausgestellt wurden, sind darüber hinaus weiterhin gültig. ■

■ Fachausschüsse / Fachgruppen

Fachgruppe „junge DEGA“



Vorsitzender:

B.Sc. Martin Heroldt, Uppenkamp und Partner GmbH, Berlin
martin.heroldt@web.de

Rückblick: Gemeinsamer Herbstworkshop von jDEGA, jDPG und FA Musikalische Akustik

Als Fachgruppe junge DEGA möchten wir junge AkustikerInnen ansprechen und mit anderen Akustikbegeisterten zusammen führen. Hierfür haben wir vom 21.–23.09.2018 unseren Herbstworkshop „Physik trifft Musik“ mit der jungen Deutschen Physikalischen Gesellschaft (jDPG) und dem DEGA-Fachausschuss Musikalische Akustik (FAMA) in Bad Honnef abgehalten.



Im Rahmen der Kooperationen kamen so Personen nicht nur aus der Physik sowie dem Ingenieurwesen, sondern auch aus den Musikwissenschaften und dem Instrumentenbau zusammen. Das Wochenende haben die etwa 40 Teilnehmenden, davon 14 aus der jDEGA, in den beeindruckenden Räumlichkeiten des Physikzentrums Bad Honnef verbringen können, das für das Programm aus Vorträgen, Workshops sowie Musik ein ideales Umfeld mit erstklassiger Versorgung bot.

Zum Auftakt wurde die Gruppe von der berühmten Orgelbauwerkstatt Klais im benachbarten Bonn durch ihre Räume geführt, und zwei Mitarbeiter haben uns einen Einblick in die Faszination ihres traditionsreichen Handwerks gegeben. Für das interdisziplinäre Seminar konnten darüber hinaus in den beiden folgenden Tagen mehrere engagierte Gastbeiträge aus unterschiedlichen Bereichen der musikalischen Akustik gewonnen werden. Prof. David Wharam vermittelte Grundlagen der musikalischen Akustik und Psychoakustik, Andreas Kägi ließ uns an seiner langjährigen Erfahrung als Geigenbauer teilhaben, Yuri Landman hat uns mit seinen experimentellen Instrumenten fasziniert („Don't learn by the tradition!“) und schließlich stieß Hans-Joachim Raida mit Prof. Malte Kob in einem interaktiven Workshop mit Exponentialhörnern und Laser-Vibrometer

eine Diskussion über Kraftkonzept und Impulskonzept an. Außerdem nutzten weitere sieben Teilnehmende die Gelegenheit, mit Kurzvorträgen aus ihren Projekten und Forschungen zu berichten. Wir wissen nun also unter anderem, was die Hand dort im Horn verloren hat und warum Death-Metal Growling mit der richtigen Technik den Stimmlippen nichts anhaben kann.

Die Atmosphäre war geprägt von der Begeisterung, gemeinsam die beiden Interessen Physik und Musik in so kreativer und informativer Weise vereinigen zu können. Aus den Musikzimmern des Tagungszentrums klang bis tief in die Nacht Musik und Gelächter. Klassische Kammermusik, Jazz-Impro mit Theren sowie Yuris elektronische Klangexperimente haben so manche Augen leuchten lassen. Das Wochenende war ein großer Erfolg und eine gelungene Kooperation zwischen jDEGA, FAMA und jDPG. Bei allen Beteiligten ist der Wunsch geweckt, in Zukunft wieder daran anzuknüpfen. Eine Dokumentation der Beiträge wird in Kürze auf der FAMA-Seite (<http://www.dega-akustik.de/fachausschuesse/ma>) verfügbar sein. Im Rahmen des Herbstworkshops wurde außerdem an Plänen und Ideen für das kommende Jahr gearbeitet. Neben Aktionen auf der DAGA soll es im nächsten Jahr auch Angebote auf der ICA (International Conference on Acoustics Aachen,

09.–13.09.2019) und der ISMA (International Symposium on Music Acoustics, 13.–17.09.2019 in Detmold) zusammen mit dem europaweiten Young Acousticians Network geben. Geplant ist darüber hinaus eine Sammlung an anschaulichen Akustik-Experimenten, die unter anderem für die Lehre eingesetzt werden können. AkustikerInnen, die zu dieser Sammlung etwas beitragen oder mehr davon erfahren möchten, sind sehr herzlich eingeladen, uns zu kontaktieren! Ebenso soll das Mentoring-Programm weiter ausgebaut werden. Interessierte Seniors und Juniors können sich auch dafür direkt an uns wenden.

Die Vorbereitungen für die DAGA 2019 haben indes schon zuvor begonnen. Diese wird vom 18.–21. März 2019 in Rostock stattfinden. Wir haben uns dabei um günstige Hotelzimmer gekümmert. Hierfür sind Doppel- und Dreibettzimmer im Jellyfish Hostel Rostock für junge Akustiker reserviert. Anmeldungen werden bis zum 10.01.2019 bei uns entgegen genommen. Natürlich könnt Ihr euch bei Fragen hierzu auch gern bei uns melden. Wer in diesem Jahr einen Vortrag oder ein Poster für die DAGA einreichen möchte oder schon eingereicht hat, kann sich zudem auch noch um einen der „DEGA Student Grants“ bewerben. Hierfür findet Ihr alle Infos auf der Website der DEGA unter <http://www.dega-akustik.de/preise-grants/stud-grants>. ■

*Dorothea Lincke
Martin Heroldt*

Arbeitsring Lärm der DEGA (ALD)



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

Der ALD führt im Herbst zwei Veranstaltungen durch, die im Rahmen des

Projektes „Lärmschutz-Lösungen für die neuen Herausforderungen in der Stadtentwicklung“ durch das UBA und BMU gefördert werden:

1. „Lärmarme Innenstadt-Logistik“ am 31.10.2018 in München:

Detaillierte Informationen zur Veranstaltung (Programm und Anmeldung) erhalten Sie auf S. 52 oder unter <http://www.ald-laerm.de/ald/projekte-des-ald/2018/ald-veranstaltung-innenstadtlogistik/>

2. „Freizeitlärm – Probleme und Lösungen in Städten“ am 20.11.2018 in Berlin:

Die Veranstaltung wird gemeinsam mit dem Umweltministerium von Rheinland-Pfalz durchgeführt. Das Programm sowie weitere Informationen zur Veranstaltung finden Sie auf S. 52 und unter <http://www.ald-laerm.de/ald/projekte-des-ald/2018/ald-veranstaltung-freizeitlaerm/>. ■

*Michael Jäcker-Cüppers
Christian Beckert
Dirk Schreckenberg*

Fachausschuss Musikalische Akustik



Vorsitzender:
Prof. Dr. Malte Kob, Hochschule für Musik Detmold
kob@hfm-detmold.de

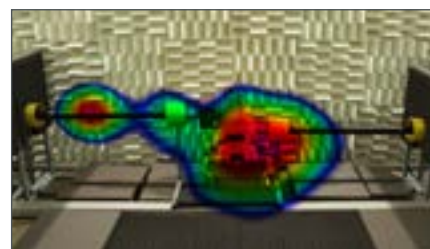
- „Rückblick auf jDPG/jDEGA/FA-MA-Herbst-Workshop“: siehe Bericht der jungen DEGA (S. 62)
- Internationale Konferenz zum DFG-Projekt „Technologien des Singens“: 02.–04.11.2018 in Detmold (<http://www.hfm-detmold.de/TDS>)
- Einladung zur Teilnahme bei der MV des FA-MA auf der DAGA 2019 in Rostock und insbesondere der

Strukturierten Sitzung „Analyse und Synthese der Richtwirkung von Musikinstrumenten“

- Einladung zum International Symposium on Musical Acoustics (ISMA), 13.–17.9.2019 in Detmold (<http://www.isma2019.de>) ■

Malte Kob

Fachausschuss Physikalische Akustik



Vorsitzender:
Dr. Joachim Böes, Technische Universität Darmstadt
boes@sam.tu-darmstadt.de

24. DEGA-Workshop Physikalische Akustik am 18./19.10.2018 in Bad Honnef

Noch ist es nicht zu spät: Sie können sich kurzentschlossen noch zur Teilnahme am 24. DEGA-Workshop Physikalische Akustik am 18./19.10.2018 im Physizentrum Bad Honnef anmelden! Das Thema unseres Workshops lautet diesmal „Impulsschall/Transientenschall“. Organisiert wurde er von Joachim Böes, Stephan Lippert und Martin Ochmann. In insgesamt 15 spannenden Vorträgen werden dabei Aspekte wie Schieß- und Sprenglärm, numerische Simulationsverfahren im Zeitbereich, Rammschall, Problemstellungen aus Geophysik und Bauakustik sowie die Anwendung von Stoßwellen in der Medizintechnik beleuchtet.

Eine Besonderheit des diesjährigen DEGA-Workshops ist eine gemeinsame Sitzung mit dem Arbeitskreis Energie (AKE) der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) am Donnerstag-nachmittag. Der AKE-Herbstworkshop findet seit vielen Jahren parallel zur gleichen Zeit wie unser DEGA-Workshop Physikalische Akustik statt, aber bislang gab es keine Berührungspunkte. Daher

entstand die Idee einiger „gemeinsamer“ interdisziplinärer Vorträge (am Donnerstag ab 16:45 Uhr), in denen akustische Verfahren vorgestellt werden, die der Energiegewinnung dienen.

Eine Einladung mit weiteren Informationen zum Workshop, das aktuelle Programm mit Kurzfassungen der Vorträge sowie ein Anmeldeformular finden Sie auf der Webseite des Fachausschusses unter <https://www.dega-akustik.de/fachausschuesse/pa/dokumente/24-workshop-honnef/>.

Anmeldungen mittels des Anmeldeformulars (bevorzugt am Bildschirm ausgefüllt und per E-Mail an boes@sam.tu-darmstadt.de versandt) sind noch möglich, bis die Kapazitäten des Physikzentrums Bad Honnef erschöpft sind. Machen Sie gern auch sonstige Interessierte und potenzielle Teilnehmende auf unseren Workshop aufmerksam!

Nächste Fachausschusssitzung am 18.10.2018 im Rahmen des 24. DEGA-Workshops

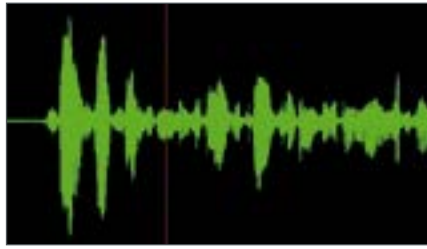
Die nächste Sitzung des Fachausschusses Physikalische Akustik wird am 18.10.2018 um 13:30 Uhr im Rahmen des o.g. 24. DEGA-Workshops in Bad Honnef stattfinden. Mitglieder und Interessierte des Fachausschusses, aber auch Gäste sind herzlich zur Sitzung und zur engagierten Mitarbeit eingeladen.

Strukturierte Sitzungen für die DAGA 2019 in Rostock und/oder für den ICA 2019 in Aachen

Es besteht noch die Möglichkeit, zu Themen des Fachausschusses Physikalische Akustik strukturierte Sitzungen für die DAGA 2019 in Rostock und/oder für den ICA 2019 in Aachen kurzzeitig anzumelden und zu organisieren. Bei Interesse melden Sie sich bitte umgehend bei der Fachausschussleitung (boes@sam.tu-darmstadt.de), dann werde ich den Kontakt zu den jeweiligen Konferenzorganisationsherstellern herstellen und schauen, ob und wie das konkret umsetzbar ist. ■

Joachim Böse

Fachausschuss Sprachakustik



Vorsitzender:

Dr. Janto Skowronek, Hochschule für Technik Stuttgart

Herbsttreffen des FA Sprachakustik

Im Rahmen der ITG-Fachtagung in Oldenburg (<https://uol.de/itg2018/>) findet unser Herbsttreffen am Donnerstag, den 11. Oktober 2018 um 12:30–13:30 Uhr statt. Wir treffen uns dort an der Universität Oldenburg im Raum W30 3-324.

Unser Vorschlag für die zu besprechenden Themen sind:

- Vertiefung der Zusammenarbeit mit der ITG
- geplante strukturierte Sitzungen für die DAGA 2019
- Webauftritt des Fachausschusses auf den DEGA-Webseiten
- Sonstiges ■

Janto Skowronek

Fachausschuss Virtuelle Akustik



Vorsitzender:

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

Auf der DAGA 2018 wurde die Leitung des Fachausschusses Virtuelle Akustik wiedergewählt. Ein detailliertes Protokoll der Fachausschuss-Sitzung ist auf www.dega-akustik.de/fachausschuesse/va.html zu finden.

Der FA VA unterstützt zur Nachwuchsförderung „Europe's Second 3D Audio

Production Competition“ mit der Preisverleihung auf der Tonmeistertagung in Köln, 14.–17. November 2018. Dieses Mal gab es 27 Einreichungen aus 5 europäischen Ländern und eine 15-köpfige Jury hat in 3 Kategorien (1: zeitgenössische Musik/Computermusik, 2: Audiodrama/Soundscape/Dokumentation, 3: Musikaufnahme/Studioproduktion) auf geeigneten 3D-Audio-Abhöransystemen je die Top 3 ausgewählt. Die Beiträge werden in Köln auf einer großen 3D-Audioanlage zu hören sein. In der Preisverleihung werden Juroren Kommentare zu den Stücken dazu verlesen. Der FA VA hat über die Sommermonate einen Umlaufbeschluss über das DEGA-Memorandum VA 1201 über die „Durchführung und Dokumentation von Audio-Produktionen für wissenschaftliche Anwendungen in der Akustik“ abgehalten. Ein Drittel der Mitglieder haben ihre Stimme abgegeben, und mit 15 Zustimmungen und 2 Zustimmungen mit Kommentar/Änderungswunsch ist das Memorandum angenommen. Nun wird mit den Fachausschüssen Hörakustik und Musikalische Akustik geprüft, ob das Memorandum gemeinsam verabschiedet werden kann. ■

Franz Zotter

■ Mitglieder / Fördermitglieder

Derzeit hat die Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.

- 2.000 persönliche Mitglieder
- und 80 Fördermitglieder (Stand September 2018).

Über alle Leistungen und Angebote, die mit einer Mitgliedschaft verbunden sind, können sich interessierte Akustiker(innen) und Firmen auf <http://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
- BASF SE, Ludwigshafen
- Baswa AG, Baldegg (CH)
- Bayer Bauphysik Ingenieurgesellschaft mbH, Fellbach
- Berleburger Schaumstoffwerk GmbH, Bad Berleburg
- Bertrandt Technikum GmbH, Ehningen
- BeSB GmbH, Berlin
- Bette GmbH & Co. KG, Delbrück
- Brose Fahrzeugteile GmbH, Oldenburg
- Brüel & Kjaer GmbH, Bremen
- CADFEM GmbH, Grafing
- CAE Software und Systems GmbH, Gütersloh
- Carcoustics TechConsult GmbH, Leverkusen
- Cervus Consult GmbH, Willich
- Cirrus Research plc Deutschland, Frankfurt/M.
- Comsol Multiphysics GmbH, Göttingen
- DataKustik GmbH, Gilching
- deBAKOM GmbH, Odenthal
- Ecophon Deutschland, Lübeck
- EM Plan, Neusäß
- ESI Engineering System International GmbH, Eschborn
- FAIST ChemTec GmbH, Worms
- Gardner Denver Deutschland GmbH, Bad Neustadt/Saale
- 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
- IAC Industrial Acoustics Company GmbH, Niederkrüchten
- IFB Ingenieure GmbH, Bad Teinach-Zavelstein
- Knauf AMF GmbH & Co. KG, Grafenau
- Kötter Consulting Engineers GmbH & Co. KG, Rheine
- Kraiburg Relastec GmbH & Co. KG, Salzwedel
- Kurz und Fischer GmbH Beratende Ingenieure, Winnenden
- Lärmkontor GmbH, Hamburg
- Laird Bochum GmbH, Bochum
- Lairm Consult GmbH, Bargteheide
- Lehrstuhl Strömungsmaschinen, Universität Rostock
- Lignotrend Produktions GmbH, Weilheim-Bannholz
- Metecno Bausysteme GmbH, Blankenhain
- Microflown Technologies BV, Arnhem (NL)
- Microtech Gefell GmbH, Gefell
- Möhler + Partner Ingenieure AG, München
- 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
- Peiker acustic GmbH, Friedrichsdorf
- P+Z Engineering GmbH, München
- Renz Systeme GmbH, Aidlingen
- Rockwool Rockfon GmbH, Gladbeck
- Röchling Automotive SE & Co. KG, Worms
- Rossoacoustic, Stuttgart
- Saint-Gobain Isover G+H AG, Landenburg
- Schaeffler Gruppe, Herzogenaurach
- Schöck Bauteile GmbH, Baden-Baden
- Sennheiser electronic GmbH & Co. KG, Wedemark
- Siemens Industry Software GmbH, München
- Sinus Messtechnik GmbH, Leipzig
- solaris Ingenieur-Consult GmbH, Chemnitz
- Sonatech GmbH & Co. KG, Ungerhausen
- soni.eK Planung Beratung SV-Büro, Bamberg
- 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
- Verlagsgesellschaft R. Müller GmbH & Co. KG, Köln
- Wölfel Gruppe, Höchberg
- Xarion Laser Acoustics GmbH, Wien (A)
- ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen
- Zodiac Data Systems GmbH, Bergisch Gladbach

Normen/Richtlinien

Neue Regelwerke zu den Themen Akustik und Lärminderung (Mai–Sept. 2018)

Bezeichnung	Titel	Preis*
Fachgebiet Audiologie / Medizintechnik		
DIN EN 60645–1	Akustik – Audiometer – Teil 1: Reinton-Audiometer (IEC 60645-1:2017); Deutsche Fassung EN 60645–1:2017	147,20 €
DIN EN 61669	Elektroakustik – Messung der Kenndaten von Hörgeräten am menschlichen Ohr (IEC 61669:2015); Deutsche Fassung EN 61669:2016	136,80 €
DIN EN 62489–1	Akustik – Audiofrequenz-Induktionsschleifenanlagen zur Unterstützung von Hörsystemen – Teil 1: Verfahren zur Messung und Angabe des Betriebsverhaltens der Systemkomponenten (IEC 62489–1:2010 + A1:2014 + A2:2017); Deutsche Fassung EN 62489–1:2010 + A1:2015 + A2:2018	119,60 €
DIN EN IEC 60118–4	Akustik – Hörgeräte – Teil 4: Induktionsschleifen für Hörgeräte – Leistungsanforderungen (IEC 60118–4:2014 + A1:2017); Deutsche Fassung EN 60118–4:2015 + EN IEC 60118–4:2015/A1:2018	153,40 €
DIN EN ISO 389–1	Akustik – Standard-Bezugspegel für die Kalibrierung audiometrischer Geräte – Teil 1: Äquivalente Bezugs-Schwellenschalldruckpegel für reine Töne und supraaurale Kopfhörer (ISO 389-1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 389–1:2018	96,00 €
Fachgebiet Bau- und Raumakustik		
DIN EN 16205	Messung von Gehschall auf Fußböden im Prüfstand; Deutsche Fassung EN 16205:2013 + A1:2018	75,40 €
E DIN EN 14366/A1	Messung der Geräusche von Abwasserinstallationen im Prüfstand; Deutsche und Englische Fassung EN 14366:2004/prA1:2018 (Einspruchsfrist: 17.10.2018)	33,60 €
E DIN EN ISO 11654	Akustik – Schallabsorber – Bewertung von Schallabsorptionsgraden (ISO/DIS 11654.2: 2018); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 11654:2018	61,70 €
Fachgebiet Elektroakustik / Messgeräte		
DIN EN IEC 60942	Elektroakustik – Schallkalibratoren (IEC 60942:2017); Deutsche Fassung EN IEC 60942:2018	141,90 €
Fachgebiet Lärmschutz		
DIN EN 16951–1	Bahnanwendungen – Oberbau – Lärmschutzwände und verwandte Vorrichtungen zur Beeinflussung der Luftschallausbreitung – Bewertungsverfahren für das Langzeitverhalten – Teil 1: Akustische Merkmale; Deutsche Fassung EN 16951–1:2018	75,40 €
E DIN EN 352–1	Gehörschützer – Allgemeine Anforderungen – Teil 1: Kapselgehörschützer; Deutsche und Englische Fassung prEN 352–1:2018	75,40 €
E DIN EN 352–2	Gehörschützer – Allgemeine Anforderungen – Teil 2: Gehörschutzstöpsel; Deutsche und Englische Fassung prEN 352-2:2018	75,40 €
E DIN EN 352–3	Gehörschützer – Allgemeine Anforderungen – Teil 3: An Kopfschutz und/oder Gesichtsschutzgeräten befestigte Kapselgehörschützer; Deutsche und Englische Fassung prEN 352-3:2018	75,40 €

Bezeichnung	Titel	Preis*
Fachgebiet Maschinen- und Fahrzeugakustik		
DIN ISO 15242-1	Wälzlager – Geräuschprüfung (Körperschallmessung) – Teil 1: Grundlagen (ISO 15242-1:2015)	82,60 €
DIN ISO 15242-2	Wälzlager – Geräuschprüfung (Körperschallmessung) – Teil 2: Radial-Kugellager mit zylindrischer Bohrung und zylindrischer Mantelfläche (ISO 15242-2:2015)	61,70 €
E DIN EN 17285	Bahnanwendung – Akustik – Messung akustischer Türsignale von Eisenbahnfahrzeugen; Deutsche und Englische Fassung prEN 17285:2018 (Einspruchsfrist: 24.10.2018)	108,80 €
E DIN EN 60704-2-7	Elektrische Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke – Prüfvorschrift für die Bestimmung der Luftschallemission – Teil 2-7: Besondere Bestimmungen für Lüfter (IEC 59L/154/CD:2018); Text Deutsch und Englisch	89,00 €
E DIN EN 60704-2-8	Elektrische Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke – Prüfvorschrift für die Bestimmung der Luftschallemission – Teil 2-8: Besondere Anforderungen an elektrische Rasierer und Haarschneidemaschinen oder Haartrimmer (IEC 59L/155/CD:2018); Text Deutsch und Englisch	82,60 €
E DIN EN 61400-11/A1, VDE 0127-11/A1	Windenergieanlagen – Teil 11: Schallmessverfahren (IEC 88/615/CDV:2017); Deutsche und Englische Fassung EN 61400-11:2013/prA1:2017	Print: 12,47 €
E DIN EN ISO 1203/A1	Akustik – Geräuschabstrahlung von Maschinen und Geräten – Bestimmung von Emissions-Schalldruckpegeln am Arbeitsplatz und an anderen festgelegten Orten aus dem Schallleistungspegel – Änderung 1 (ISO 11203:1995/DAM 1:2018); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 11203:2009/prA1:2018	61,70 €
E DIN EN ISO 20361	Flüssigkeitspumpen und -pumpenaggregate – Geräuschmessung – Genauigkeitsklassen 2 und 3 (ISO/DIS 20361:2018); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 20361:2018	103,00 €
E DIN EN ISO 22868	Forst- und Gartenmaschinen – Geräuschmessnorm für handgehaltene Maschinen mit Verbrennungsmotor – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 (ISO/DIS 22868:2018); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 22868:2018	125,30 €
E DIN ISO 15242-3	Wälzlager – Geräuschprüfung (Körperschallmessung) – Teil 3: Radial-Pendelrollenlager und Radial-Kegelrollenlager mit zylindrischer Bohrung und zylindrischer Mantelfläche (ISO 15242-3:2017); Text Deutsch und Englisch	61,70 €
E DIN ISO 15242-4	Wälzlager – Geräuschprüfung (Körperschallmessung) – Teil 4: Radial-Zylinderrollenlager mit zylindrischer Bohrung und zylindrischer Mantelfläche (ISO 15242-4:2017); Text Deutsch und Englisch	75,40 €
Fachgebiet Ultraschall / Hydroakustik		
DIN ISO 18406	Unterwasserakustik – Messung des abgestrahlten Wasserschalls bei der Schlagrammung von Pfählen (ISO 18406:2017)	114,10 €
E DIN EN ISO 22232-2	Zerstörungsfreie Prüfung – Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschall-Prüfausrüstung – Teil 2: Prüfköpfe (ISO/DIS 22232-2:2018); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 22232-2:2018	147,20 €
E DIN EN ISO 22232-3	Zerstörungsfreie Prüfung – Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschall-Prüfausrüstung – Teil 3: Komplette Prüfausrüstung (ISO/DIS 22232-3:2018); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 22232-3:2018	75,40 €

*) Download

Bezug aller o.g. Regelwerke über den Beuth Verlag (<http://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 ⁶⁾) können bei der DEGA-Geschäftsstelle bestellt werden (Preise inkl. MwSt; zzgl. Versand; Zahlungsbedingungen siehe <https://www.dega-akustik.de/publikationen/tagungsbaende/zahlung>)

	Name	gedruckt	online
Zeitschrift	Akustik Journal (drei Ausgaben pro Jahr)	0 € ¹⁾	X
	Acta Acustica united with Acustica	X ²⁾	X ³⁾
Tagungsbände	DAGA-Tagungsbände „Fortschritte der Akustik“ (1970–2018)		X ⁴⁾
	Proceedings ICA / INTER-NOISE		X ⁵⁾
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“		X
	Memorandum „Schallschutz im eigenen Wohnbereich“		X
Schriftenreihe „Geschichte der Akustik“	Heft 1: Von der Antike bis in das 20. Jahrhundert	10,- €	
	Heft 2: Akustisches Wissen auf den Transferwegen	10,- €	
	Heft 3: Preisträger europäischer Wissenschaftsakademien	10,- €	
	Heft 4: Sondhauß-Röhre, Seebeck-Sirene	15,- €	
	Heft 5: Von den Äolstönen bis zur Strouhal-Zahl	12,- € ⁶⁾	
	Heft 6: Von der Luftsirene bis zur russischen Aeroakustik	12,- € ⁶⁾	
	Heft 7: Lord Rayleigh, Sir Horace Lamb, Sir James Lighthill	10,- € ⁶⁾	
	Heft 8: Große Wissenschaftler mit Beiträgen zur Akustik	14,- € ⁶⁾	
	Heft 9: Kundt, Waetzmann, Schuster	12,- € ⁶⁾	

¹⁾ für Mitglieder

²⁾ jährlich zzgl. 60,- € für DEGA-Mitglieder

³⁾ ohne Aufpreis für DEGA-Mitglieder

⁴⁾ die zugehörigen CD-/DVD-/Buchprodukte (sofern vorhanden) können weiterhin käuflich erworben werden

⁵⁾ Anleitung für den Zugang unter <https://www.dega-akustik.de/dega/aktuelles/ica-und-inter-noise/>

⁶⁾ Bestellungen ausschließlich online über <http://www.book-on-demand.de>

	Name	gedruckt	online
Fachgebiet Lärm	Broschüre „Lärm im Alltag“		X
	ALD-Broschüre „Straßenverkehrslärm“	2,- €	X
	Hörbeispiele und Geräuschsituationen		X
	ALD-Broschüre „Energiewende und Lärmschutz“	2,- €	X
	ALD-Broschüre „TEchnologies of NOise Reduction (TENOR)“		X
	ALD-Broschüre „Schienenverkehrslärm – Ursachen, Wirkungen, Schutz“	2,- €	X
Fachgebiet Musikalische Akustik	Tagungsband (2015) „Musikalische Akustik zwischen Empirie und Theorie“		X
	Tagungsband (2013) „Nuancen in der musikalischen Akustik“		X
	Literaturdatensammlung Musikalische Akustik		X
Fachgebiet Lehre der Akustik	Dissertationsregister Akustik		X
	Studienführer „EAA Schola“		X
Fachgebiet Hörakustik	Kompodium zur Durchführung von Hörversuchen in Wissenschaft und industrieller Praxis (Entwurf)		X

Impressum

Akustik Journal Nr. 03 / Oktober 2018

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

Redaktionsbeirat

Prof. Dr.-Ing. habil. Ercan Altinsoy

Dr. rer. nat. Judit Angster

Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Becker

Dr. phil. André Fiebig

Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Kletsch-
kowski

ao. Univ.-Prof. Dr. med. Peter Lercher

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.heilmeyerundserнау.com/

Druck

Laserline GmbH

Web: www.laser-line.de

Bildnachweise

S. 1 – Titelseite © TU Berlin, Fachgebiet Audiokommunikation ; S. 3 – Editorial: Bundesumweltministerin Svenja Schulze: © BMU / Sascha Hilgers ; S. 52 – Veranstaltungen: ALD-Veranstaltung „Lärmarme Innenstadt-Logistik“ © Rainer Kühne, München; S. 52 – Veranstaltungen: ALD-Veranstaltung „Freizeitlärm“ © Andreas F. X. Süß, Visuelle Kommunikation, Berlin; S. 53 – Veranstaltungen: DEGA-Akademie „Grundlagen der Technischen Akustik“ © Ennes Sarradj, Berlin; S. 54 – Veranstaltungen: DAGA 2019, Logo © Ina Platte, inani-design.de; S. 54 – Veranstaltungen: DAGA 2019, Tagungsleitung © bereitgestellt mit freundlicher Genehmigung der Tagungsleiter; S. 54 – Veranstaltungen: DAGA 2019, Foyer StadtHalle Rostock © Angelika Heim, StadtHalle Rostock / inRostock GmbH ; S. 55 – Veranstaltungen: DAGA 2019, Strandpromenade im Rostocker Ortsteil Warnemünde © René Legrand, Rostock; S. 55 – Veranstaltungen: DAGA 2019, Vision StadtHalle Rostock 2018 © INROS Lackner SE, Visualisierung: archlab; S. 56 – Veranstaltungen: ICA 2019 / EAA Euroregio, Logo © Ina Platte, inani-design.de; S. 56 – Veranstaltungen: ICA 2019 / EAA Euroregio, Panorama Aachen © davis / fotolia.com, S. 56 – Veranstaltungen: ICA 2019 / EAA Euroregio, Vortragssaal im Eurogress © mit freundlicher Genehmigung des Eurogress Aachen; S. 56 – Veranstaltungen: ICA 2019 / EAA Euroregio, Leuven Rathaus © KarlBruninx, Leuven; S. 59 – Veranstaltungen: DEGA-Symposium, Gruppenbild © Rolf Kaldenbach, Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen; S. 62 – Fachgruppe „junge DEGA“: Herbstworkshop, Gruppenbild © Maike Wehmeyer, Karlsruhe; S. 63 – Fachausschuss Musikalische Akustik © Artem Furman / fotolia.com; S. 63 – Fachausschuss Physikalische Akustik © SAM, TU Darmstadt; S. 64 – Fachausschuss Sprachakustik © SpeechRecorder, IPS, LMU München; S. 64 – Fachausschuss Virtuelle Akustik © Sascha Spors, Universität Rostock, Institut für Nachrichtentechnik

BERTRANDT ...

AKUSTIK-LÖSUNGEN IM BEREICH AUTOMOTIVE –
VOLL ABGEFAHREN, DIESE RUHE!



**Seit vielen Jahren eine verlässliche Größe
im Bereich der Automobilentwicklung**

Von Abroll-, Antriebs- und Windgeräuschen bis zur individuellen Wahrnehmung: Unsere Kunden haben einen hohen Qualitätsanspruch hinsichtlich eines akustisch optimierten und störgeräuschfreien Fahrzeugs. Bertrandt kombiniert virtuelle Simulations- und physische Prüfmethoden, um Ihnen in der Produktentstehung optimale Lösungen anzubieten.

Bertrandt ist Ihr Entwicklungspartner für Akustik von Struktur/Komponente über Design bis zur Gesamtfahrzeugakustik. Unsere Ingenieure arbeiten in den Laboren oder lösen Projekte vor Ort.

FÜR JEDEN KUNDEN DIE BESTE LÖSUNG.
www.bertrandt.com

versuch@bertrandt.com

Die neue akustische Kamera AC100

*** kompakt * mobil * robust * preisgünstig ***

SINUS
Messtechnik GmbH



Sehen was man hört: mit der akustischen Kamera AC100

Die AC100 ist eine kompakte und sehr einfach zu bedienende akustische Kamera zur Schallquellenortung. Verbinden Sie die Kamera AC100 über das USB-Kabel mit ihrem PC, installieren und starten Sie die Software BeamformX und führen Sie in kürzester Zeit die Messungen und Analysen durch.

Aufgrund der hohen Leistung, der einfachen Bedienung und des unschlagbar günstigen Preises ist die AC100 für eine breite Palette von Anwendungen in Forschung und Produktion bestens geeignet. BeamformX benutzt den innovativen Algorithmus **Robust Functional Beamforming**. Im Vergleich zum herkömmlichen Beamforming werden eine wesentlich höhere Dynamik sowie mehr räumliche und zeitliche Details erzielt.



Technische Spezifikation der AC100

Array-Abmessung	40 x 40 x 3 cm
Mikrofone	40 interne MEMS-Mikrofone
AD-Wandler	24 Bit ADC
Abtastrate	51.2 kHz, Dezimation wählbar
Anti-Aliasfilter	ja, integriertes Digitalfilter
Frequenzbereich	200 Hz bis 25 kHz
Maximaler Pegel	120 dB
Dynamikbereich	>30 dB (5 kHz bis 20 kHz)
Arbeitsentfernung	0.1 m bis unendlich
DSP-System	im Array integriert
Interface	USB 2.0 (Daten, Strom)
Optische Kamera	5 Megapixel-Kamera bis zu 30 Bilder/s
Halterung	Stativgewinde 3/8"
Handgriffe	2 abnehmbare Griffe
PC-Anforderungen	i5 mit Win7 oder höher, 64 Bit
Optional	4 digitale I/O (2x In, 2x Out)
Software	BeamformX für Windows (Echtzeit und Postprozeß)