

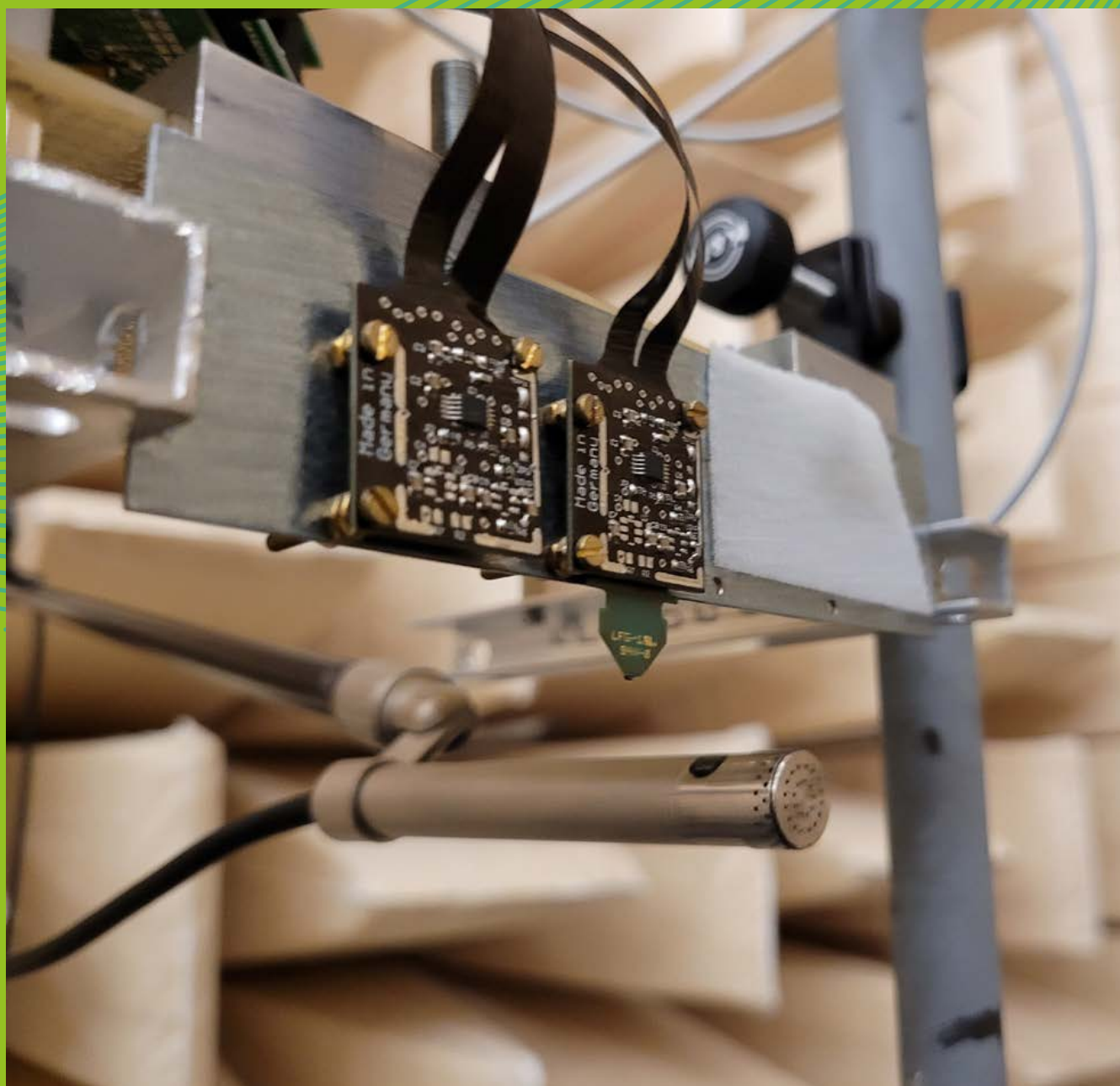
Nr. 02/ Juni 2023

AKUSTIK JOURNAL



Akustische Kavitation und ihre numerische Modellierung ■ Bioinspiriertes Mikrofon – die MEMS-Cochlea ■ Physiological Acoustics ■

Ehrungen der DEGA 2023 ■ DEGA-Akademie-Kurse im Jahr 2023 ■ 16. DEGA-Symposium „Akustik und Lärm in Büro und Schule“ ■ Rückblick: 26. Tag gegen Lärm – International Noise Awareness Day 2023 ■ Vorschau: Jahrestagung DAGA 2024 in Hannover ■





Pegel



Monitoring



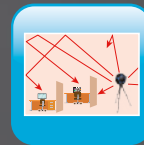
Schallleist.



Intensität



FFT-Analyse



Nachhall



STIPA



Bauakustik



VIEW TBL FUNC INFO



Editorial

Innovation bei der Beurteilung von Umgebungsgeräuschen

Seit 1988 existiert die DEGA mit ihren Fachausschüssen zu diversen Themen der Akustik. 1998 haben die Fachausschüsse Hörakustik und Lärm den „Tag gegen Lärm (TGL)“ gegründet. Der Arbeitsring Lärm der DEGA (ALD) unterstützt seit 2009 massiv die Bemühungen, den Lärm in Deutschland zu reduzieren. Nach den aktuellen Angaben des Umweltbundesamtes (2020) fühlt sich nach wie vor ein großer Teil der Bevölkerung durch Lärm belastigt, die meisten (76 %) durch den Straßenverkehr, gefolgt durch den Nachbarschaftslärm (57 %) und den Industrielärm (50 %). Nach DIN 1320 wird Lärm als Hörschall definiert, der die Stille oder eine gewollte Schallaufnahme stört oder zu Störungen, Belästigungen, Beeinträchtigungen oder Schäden führen kann. Lärm hängt daher von den physikalischen Gegebenheiten wie auch psychoakustischen Eigenschaften des Gehörs ab sowie von den kognitiven, psychologischen Aspekten, die interindividuell sehr unterschiedlich sind. Lärm kann nicht allein durch einen A-bewerteten Schalldruckpegel bestimmt werden. Insbesondere kann Lärm nicht berechnet werden.

Obwohl viele Schallquellen leiser geworden sind, ist die Belästigung gestiegen aufgrund der erhöhten Anzahl von Ereignissen, aber auch durch die Entstehung von neuen akustischen Quellen, die vielleicht nicht laut, aber unangenehm sind wie Wärmepumpen, Windkraftanlagen und AVAS-Signale (Acoustic Vehicle Alert System) von Elektrofahrzeugen. Wärmepumpen sind zwar nicht laut, aber können durch Modulationen, zeitlich sich verändernde Töne auffällig sein. Ähnliches gilt für Windkraftanlagen, die nicht nur tieffrequenten Schall erzeugen, sondern durch die sich wiederholende Monotonie von moduliertem Rauschen und Pfeifen eine Lästigkeit entfalten. Eine Herausforderung für den Akustiker liegt in der E-Mobilität. Grundsätzlich sind E-Fahrzeuge leise, aber durch Tonalität auffallend. Und weil Elektrofahrzeuge so leise sind, fordert der Gesetzgeber ein künstliches Außengeräusch, das je nach Ausgestaltung nervig oder in Kombination mit mehreren Fahrzeugen disharmonisch wirkt.

Lärm kann nicht allein mit dem A-Pegel beschrieben werden; es werden Verfahren benötigt, die detaillierter die spektrale Zusammensetzung und die zeitlichen Muster berücksichtigen, wie sie aus der inzwischen standardisierten Psychoakustik bekannt sind. Die neuen Geräuschquellen verlangen zusätzliche Analysen. Neben dem A-bewerteten Schalldruckpegel werden psychoakustische Parameter relevant, wie Lautheit, Schärfe, Rauigkeit, Schwankungsstärke, Tonalität.

Von daher kommen neue Verfahren wie der Soundscape-Standard DIN ISO 12913 zum Einsatz, um eine bessere Beurteilung der akustischen Umwelt unter Einbeziehung des Kontextes und der Betroffenen zu ermöglichen. Der Grundgedanke ist: Geräusche werden nicht nur als mehr oder weniger störend und belästigend eingeordnet, sondern können mehrdimensionale Empfindungen auslösen; Schall wird als „Ressource“ anstatt nur als „Verschmutzung“ verstanden. Soundscape kann durch Entfernen, Verändern



Klaus Genuit
HEAD-Genuit-Stiftung

oder aber durch Hinzufügen von Schallereignissen gestaltet werden (Klangökologie, Akustikdesign). Der Soundscape-Standard fordert bzw. empfiehlt die Verwendung von binauraler Messtechnik, Psychoakustik und Interviews. Es ist wichtig, Betroffene als sogenannte „Lokale Experten“ in die Beurteilung einer Schallbelastung einzubeziehen. Dieser neue Standard DIN ISO 12913 „Soundscape“ gelangt leider bislang insbesondere in Deutschland nur selten zur Anwendung. Obwohl die wichtigsten psychoakustischen Kenngrößen inzwischen standardisiert sind sowie der Soundscape-Standard eine Anleitung zur Erfassung und Beurteilung von Schallfeldern und deren Anwendung im Bereich Produkt-Sound beschreibt, bleibt die Beurteilung von Umweltgeräuschen am A-bewerteten Schalldruckpegel hängen. Hier besteht weiterhin ein intensiver Aufklärungs- und Schulungsbedarf. Wann gibt es den Ausbildungsberuf „Akustik-Ingenieur“, der das Thema vollständig und interdisziplinär unter Einbeziehung der neuen wissenschaftlich fundierten Erkenntnisse bearbeiten kann? Die akustische Umwelt von heute stellt zusätzliche Herausforderungen. Die neuen Geräuschquellen erfordern eine differenziertere Betrachtung; die alleinige Betrachtung des A-bewerteten Schalldruckpegels ist nicht hinreichend. Das Soundscape-Konzept verlangt interdisziplinäre Zusammenarbeit von Akustikern, Psychoakustikern, Medizinern, Soziologen, Psychologen und lokalen Experten. Ein innovativer Ansatz zur Beschreibung der Auswirkungen einer akustischen Umwelt.

Ihr
Klaus Genuit

Inhalt

Akustik Journal Nr. 02 / Juni 2023

- **5 Aktuelles**
- **7 Fachartikel**
 - 7 **Akustische Kavitation und ihre numerische Modellierung**
Robert Mettin, Sergey Lesnik, Gunther Brenner
 - 18 **Bioinspiriertes Mikrofon – die MEMS-Cochlea**
Claudia Lenk, Daniel Beer, Andreas Männchen, Jan Küller, Kalpan Ved, Steve Durstewitz, Vishal Gubbi, Tzvetan Ivanov, Martin Ziegler
 - 31 **Physiological Acoustics**
Bastian Epp
- **39 Ehrungen der DEGA**
 - 39 **Preisträgerinnen und Preisträger 2023**
 - 40 Laudatio für Prof. Brigitte Schulte-Fortkamp
 - 41 Laudatio für Dr. Leander Claes
- **42 Menschen**
 - 42 **Gratulationen und Personalien**
- **43 Veranstaltungen**
 - 43 **Veranstaltungshinweise**
 - 43 EAA Summer School
 - 43 Forum Acusticum 2023
 - 44 5th Polish-German Structured Conference on Acoustics (PGSCA)
 - 44 DEGA-Akademie: Kurs „Strömungsakustik 1 – Grundlagen, Auslegungen und Anwendungen“
 - 45 DEGA-Akademie: Kurs „Strömungsakustik 2 – Theorie, numerische Verfahren und Anwendungen“
 - 45 DEGA-Akademie: Kurs „Grundlagen der Technischen Akustik“
 - 46 DEGA-Akademie: Kurs „Bauakustik – von den Grundlagen zur Anwendung“
 - 46 16. DEGA-Symposium
 - 47 DEGA-Akademie: Kurs „Psychoakustik – Grundlagen und Anwendungen“
 - 47 **Vorschau: DAGA 2024**
 - 49 **Veranstaltungsrückblick: 26. Tag gegen Lärm**
 - 50 **Veranstaltungskalender**
- **51 DEGA**
 - 51 **Nachrichten und Mitteilungen aus der Fachgesellschaft**
 - 51 Entwurf zur DEGA-Richtlinie 103-1
 - 51 Abstimmung über Änderung der DEGA-Satzung
 - 52 Protokoll der DEGA-Mitgliederversammlung
 - 55 **Fachausschüsse und Fachgruppen der DEGA stellen sich vor**
 - 55 Fachausschuss Ultraschall (Teil 10)
 - 56 **Fachausschüsse / Fachgruppen**
 - 60 **Mitglieder / Fördermitglieder**
- **62 Normen / Richtlinien**
 - 62 **Neue Regelwerke zu den Themen Akustik und Lärmminderung (Feb. 2023 – Juni 2023)**
- **64 Publikationen**
 - 64 **Zeitschriften, Tagungsbände, Empfehlungen und Memoranden, Broschüren etc.**
- **66 Impressum**

Aktuelles

Nachrichten aus der Akustik

■ Rückblick auf den Tag gegen Lärm 2023



Am 26. April 2023 fand der 26. Tag gegen Lärm – International Noise Awareness Day unter dem Motto „Mach‘ mal leise“ statt.

In diesem Jahr wurde neben dem Verkehrslärm der „Lärm im Alltag“ in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt. Detaillierte Informationen zur zentralen Veranstaltung, die die DEGA gemeinsam mit dem Umweltbundesamt durchgeführt hat, und zum ganzen Aktionstag erhalten Sie im Rückblick auf Seite 49. ■

■ DEGA-Akademie

Kurs „Strömungsakustik 1 – Grundlagen, Auslegungen und Anwendungen“
25.–26.09.2023, Erlangen

Kurs „Strömungsakustik 2 – Theorie, numerische Verfahren und Anwendungen“
27.–28.09.2023, Erlangen

Kurs „Grundlagen der Technischen Akustik“
05.–06.10.2023, Berlin

Kurs „Bauakustik – von den Grundlagen zur Anwendung“
09.–11.10.2023, Braunschweig

Kurs „Psychoakustik – Grundlagen und Anwendungen“
15.–17.11.2023, online

Ausführliche Informationen zu den Kursen finden Sie auf den Seiten 44ff oder unter <https://www.dega-akustik.de>. ■

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

Alle Mitglieder der DEGA sind eingeladen, Kandidatinnen und Kandidaten für den **Lothar-Cremer-Preis** vorzuschlagen, der während der DAGA 2024 in Hannover verliehen wird. Bitte senden Sie Ihren Vorschlag mit Würdigung, Lebenslauf, Publikationsliste und Veröffentlichungen bis spätestens **31. August 2023** *ausschließlich elektronisch* an dega@dega-akustik.de. Es sollten solche schriftlichen Arbeiten beigefügt werden, auf die sich der Auszeichnungsvorschlag inhaltlich begründet (z. B. Dissertation, ausgewählte Zeitschriftenaufsätze), siehe auch <https://www.dega-akustik.de/preise-grants/lothar-cremer-preis>.

Ebenso können Kandidatinnen und Kandidaten für den **DEGA-Studienpreis** von allen Hochschullehrenden bis zum **15. September 2023** vorgeschlagen werden, der ebenfalls während der DAGA 2024 in Hannover verliehen wird. Bitte fügen Sie Ihrer Begründung einen tabellarischen Lebenslauf, die Abschlussarbeit (Master, Bachelor, Diplom o. ä.) und eine Würdigung durch eine weitere Fachkraft bei. Alle Dokumente sollen *ausschließlich elektronisch* an dega@dega-akustik.de eingereicht werden. Die Arbeit muss bereits benotet worden sein; andererseits darf die Abgabe nicht mehr als ein Jahr zurückliegen (Benotung und Abgabedatum bitte angeben). Weitere Details stehen auf <https://www.dega-akustik.de/preise-grants/dega-studienpreis>. ■

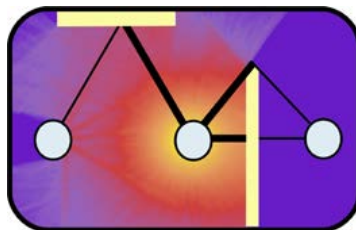
■ “Acta Acustica united with Acustica” frei verfügbar

Seit 2020 erscheint die europäische Fachzeitschrift „Acta Acustica“ im „Open-Access“-Format, herausgegeben vom EDP-Verlag und der European Acoustics Association (EAA). Die älteren Ausgaben der „Acta Acustica united with Acustica“ (1951–2019), herausgegeben vom Hirzel-Verlag und der EAA, waren in einer längeren Umstellungsphase nicht im Internet verfügbar.

Sämtliche Artikel von 1951 bis 2019 sind nun im „Open-Access“-Format frei zugänglich. Langfristig werden diese in das neue EAA-Archiv „Documenta Acustica Electronica“ eingebunden, welches in wenigen Monaten veröffentlicht wird. Bis dahin können die Artikel auf der folgenden temporären Webseite heruntergeladen werden:

<https://www.ingentaconnect.com/content/dav/aaau> ■

■ 16. DEGA-Symposium: „Akustik und Lärm in Büro und Schule“



Das 16. DEGA-Symposium findet am 14. und 15. November 2023 in Ilmenau statt.

Es richtet seinen Fokus auf die akustische Situation an Arbeitsplätzen, insbesondere in Büros und Schulen.

Verantwortlich für das Programm ist der Fachausschuss Bau- und Raumakustik der DEGA

(Koordination: Christian Nocke) in Zusammenarbeit mit den Fachausschüssen Lärm, Hörakustik und Virtuelle Akustik.

Ausführliche Informationen zum Symposium (Programm, Anmeldung etc.) erhalten Sie auf S. 46, im beiliegenden Faltblatt und unter <https://www.dega-akustik.de>. ■

NEUE VERSION

DIRAC 7



Raumakustikmessung mit drahtloser Kommunikation (WiFi) zwischen Schallpegelmesser und Notebook

Echtzeit Streaming des Audiosignals an den PC (Wireless Mikrofon)

- Das erlaubt Realtime FFT- & Digitalfilter Analyse (1/1- oder 1/3-Oktav)

Zeitersparnis durch WiFi Verbindung zum Schallpegelmesser:

- Schnelle Positionswechsel in

Vortragsräumen und Auditorien mit vielen Messplätzen

- Simultane Verwendung mehrerer Schallpegelmesser möglich



Anforderungen der aktuellen Normen wurden implementiert. Unter anderem:

- ISO 3382-3:2022 (Open Plan Office)
- IEC 16268-16:2020 (STIPA)
- 1793-5:2016 (Adrienne-Verfahren)

Dazu neu entwickelter Bauakustik Leistungsverstärker – Type 2755

- super leicht – nur 2,2 kg ! Leistung 500 Watt
- steuerbar über WiFi
- eingebauter Rauschgenerator
- andere Testsignale können als WAVE-File abgespielt werden
- integrierter Mikrofoneingang (IEPE) und A/D-Wandler zur Verwendung als Messkette ohne Schallpegelmesser

Akustische Kavitation und ihre numerische Modellierung

Robert Mettin, Sergey Lesnik, Gunther Brenner

Intensive Schallfelder in Flüssigkeiten führen zur akustischen Kavitation: Es bilden sich Blasen, deren Eigenschaften und Dynamik im Schallfeld zu einer Vielzahl weiterer physikalischer und chemischer Effekte führen. Dies wird insbesondere im Bereich der Verfahrenstechnik, aber auch in Anwendungen wie der Ultraschallreinigung genutzt. Da es sich bei der akustischen Kavitation um ein Mehrskalenproblem handelt, ist eine allumfassende Modellierung bisher kaum möglich, und man beschränkt sich auf jeweils behandelbare interessierende Teilaspekte.

In diesem Beitrag werden nach einem generellen Überblick neuere Ergebnisse zur Simulation von Kavitationszonen und Kavitationsblasenstrukturen, zu dem durch die Blasen induzierten Flüssigkeitsstrom sowie zum Verhalten kollabierender Blasen an festen Grenzflächen vorgestellt. Die verwendeten numerischen Verfahren umfassen Finite Elemente / Finite Volumen Methoden mit Partikelverfolgung zur Beschreibung von Schall-, Strömungs- und Blasenfeld; bei Studien zur Kollapsdynamik wird die Volume-of-Fluid-Methode zur Darstellung der Gas- und Flüssigkeitsphase eingesetzt.

Einleitung

Wird intensiver Ultraschall in Flüssigkeiten erzeugt, so kommt es zu einer Reihe von physikalischen Effekten, die durch das primäre akustische Feld allein nicht erklärt werden können (siehe z.B. [1; 2; 3]). So wird eine Wirkung auf Objektoberflächen beobachtet, die von Abreinigung bis zu Erosion und Zerstörung reichen kann. Weiterhin können chemische Reaktionen durch Ultraschall hervorgerufen oder beeinflusst werden (Sonochemie), und es kommt zu Leuchterscheinungen (Sonolumineszenz). Grundlage dieser Phänomene sind Blasen im Mikrometerbereich, die durch das Schallfeld erzeugt und in Schwingungen versetzt werden – man spricht von akustischer Kavitation. Insbesondere bei heftigen Implosionen („Kollaps“) derartiger Kavitationsblasen wird die Schallenergie stark konzentriert, und die Energiedichte steigt am Ort der Blase kurzzeitig um viele Zehnerpotenzen an. Dadurch können extreme Zustände im Blaseninneren entstehen: Typische gemessene Spitzenwerte von Temperatur und Druck im Blasenkolaps liegen bei einigen tausend Kelvin und mehreren Kilobar [4], unter spezifischen Bedingungen auch

Acoustic cavitation and its numerical modeling

High-intensity sound fields in liquids lead to acoustic cavitation: Bubbles are formed whose properties and dynamics in the sound field lead to a variety of other physical and chemical effects. This is used in particular in process engineering but also in applications such as ultrasonic cleaning. Since acoustic cavitation is a multi-scale problem, an all-encompassing modelling is hardly possible so far, and one is limited to treatable partial aspects of interest.

In this paper, after a general overview, recent results on the simulation of cavitating regions and cavitation bubble structures, on the fluid flow induced by the bubbles, and on the behaviour of collapsing bubbles at solid interfaces are presented. The numerical methods used include finite element / finite volume methods with particle tracking to describe sonic, flow and bubble fields; in collapse dynamics studies, the volume of fluid method is used to represent both the gas and liquid phases.

deutlich höher. Ionisations- und Dissoziationsreaktionen in der heißen komprimierten Blase führen zu chemischer Aktivität und Lichtemission, starke Scherströmungen und akustische Stoßwellen in der Flüssigkeit bewirken Reinigung und Erosion benachbarter Objekte. Neben dem spektakulären Kollaps der Kavitationsblasen gibt es noch weitere Effekte, die akustische Kavitation für Anwendungen interessant machen. Unter anderem werden die im Schallfeld oszillierenden Blasen durch akustische Kräfte in rasche Bewegung versetzt, welches Sekundärströmungen und kleinskalige Turbulenz erzeugt. Hierdurch kann „kontaktlos“ ein erhöhter Stofftransport und eine Durchmischung in der beschallten Flüssigkeit bewirkt werden. Um den Einsatz der akustischen Kavitation in technischen Prozessen besser zu verstehen und zu optimieren, gilt es, die relevanten physikalischen Aspekte in Modellen abzubilden und effektive Berechnungsverfahren zu erstellen. Auch wenn die verfügbare Leistung moderner Rechner in den letzten Jahren um Größenordnungen gestiegen ist, ist eine skalenauflösende Modellierung und Berechnung auf absehbare Zeit jedoch nicht möglich.

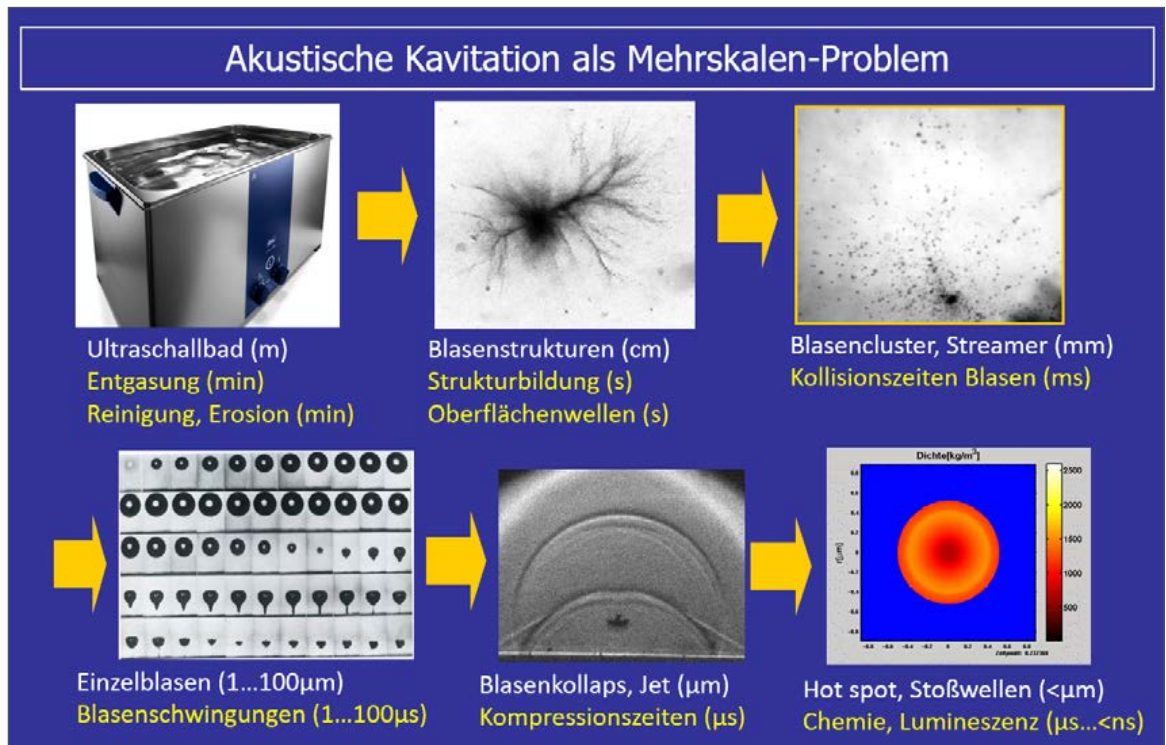


Abb. 1: Skalen von relevanten Teilphänomenen akustischer Kavitation: in weiß ungefähre Längenskalen, in gelb typische Zeitskalen. Bilder: ELMA Schmidbauer GmbH, [5], S. Luther, W. Lauterborn, D. Kröninger, B. Metten.

Abbildung 1 zeigt einen Überblick der relevanten physikalischen Phänomene in Relation zu typischen Raum- und Zeitskalen, hier bezogen auf ein Ultraschallreinigungsbad betrieben bei etwa 20 kHz. Beginnend mit Wanne und Wellenfeld, deren Abmessungen im Bereich m und dm liegen, durchlaufen wir Längen von einigen cm zu mm, wenn wir die akustischen Wellenlängen sowie Blasenstrukturen („Streamer“) und deren Substrukturen (Zweige, Cluster) genauer auflösen. Eine weitere Vergrößerung zeigt einzelne Kavitationsblasen. Da die Blasen vom Wechseldruck angetriebene Volumenschwingungen ausführen, oszilliert ihre Größe teilweise signifikant, wobei sie etwa Maximalradien von einigen 100 μm und Minimalradien im Kollaps von weniger als 1 μm erreichen können. Größere Blasen im mm-Bereich, die z. B. durch Koagulation und Entgasungsprozesse entstehen, verhalten sich in Bezug auf die Kavitationswirkungen eher passiv und steigen normalerweise relativ schnell an die Oberfläche. Die kleinsten relevanten Skalen liegen unterhalb von 1 μm . Sie treten innerhalb der kollabierten Blasen, aber auch an den Grenzflächen zwischen Gas und Flüssigkeit bzw. Objekten sowie an den Fronten von Stoßwellen auf. Zudem entstehen Kavitationsblasen i. d. R. an sog. „Keimen“, deren Größe bis in den nm-Bereich herunterreichen kann. Hierfür kommen z. B. an Verunreinigungen, Staubpartikeln oder an Wänden stabilisierte Gastaschen in Frage, und auch Nanoblasen werden in jüngster Zeit verstärkt diskutiert [6].

Die bei Vorgängen in einem Reinigungsbad beteiligten Zeitskalen überstreichen ebenfalls viele Größenordnungen. Während sich Entgasungsprozesse der Flüssigkeit über viele Minuten hinziehen, liegen die Perioden von Oberflächenwellen oder Umstrukturierungen der Blasenmuster bei Sekunden und darunter. Die Lebensdauer einzelner Kavitationsblasen kann hunderte akustische Schwingungen (ms) betragen oder auch nur eine einzige – je nachdem, ob die Blasen eine Weile ohne Kollisionen umherwandern oder sich rasch mit Nachbarblasen vereinigen. Ebenso können die Blasen durch Instabilitäten oder Wechselwirkungen in Fragmente zerfallen. Die Periode des akustischen Feldes ($\sim 50 \mu\text{s}$) bestimmt die Volumenschwingung der Blasendynamik, aber im Kollaps treten noch viel kürzere Skalen in Erscheinung: Kompression über etwa 1 μs , chemische Reaktionen innerhalb einiger ns, und die Dauer der Sonolumineszenz, die als kurzer Blitz abgestrahlt wird, liegt sogar nur bei einigen hundert ps [7].

Man erkennt schnell, dass sich eine numerische Modellierung der akustischen Kavitation auf wenige Größenordnungen beschränken muss, wobei dann geeignete Näherungen oder Vernachlässigungen Eingang finden können. Zudem gibt es eine ganze Reihe von Teilaspekten und Einflussfaktoren, die das Problem komplex gestalten. Eine Übersicht potenziell relevanter Größen und Phänomene für ein numerisches Modell wird in Abbildung 2 dargestellt. Im Folgenden seien nun exemplarisch einige Simulati-

onen von Kavitationsvorgängen gezeigt, die sich auf verschiedene Aspekte beziehen und die mit teilweise unterschiedlichen Modellen sowie teilweise auf verschiedenen Skalen arbeiten.

Schallfeldmodellierung

Da wir vom Schallfeld als erzeugende und anregende Größe der Kavitation ausgehen, ist es naheliegend, sich bei großskaligen Analysen einen Überblick über das Schallfeld in der vorliegenden Geometrie zu verschaffen. Hinreichend großer (negativer) Schalldruck sollte Blasen nucleation bewirken. Hohe Wechsel-druckamplituden führen zu heftigen Blasen-schwingungen und Implosionen mit den entsprechenden Kavitationswirkungen. Im einfachsten Fall vernachlässigt man in einer Schallfeldberechnung den Einfluss einer Gasphase (Blasen) zunächst völlig und schließt a posteriori über die sich ergebenden Wechsel-druckamplituden in reiner Flüssigkeit auf die räumliche Verteilung von Kavitation. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel aus [9], wobei in einem Reaktor die lineare ungedämpfte Helmholtz-Gleichung für den komplexwertigen Druck P im Frequenzbereich

$$\nabla^2 P + k^2 P = 0, \quad k = \frac{\omega}{c_l}, \quad \omega = 2\pi f$$

mit entsprechenden Randbedingungen und Geometrievierungen (Abb. 3a) bei der Anregungsfrequenz von $f = 580$ kHz für Salzwasser gelöst wurde. Es bezeichnen hier k die Wellenzahl, c_l die Schallgeschwindigkeit der Flüssigkeit und ω die Kreisfrequenz. Bereiche relativ hoher Druckamplitude (rot/blau in Abb. 3b) werden mit relativ „aktiven“ Kavitationsgebieten identifiziert, ohne allerdings eine scharfe Schwelle für den Druck gegenüber geringen Amplituden (grüne Bereiche) zu verwenden. Als Vergleich mit experimentellen Beobachtungen wird die Sonochemilumineszenz von Luminol (Abb. 3c) herangezogen, wobei sich hierbei die „Aktivität“ der Kavitation auf die chemische Produktion von Hydroxyl-Radikal-Molekülen ($\text{OH}\cdot$) bezieht: Letztere oxidieren das Luminol-Molekül zu einem angeregten Zustand, der das blaue Licht auf den Fotos aussendet. Die Korrelation zwischen experimenteller und numerischer Bestimmung der Kavitationsmuster fällt zufriedenstellend aus, solange man sich, z. B. wie in der gezeigten Arbeit, im Wesentlichen für die Aktivität in der Nähe der eingetauchten Platte bei verschiedenen Kippwinkeln interessiert, die recht gut reproduziert werden kann. Derartige Berechnungen erfordern mit kommerziellen FEM-Solvern nur geringen Aufwand, sind schnell und lassen daher das rasche Testen vieler Geometrien oder Konfigurationen zu. Sie liefern aber auch nur grobe Aussagen, die mit Experimenten abgeglichen werden sollten. Denn es zeigt sich, dass oft der Einfluss

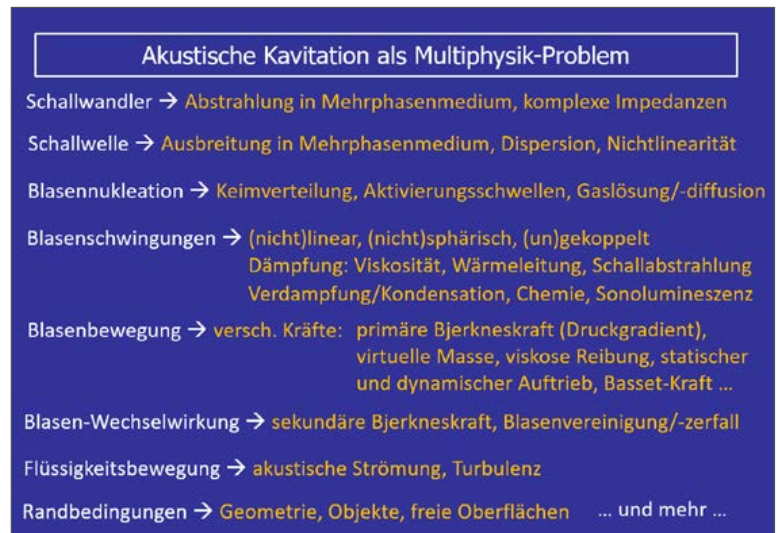
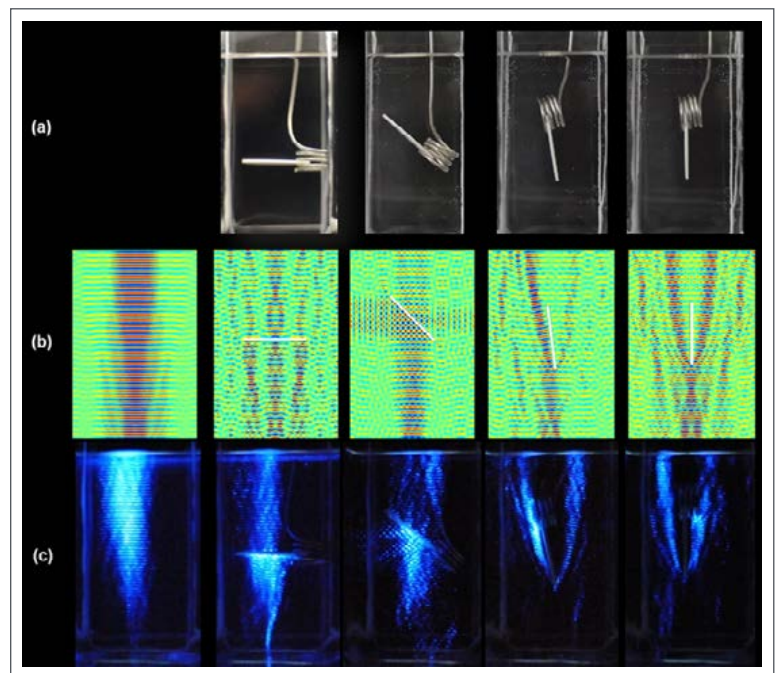


Abb. 2: Eine ganze Reihe von Phänomenen und Aspekten findet potenziell Eingang in eine Modellierung akustischer Kavitation, je nach beabsichtigter oder möglicher Berücksichtigung.

einer Gasphase eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielt. Abhängig von Schallfrequenz, Schallintensität, Blasendichte und Blasengrößen kommt es bei der Schallausbreitung zu Streuung, Dispersion und Dissipation. Insbesondere durch die erhöhte Kompressibilität können auch schon sehr geringe Volumenanteile von Gas die Schallgeschwindigkeit in einer blasenhaltigen Flüssigkeit signifikant herabsetzen (vgl. z. B. den sog. Cappuccino-Effekt [10]). Ein verbesser-

Abb. 3: (a) Verschieden gekippte Platte in einem Sonoreaktor (Schallwandler 580 kHz unten). (b) Simulationen des Schalldrucks für dieselben Geometrien mit Comsol Multiphysics® [8]. (c) Luminol-Emissionen (0,1 mM, pH 11, Belichtungszeit 30 s). Bild aus [9], Copyright (2017), with permission from Elsevier.



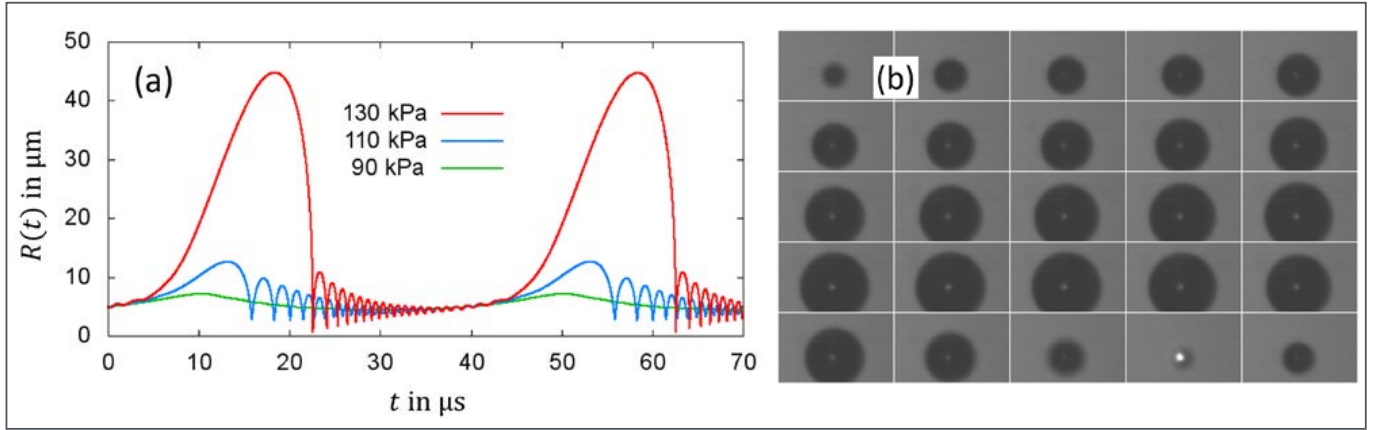


Abb. 4: Einsetzen der Kollapsschwingung bei stärkerer Anregung. (a): Mit dem Keller-Miksis-Modell berechnete Radius-Zeit-Kurven einer Blase mit 5 μm Ruheradius unter 20 kHz Anregung; die Schalldruckamplituden sind angegeben. (b): Hochgeschwindigkeitsaufnahme einer mit heftigem Kollaps oszillierenden Blase in Phosphorsäure (Bildfolge zeilenweise von links oben nach rechts unten, Bildabstände 1.9 μs). Beim Kollaps auf dem vorletzten Bild entsteht ein Lichtblitz; der Minimalradius wird nicht aufgelöst. Bild: C. Cairós, vgl. [12].

ter Modellansatz berücksichtigt daher vorhandene (nichtkondensierbare) Gasblasen in der Flüssigkeit mit gewissem (Ruhe)-Radius R_0 und zeitabhängigem Radius $R=R(t)$. Mit der Blasenanzahldichte n und dem ebenfalls zeitabhängigen Gas-Volumenanteil $\beta(t) = n \frac{4\pi}{3} R^3(t)$ sowie der Flüssigkeitsdichte ρ_l bekommt man nach Caflisch [11] eine Wellen-Gleichung mit Quellterm für den Druck p im Zeitbereich:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c_l^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{1}{\rho_l} \frac{\partial^2 \beta}{\partial t^2}$$

Diese lässt sich wieder in eine Helmholtz-Gleichung umschreiben, wenn man den Schall nur bei einer Frequenz betrachtet, nun allerdings mit komplexer Wellenzahl k . Nimmt man lineare radiale Schwingungen der Blasen um R_0 an, so führt das auf die häufig verwendete Dispersionsrelation

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c_l^2} + \frac{4\pi R_0 \omega^2 n}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2ib\omega}$$

Hierbei bezeichnen ω_0 die Eigenfrequenz der Blasen und b einen geeigneten Dämpfungsfaktor. Bei höheren Schallintensitäten und insbesondere nach Einsetzen der Kavitation sind lineare Blasenschwingungen allerdings oft unrealistisch, da die oben erwähnte nichtlineare Dynamik mit heftigem Kollaps auftritt; siehe Abbildung 4.

Berücksichtigt man dies, kann man einen verbesserten Dispersionsterm herleiten, indem man für den Imaginärteil der quadrierten Wellenzahl realistische Dämpfungsterme benutzt [13]:

$$\text{Re}(k^2) = \frac{\omega^2}{c_l^2} + \frac{4\pi R_0 \omega^2 n}{\omega_0^2 - \omega^2}, \text{Im}(k^2) = -2\rho_l \omega n \frac{\Pi_{th} + \Pi_v}{|P|^2}$$

Die Koeffizienten Π_{th} und Π_v beschreiben die thermische und viskose Dämpfung der Blasenoszillation und werden über entsprechende Integrale unter

Berücksichtigung der nichtlinearen Schwingung berechnet. In Abbildung 5a sind diese Dämpfungskoeffizienten in normierter Darstellung gegen die mit dem statischen Druck p_∞ normierte Anregungsamplitude aufgetragen. Man erkennt einen steilen Anstieg um mehrere Größenordnungen an der sog. Blakeschwelle, die den Übergang zur Kollapsschwingung der Blasen markiert. Dort ist $|P|$ etwas größer als p_∞ und der Schall(unter)druck reicht aus, die Oberflächenspannung kleiner Keimblasen zu überwinden – es kommt zu einer deutlichen Blasenexpansion mit anschließendem heftigen Kollaps (vgl. Abbildung 4a), der für die stark vergrößerte Dissipation verantwortlich ist. Abbildung 5b zeigt beispielhaft für einen eindimensionalen Resonator stehende Wellenfelder, die sich mit der erweiterten Dispersionsrelation bei verschieden starker Anregung ergeben. Wichtigster Effekt ist eine Sättigung der Schalldruckamplitude, die sich durch den starken Anstieg der Dissipation beim Einsetzen der Kollapsschwingungen erklären lässt. Dies beobachtet man auch in Experimenten. Abbildung 5c zeigt schließlich den mit dem erweiterten Modell berechneten Amplitudenverlauf in Relation zu den Ansätzen mit linearen Blasenschwingungen bzw. ganz ohne Blasen. Für beide findet man unrealistisch hohe Druckwerte.

Akustische Kräfte und Partikelmodelle

Mit dem oben skizzierten Modell nach Louisnard [13] kann man bereits recht gut Schallfeldverteilungen unter Kavitationsbedingungen berechnen. Blasen dichten und -größen gehen dabei zunächst als im Raum statisch vorgegebene Größen ein. In einem weiteren Schritt kann man nun versuchen, auch die Variabilität und insbesondere die Bewegung der Blasen einzubeziehen. Während die Blasenstrukturen in einem kavitierenden Reinigungsbad oder unter einem

Ultraschallhorn oft durchaus stationär erscheinen, sind es die einzelnen Blasen normalerweise nicht. Auf mikroskopischer Skala herrscht enorme Bewegung und Variabilität vor, und Ursache sind in erster Linie akustische Kräfte, die sog. Bjerkneskräfte [2]. Ganz analog zur statischen Auftriebskraft in einem hydrostatischen Schweredruckgradienten bewirken auch die oszillierenden Druckgradienten des Schallfeldes $p(t)$ instantane Kräfte in der Form $\vec{F}(t) = \nabla p(t) V_b(t)$ auf Blasen mit Volumen V_b . Die Blasengrößen werden hierbei als klein gegenüber der Wellenlänge des Schalls angenommen. Das Zeitmittel der Kräfte verschwindet allerdings i. d. R. auch bei harmonischem Druckverlauf nicht, weil die Volumenoszillationen der Blasen mit dem Druck (und seinem Gradienten) korrelieren. Man definiert daher die primäre Bjerkneskraft als $\vec{F}_{B1} = \langle \nabla p(t) V_b(t) \rangle_T$ mit $\langle \cdot \rangle_T$ als Ausdruck für die Mittelung über eine Schwingungsperiode. Es zeigt sich, dass $\vec{F}_{B1}$ in vielen Situationen dominant gegenüber allen anderen auf die Blasen wirkenden Kräften ist und so z. B. ihre rasche Translationsbewegung im Schallfeld antreibt. Auch wird die Strukturbildung in erster Linie durch die primäre Bjerkneskraft bestimmt. Erst wenn sich zwei Blasen hinreichend annähern, kommt es zu deren Wechselwirkung aufgrund der sekundären Bjerkneskraft $\vec{F}_{B2}$. Diese beruht auf dem von der Nachbarblase gestreuten bzw. abgestrahlten Schallfeld, in dessen Gradienten wiederum momentane „Auftriebskräfte“ entstehen. Für das Zeitmittel der Kraft zwischen zwei Blasen der Volumina V_{b1} und V_{b2} findet man unter gewissen Näherungen [15] den Ausdruck $\vec{F}_{B2} = -\frac{\rho}{4\pi d^2} \langle \dot{V}_{b1}(t) \dot{V}_{b2}(t) \rangle_T$; ein negatives Vorzeichen zeigt die gegenseitige Anziehung der Blasen an. Neben den Zeitableitungen $\dot{V}_{b1}$ und $\dot{V}_{b2}$ der Volumina beider wechselwirkenden Blasen geht in die sekundäre Bjerkneskraft der Blasenabstand d in quadratischer Weise reziprok ein, welches ein interessantes Analogon zur Gravitation und zur elektrostatischen Wechselwirkung ist. Durch die starke Abnahme der Kraft mit der Entfernung ist die Wechselwirkung zwischen schwingenden Blasen bei größeren Abständen nur sehr klein und dann oft vernachlässigbar. Eine Modellierung der Blasenbewegung im Schallfeld kann nun auf Basis eines „Lagrange“-Ansatzes erfolgen, der einzelne Blasen im Raum verfolgt und als, gemäß den lokal wirkenden Kräften, bewegte „Partikel“ behandelt. Neben den Bjerkneskräften muss man mindestens noch eine der Bewegung entgegengesetzte viskose Reibungskraft und die virtuellen Massen der Blasen berücksichtigen, alle anderen Kräfte (Gravitation, lokale Strömung u. a.) können oft zunächst vernachlässigt werden. Für eine Berechnung ist nun zu beachten, dass die Bjerkneskräfte vom lokalen Schalldruck und Schalldruckgradienten abhängen. Außerdem kommen noch Regeln für Blasenent-

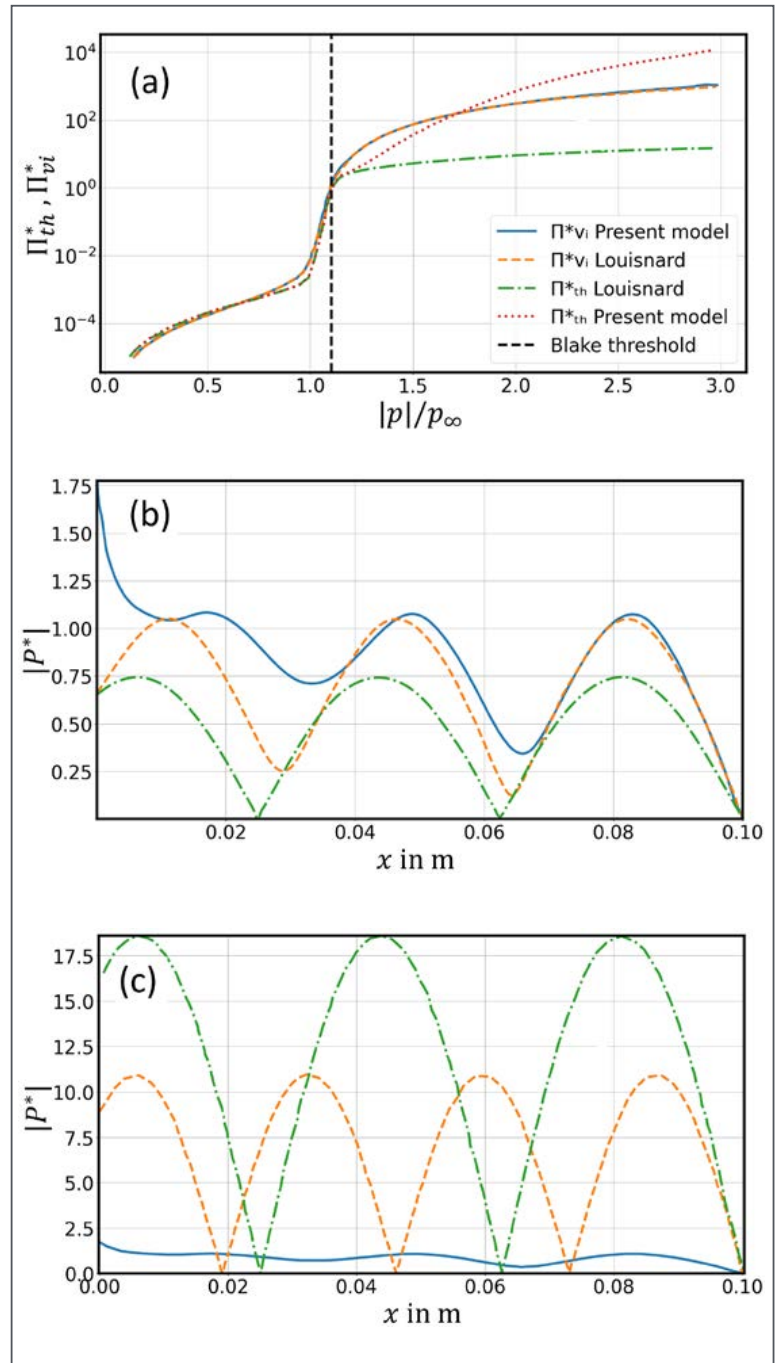


Abb. 5: Nichtlineare Dämpfungsterme und Schalldruckamplituden unter verschiedenen Modellbedingungen.

(a) Verlauf der normierten Dämpfungskoeffizienten Π_{th}^* und Π_{vi}^* in Abhängigkeit zum normierten Anregungsdruck und im Vergleich zu den Werten aus [13]; Bildquelle [14].

(b) Normierte Stehwellenamplitude bei verschieden starker Anregung eines eindimensionalen Resonators unter Anwendung der nichtlinearen Dämpfungsterme. Bei steigender Anregung (grün – orange – blau) sättigt die Druckamplitude (blau).

(c) Bei Anwendung des linearen Dämpfungsmodells (orange) oder in reiner Flüssigkeit ohne Blasen (grün) ergeben sich zu große Druckamplituden im Resonator.

Die in [14] berechnete Kurve (blau) wird in den Grafiken (b) und (c) mit Daten aus [13] verglichen.

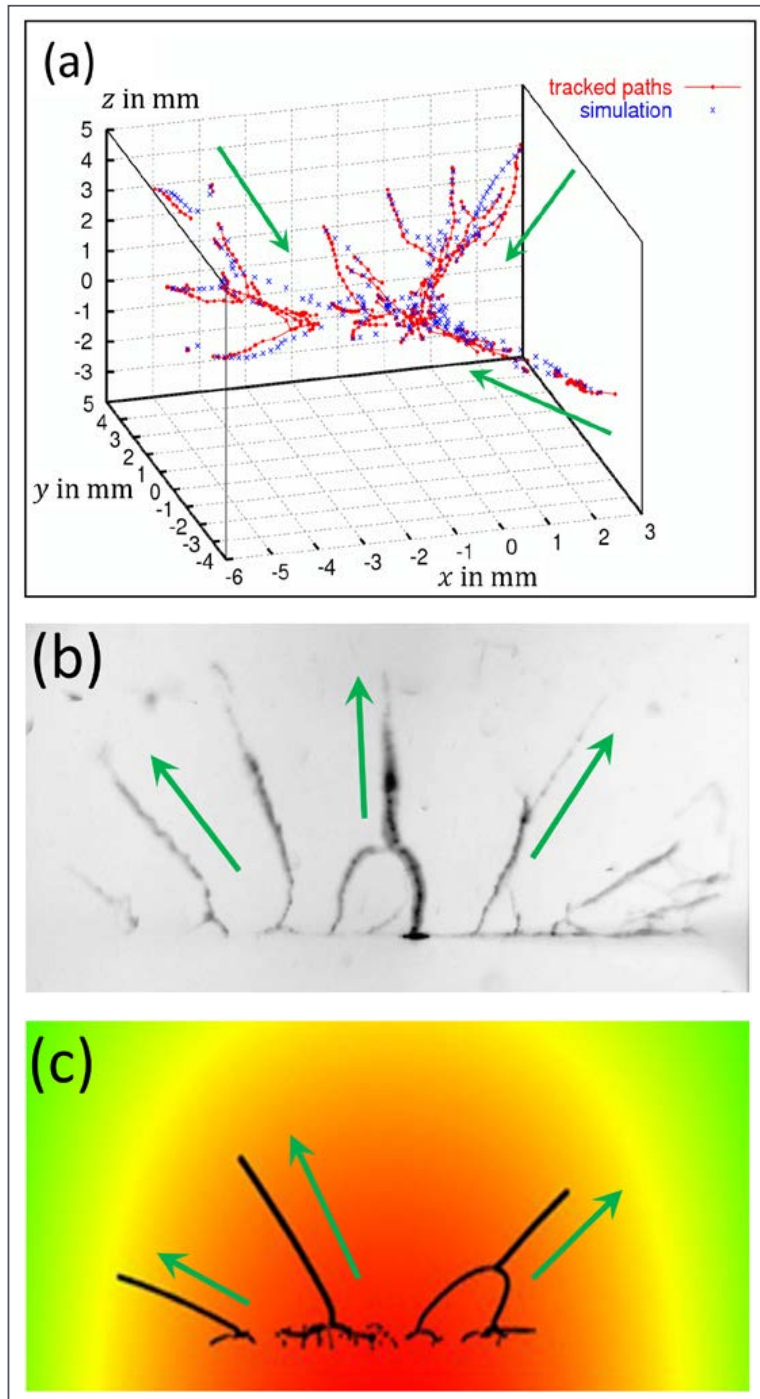


Abb. 6: Blasenwege unter Einfluss primärer und sekundärer Bjerkneskräfte, Bewegungsrichtung der Blasen durch grüne Pfeile angezeigt.

(a) Gemessene dreidimensionale Blasentrajektorien um einen Schalldruckbauch bei 25 kHz in Wasser (rot) und Reproduktion durch simulierte Blasenwege; adaptiert von [17], Copyright (2004), with permission from Elsevier. Der Druckbauch im Zentrum wirkt auf die Blasen anziehend, die Bewegungen finden nach innen statt.

(b) Gemessene und (c) simulierte Blasenwege um einen Druckbauch bei 25 kHz in 85%iger Phosphorsäure. Der Druckbauch (rot-orange) wirkt hier abstoßend, die Blasenbewegungen finden in Richtung niedrigerer Schalldruckamplitude statt. Bildbreite jeweils 5 cm; adaptiert von [18].

stehung (Nukleation) und Blasenkollision hinzu. Im einfachsten Fall werden eine unveränderliche Schalldruckverteilung und bestimmte, aus Experimenten motivierte Anfangspositionen und -größen vorgegeben. Abbildung 6 zeigt zwei Beispiele für simulierte Blasenbewegungen auf Basis von Partikelmodellierungen im Vergleich zu experimentellen Daten. In beiden Fällen handelt es sich um Blasen in der Nähe eines Schalldruckmaximums in einer stehenden Welle, die Abmessungen liegen also etwa im akustischen Wellenlängenbereich. Der Unterschied zwischen den Experimenten liegt in der Schalldruckamplitude des Druckbauchs: Bei geringerer Amplitude wie in Abbildung 6a werden die Blasen angezogen, laufen also von außen nach innen. Bei hinreichend großer Amplitude dagegen, wie sie in Abbildung 6b vorliegt, wirkt der Druckbauch abstoßend, und die Blasen laufen von innen nach außen. Dieser Vorzeichenwechsel der primären Bjerkneskraft bei großen Druckamplituden [16] ist wichtige Grundlage zum Verständnis der Blasenstrukturen. Er kann u. a. zu einer effektiven Begrenzung der maximalen Druckanregung von Blasen in einer Stehwelle führen, da diese den Druckbauch verlassen und sich irgendwo zwischen Bauch und Knoten einfinden. Neben den gerichteten Blasenbewegungen erkennt man in Abbildung 6 außerdem charakteristische Y-Figuren, die bei der Annäherung benachbarter Blasen und schließlich ihrer Vereinigung auftreten. Dadurch entsteht eine verästelte Filament-Struktur der Blasenpfade, auch Streamer oder „akustische Lichtenbergfigur“ genannt. Diese Muster werden von den Partikelmodellierungen gut reproduziert, so dass man von einem hinreichenden Verständnis dieses „mesoskopischen“ Blasenverhaltens ausgehen kann. Essentielle Näherungen, die in den vorliegenden Simulationen gemacht wurden, sind allerdings als kugelförmig angenommene Blasen und eine fehlende Rückwirkung der Blasenverteilung auf das Schallfeld. Der letzte Punkt wird in der im Folgenden beschriebenen Erweiterung mit einbezogen.

Euler-Lagrange-Simulationen

In vielen Anwendungen sind nicht nur die direkten Wirkungen der Kavitationsblasen und ihrer Implosionen in Form von Scher- und Stoßwellen oder chemischen Reaktionen von Interesse, sondern auch indirekte Effekte wie verstärkte Flüssigkeitsströmung, Mikroturbulenz und die damit verbundene Erhöhung von Massen- und Wärmetransport. Ein Beispiel ist das Recycling von wertvollen Metallen, wobei deren Zersetzung in Säuren durch akustische Kavitation beschleunigt werden kann. Abbildung 7 illustriert dies an einem Testaufbau [19; 20; 14]. Hier kommt ein Ultraschallhorn (Sonotrode) als Schallquelle zum Einsatz. Neben den bekannten Ultraschallbädern,

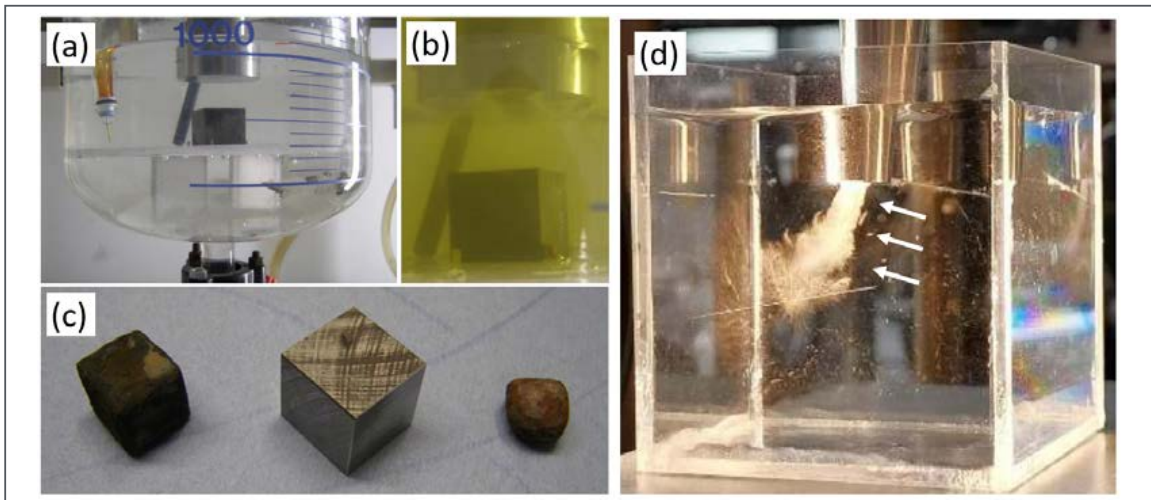


Abb. 7: (a) Testaufbau zur Kavitationswirkung auf Metallblöcke in Säuren (BFI, Sonotrode von oben mit Durchmesser 4 cm, 20 kHz).

(b) Metallcarbid-Würfel in Schwefelsäure unter Kavitationswirkung.

(c) Würfel zu Beginn (Mitte, Kantenlänge 1 cm) und nach 15 h Säurebad ohne (links) und mit Kavitation (rechts) [20].

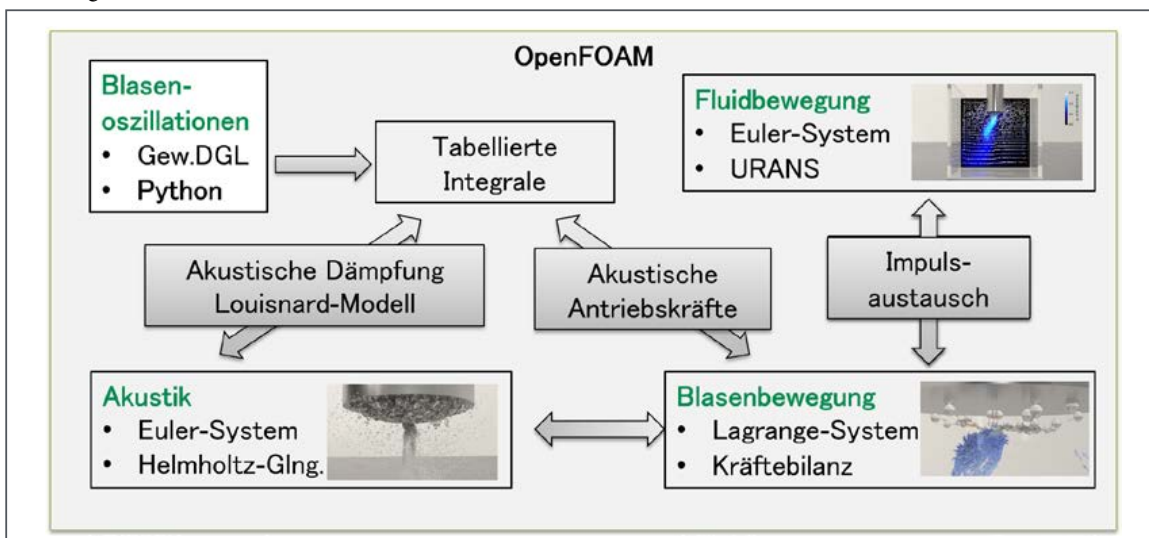
(d) Typische Kavitation an einem Exponentialhorn bei 20 kHz in Wasser, wie sie sich in Streulicht für das Auge darstellt. Die Pfeile deuten auf den mit Blasen bevölkerten Flüssigkeitsstrahl (Jet), der von der Hornspitze (Durchmesser 1 cm) ausgeht. Bild Lesnik/Aghelmaleki, aus [14].

die i. d. R. durch Wandschwinger großflächig angeregt werden, sind Sonotroden eine zweite verbreitete Methode, intensive Kavitation zu erzeugen. Bei ihnen wird der Ultraschall von einer relativ kleinen Fläche am stark oszillierenden Hornende abgestrahlt. Bei höheren Intensitäten wird Kavitation unter der Sonotroden spitze und auch ein intensiver Flüssigkeitsstrahl von der Sonotrode weg beobachtet. Dieser Jet mit Strömungsgeschwindigkeiten der Größenordnung m/s führt zu guter Durchmischung und entspricht gewissermaßen kontaktlosem Rühren. Man muss ihn

allerdings von einer „reinen“ akustischen Strömung („acoustic streaming“), die auf Absorption und Nichtlinearität der Schallausbreitung in reiner Flüssigkeit beruht, unterscheiden. Denn hier spielen die Kavitationsblasen eine entscheidende Rolle, ohne die das acoustic streaming ein bis zwei Größenordnungen schwächer ausfällt [21].

Um nun sowohl Flüssigkeitsströmung als auch Schallfeld und Blasenbewegung in einer Simulation zu erfassen, kann man z. B. ein sog. Euler-Lagrange-Modell einsetzen, wie es in Abbildung 8 dargestellt ist und in

Abb. 8: Überblick zum Euler-Lagrange-Modell (nach [14]). Das Lösen der gewöhnlichen Differentialgleichungen („gew. DGL“) der Blasenoszillationen für die Dämpfungskoeffizienten geschieht in einer Python-Umgebung außerhalb von OpenFOAM. „URANS“ bezeichnet die „Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes“-Modellierung turbulenter Strömungen.



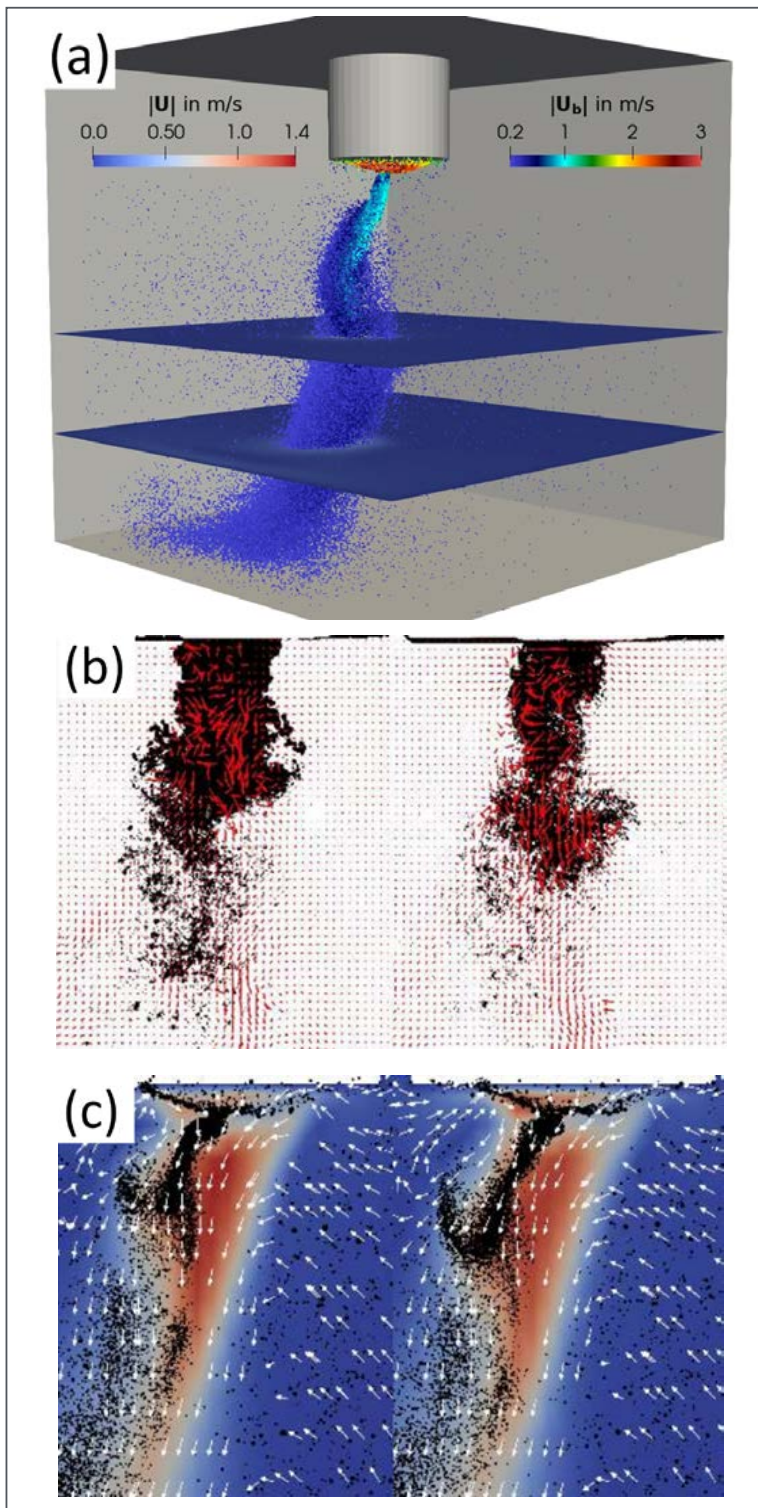


Abb. 9: Simulationsergebnisse des Euler-Lagrange-Modells für Kavitation an einer Sonotrode von 1 cm Durchmesser bei 20 kHz.

(a) 3D-Darstellung der Blasen und ihrer Geschwindigkeiten (rechte Farbskala U_b). Besonders hohe Geschwindigkeiten treten direkt vor der Spitze auf, wodurch der Flüssigkeitsjet nach unten angetrieben wird [14].

(b) Sequenz aus experimentellen Messungen von Blasen (schwarz) und Strömungsgeschwindigkeiten (rote Pfeile) in einem 2D-Schnitt; aus [24], Bildabstand 2 ms.

(c) Bildfolge aus der Simulation mit gleichen Parametern und Bildabständen; Blasen schwarz und Strömungsgeschwindigkeit durch Pfeile dargestellt sowie farbcodiert, siehe linke Farbskala in (a) [23].

[14] vorgestellt wurde. Hierbei werden Schallfeld und Strömungsfeld getrennt und auf verschiedenen Berechnungsgittern im „Euler“-System, d. h. dem raumfesten Laborsystem, dargestellt. Diese Trennung bietet sich an, wenn z. B. Strömungsdrücke und -geschwindigkeiten klein gegenüber Schalldrücken und der Schallgeschwindigkeit sind und insbesondere keine Kavitation durch die Strömung selbst hervorgerufen wird. Hier wird die Strömung im Zeitbereich auf der Basis der instationären Navier-Stokes-Gleichungen modelliert und berechnet, während das Schallfeld für eine vorgegebene und dominierende Frequenz im Frequenzbereich, auf der Basis der oben beschriebenen modifizierten Helmholtz-Gleichung, berechnet wird. Kavitationsblasen werden weiterhin als kugelförmig angenommen und als „Lagrange“-Partikel, also im mit der jeweiligen Blase mitbewegten Koordinatensystem betrachtet. Sie werden nach gewissen Regeln erzeugt und vernichtet. Ihre Bewegung wird angetrieben durch die primären Bjerkneskräfte und abgebremst durch viskose Reibung. Die genauen Kräfte auf eine Blase ergeben sich aus dem aktuellen Ruheradius sowie der Schalldruckamplitude, dem Schalldruckgradienten und der Flüssigkeitsströmung am Ort der Blase. Um dabei redundante Berechnungen zu vermeiden, werden oft benötigte Koeffizienten vorher ermittelt und in Tabellen abgelegt. Aus der Blasenverteilung kann nun der Gasphasenanteil in einer Rechenzelle ermittelt werden, der Eingang in die Schallfeldberechnung nach Louisnard [13] findet. Neben dieser Rückwirkung auf das Schallfeld koppelt die Kavitation nun außerdem an das Strömungsfeld, indem pro Rechenzelle der durch die Relativbewegung der Blasen übertragene Impuls auf die Flüssigkeit berücksichtigt wird. Durch die gegenseitige Abhängigkeit von Schallfeld und Blasen sowie von Strömungsfeld und Blasen ergibt sich ein relativ komplexes numerisches Modell, das in OpenFOAM [22] und mit Tabellenberechnung in Python realisiert wurde. Die Anwendung auf die Sonotrodegeometrie aus Abbildung 7d reproduziert sehr gut den visuellen Eindruck und auch die gemessenen Blasen- und Strömungsgeschwindigkeiten aus Experimenten, wie in Abbildung 9 dargestellt. Genauere Betrachtung zeigt u. a., dass die unter dem Horn induzierte Strömung im Wesentlichen durch schnelle Blasen direkt vor der Hornspitze erzeugt wird. Abstoßende primäre Bjerkneskräfte treiben die Blasen, die am Schallwandler entstehen, aus der Zone hohen Schalldrucks an der Spitze zunächst heraus. Hierdurch wird die Flüssigkeit nach unten beschleunigt. Die Trägheit der Flüssigkeitsströmung bewirkt dann, dass der Jet noch viel weiter nach unten strömt, als die Abstoßung der Blasen reicht. Dies kann auch die zunächst erstaunliche experimentelle Beobachtung erklären, dass in einem Abstand von

der Hornspitze größere Blasen im Flüssigkeitsstrom ungefähr ortsfest bleiben oder gar nach oben laufen: Die primäre Bjerkneskraft ändert dort ihr Vorzeichen, zeigt nach oben und kompensiert die von der Strömung ausgeübte Reibungskraft nach unten.

Die vorgestellte Euler-Lagrange-Simulation kann bereits recht realistisch Blasenverteilungen und Strömungsfelder in intensiven Ultraschallfeldern berechnen. Erweiterungen betreffen z. B. eine Einbeziehung der sekundären Bjerkneskräfte, die hier bisher noch vernachlässigt sind, sowie verbesserte Methoden der Blasen nucleation und -vernichtung (Auflösung). Letztere Vorgänge sind allerdings auch experimentell noch nicht hinreichend gut verstanden und müssen daher weiter untersucht werden. Sie koppeln vermutlich sensitiv an Gasgehalt und Diffusionsvorgänge zwischen Flüssigkeit und Blasen. Es ist aber durchaus möglich, in Zukunft auch Diffusion oder den Wärmefluss in das Modell mit einzubeziehen und dadurch noch mehr Aussagen aus den Simulationen zu gewinnen, die sonst nur schwer messtechnisch zugänglich sind.

Multiphasensimulationen

Abschließend sollen Simulationen auf der Größenskala von einzelnen Blasen vorgestellt werden.

Hierbei werden akustisches Feld und globales Strömungsfeld zunächst außer Acht gelassen und nur die Kollapsdynamik einer Blase betrachtet. Im Unterschied zu den bisher gezeigten Modellen, die auf größeren Skalen arbeiten, ist aber explizit die nicht-sphärische Verformung der Blase von Interesse, und zwar im Falle einer benachbarten festen Grenzfläche. Der Fokus liegt auf den Details, wie Kavitationsblasen härteste Materialien erodieren können, also z. B. zur Zersetzung der oben gezeigten Metallwürfel beitragen. Denn neben dem erhöhten Strömungstransport der Säure spielt auch die mechanische Wirkung der Blasenimplosionen direkt am Metall eine große Rolle. Um sich dem Erosionsphänomen zu nähern, setzt man u. a. Experimente mit gezielt erzeugten Einzelblasen an Objekten ein. Die Blasen werden durch fokussierte Laserpulse kontrolliert generiert und mit Hochgeschwindigkeitskameras beobachtet. Da viele Details allerdings messtechnisch kaum oder gar nicht zu erfassen sind, wird die teilweise sehr komplexe Dynamik mithilfe numerischer Mehrphasensimulationen genauer untersucht. Weiterhin kann man sonst unerreichbare Parameterbereiche numerisch zugänglich machen.

Die Berechnung basiert hier wieder auf der Navier-Stokes-Gleichung und der Finite-Volumen-Methode.



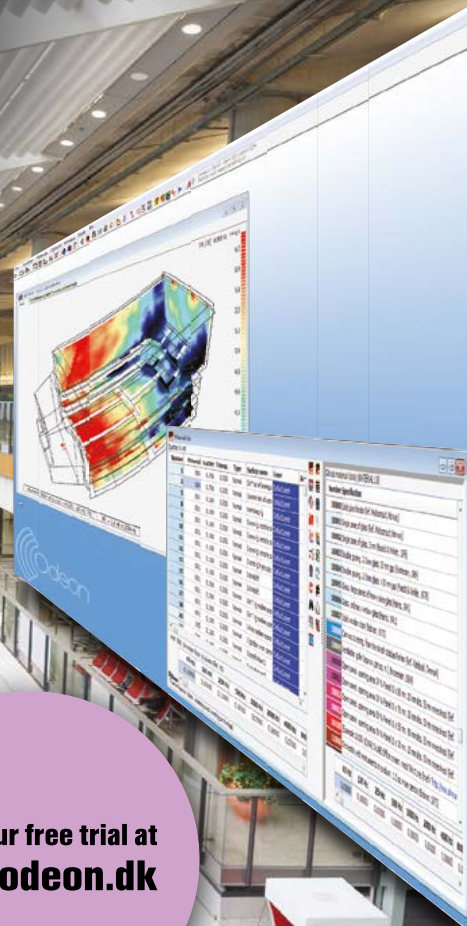
Make better spaces with the complete software solution for room acoustics

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



Für die Bewegung der Phasengrenzfläche zwischen Gas und Flüssigkeit wird die „Volume of Fluid“ (VOF)-Methode verwendet, bei der für den Volumenanteil einer Phase innerhalb einer Berechnungszelle eine zusätzliche Advektionsgleichung gelöst wird.

Abbildung 10 zeigt Ergebnisse der Untersuchung eines für die Erosion kritischen Falls, nämlich den Kollaps einer direkt an der festen Oberfläche befindlichen Blase von ungefähr Halbkugelgestalt. Da die Blase vor ihrer Implosion zunächst aus dem viel kleineren Plasma im Laserfokus expandiert ist, besitzt sie eine charakteristische Glockenform, die letztlich zur Bildung eines extrem schnellen, dünnen Flüssigkeitsstrahles durch die Blase hin zur Oberfläche führt (ein sog. „schneller Jet“). Zusammen mit den beim Zusammensturz der Blase am Objekt entstehenden hohen Drücken und Stoßwellen kommt für die Erosionswirkung auch der Aufprall des schnellen Jets in Betracht, der in der Simulation Geschwindigkeiten in der Größenordnung von 1000 m/s erreicht. Bisher ging man davon aus, dass die Flüssigkeitsstrahlen kollabierender Blasen an Grenzflächen mit Geschwin-

digkeiten im Bereich von etwa 100 m/s strömen. Dies ist auch bei größeren Abständen der Blase zur Wand der Fall, kann aber die Erosion nicht befriedigend erklären. Der Mechanismus der „schnellen“ Jetbildung wurde übrigens zuerst in numerischen Untersuchungen gefunden [25] und dann im Labor verifiziert [26; 27; 28], da er sich auf so kleinen und schnellen Skalen abspielt, dass er bei direkten Beobachtungen bisher nicht aufgefallen war. Eine Ausnahme bildet ein Experiment aus den 60er Jahren mit Blasen in Unterdruckatmosphäre [29], wobei das Phänomen aber nicht weiter analysiert oder erklärt werden konnte. Dies zeigt erneut den Wert geeigneter Simulationen von Kavitationsblasen, wodurch heute auch die mikroskopischen und extrem schnellen Vorgänge zugänglich werden. Die komplexe Kollapsdynamik einzelner Blasen an Objekten und die Rolle des schnellen Jets bei Oberflächenerosion sind weiterhin hochaktueller Forschungsgegenstand [30; 31].

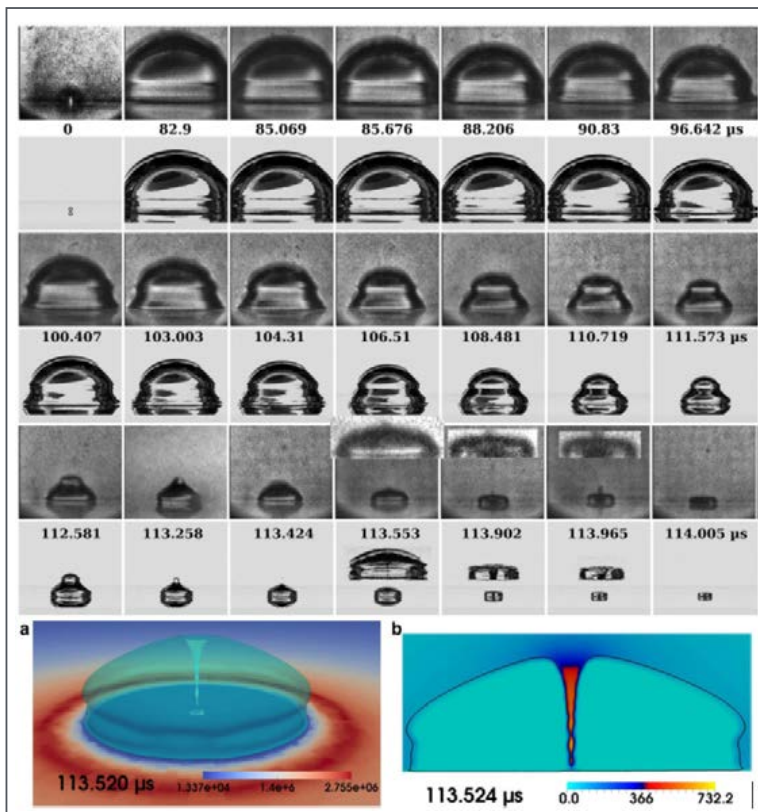
Schlussbemerkungen

In den Beispielen wurde gezeigt, dass sich die Problemstellungen in der akustischen Kavitation über einige Größenordnungen in Raum und Zeit erstrecken, so dass man je nach interessierendem Aspekt geeignete numerische Methoden auswählen muss. Dies wird voraussichtlich auch in näherer Zukunft so bleiben, auch wenn die Rechenleistungen weiter steigen. Dennoch werden die Modelle immer ausgefeilter und können inzwischen auch komplexere Zusammenhänge von Schallfeld, Blasendynamik und Flüssigkeitsströmungen erfassen und in annehmbarer Rechenzeit darstellen. Daher haben sich numerische Simulationen von Kavitation neben Experimenten als wichtiges zweites Standbein in der Grundlagenforschung etabliert, und auch zum Design und zur Optimierung von Anwendungen werden sie in zunehmendem Maße eingesetzt. Abschließend möchten wir feststellen, dass die angesprochenen und vorgestellten Methoden nur einen kleinen Ausschnitt zeigen und keinen Anspruch auf Vollständigkeit haben. Viele Ansätze mussten unerwähnt bleiben, so z. B. die eher von den Methoden der hydrodynamischen Kavitation entlehnten Modelle mit „intrinsischer“ Dampfblasennukleation bei Unterschreiten des Dampfdrucks in der Flüssigkeit. Da außerdem die Forschungstätigkeit und die Anzahl der Publikationen im dargestellten Problemfeld stark im Anstieg begriffen ist, wird man aufmerksam die Entwicklungen verfolgen und darf auf weitere Fortschritte gespannt sein.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei allen Kolleginnen und Kollegen der Arbeitsgruppen und Kooperationen für die tatkräftige Unterstützung. Ebenso danken sie

Abb. 10: Kollaps einer etwa halbkugelförmigen Blase an einer festen Grenzfläche. Oben: Experimentell beobachtete Dynamik (Reihen 1, 3 und 5) zusammen mit simulierter Dynamik (Reihen 2, 4 und 6; Bilder durch ray-tracing mithilfe der numerischen Blasenformen generiert). Die Zahlen geben die Zeit nach Blasenenerzeugung in μs an. In den Bildern rund um die Bildung des schnellen Jets sind Vergrößerungen eingefügt. Unten: 3D-Ansicht und Schnitt durch die simulierte Blase kurz nach Entstehung des schnellen Jets. aus: [27], Springer (2021), Open Access Creative Commons CC BY.



für finanzielle Förderung der dargestellten Arbeiten durch die DFG (ME 1645/5-1/-2, BR 1864/12-1/-2), die EU (Grant Agreement no. 721290 (MSCA-ETN COSMIC)), AiF (IGF-Vorhaben Nr. 18486N) und BFI (VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH, Düsseldorf).

Literatur

- [1] Young, F. R.: Cavitation. McGraw-Hill, 1989.
- [2] Leighton, T. G.: The Acoustic Bubble. Academic Press, 1997.
- [3] Lauterborn W.; Kurz, T.: Physics of bubble oscillations. Rep. Prog. Phys. 73, pp. 106501, 2010.
- [4] Pflieger, R.; Nikitenko, S. I.; Cairós, C.; Mettin, R.: Characterization of cavitation bubbles and sonoluminescence. Springer, 2019.
- [5] Mettin, R.: Bubble structures in acoustic cavitation. In: Doinikov, A. A. (ed.): Bubble and Particle Dynamics in Acoustic Fields: Modern Trends and Applications, pp. 1–36. Research Signpost, 2005.
- [6] Mörch, K. A.: Cavitation inception from bubble nuclei. Interface Focus 5, pp. 20150006, 2015.
- [7] Gompf, B.; Günther, R.; Nick, G.; Pecha, R.; Eisenmenger, W.: Resolving sonoluminescence pulse width with time-correlated single photon counting. Phys. Rev. Lett. 79, pp. 1405–1408, 1997.
- [8] COMSOL Multiphysics®, www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
- [9] Kauer, M.; Belova-Magiri, V.; Cairós, C.; Schreier, H. J.; Mettin, R.: Visualization and optimization of cavitation activity at a solid surface in high frequency ultrasound fields. Ultrason. Sonochem. 34, pp. 474–483, 2017.
- [10] <https://de.wikipedia.org/wiki/Cappuccino-Effekt> (letzter Aufruf: 03.04.2023)
- [11] Caffisch, C. E.; Miksis, M. J.; Papanicolaou, G. C.; Ting, L.: Effective equations for wave propagation in bubbly liquid. J. Fluid Mech. 153, pp. 259–273, 1985.
- [12] Cairós, C.; Mettin, R.: Simultaneous high-speed recording of sonoluminescence and bubble dynamics in multibubble fields. Phys. Rev. Lett. 118, pp. 064301, 2017.
- [13] Louisnard, O.: A simple model of ultrasound propagation in a cavitating liquid. Part I: Theory, nonlinear attenuation and traveling wave generation. Ultrason. Sonochem. 19, pp. 56–65, 2012.
- [14] Lesnik, S.: A Macroscopic Multi-physics Approach for Modeling Acoustically Cavitating Flows. Dissertation, Technische Universität Clausthal, 2022.
- [15] Mettin, R.; Akhatov, I.; Parlitz, U.; Ohl, C. D.; Lauterborn, W.: Bjerknes forces between small cavitation bubbles in a strong acoustic field. Phys. Rev. E 56, pp. 2924–2931, 1997.
- [16] Akhatov, I.; Mettin, R.; Ohl, C. D.; Parlitz, U.; Lauterborn, W.: Bjerknes force threshold for stable single bubble sonoluminescence. Phys. Rev. E 55, pp. 3747–3750, 1997.
- [17] Appel, J.; Koch, P.; Mettin, R.; Krefting, D.; Lauterborn, W.: Stereoscopic high-speed recording of bubble filaments. Ultrason. Sonochem. 11, pp. 39–42, 2004.
- [18] Rosselló, J. M.; Stephens, D. S.; Mettin, R.: Bubble “lightning” streamers from laser induced cavities in phosphoric acid. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2020, 46. Jahrestagung für Akustik, Berlin, pp. 413–416, 2020.
- [19] Lesnik, S.; Mettin, R.; Brenner, G.: Study of ultrasound propagation and cavitation activity in a packing bed of spherical particles. Chemie Ingenieur Technik, 89, pp. 1379–1384, 2017.
- [20] Lesnik, S.; Werner, M.; Wolters, R.; Brenner, G.: Neuartiger Ultraschall-Reaktor zur Wertmetallrückgewinnung aus Reststoffen der stahl- und metallverarbeitenden Industrie. Tech. Rep. Düsseldorf: VDEh-Gesellschaft zur Förderung der Eisenforschung mbH, 2019.
- [21] Nowak, T.; Cairós, C.; Batyrshin, E.; Mettin, R.: Acoustic streaming and bubble translation at a cavitating ultrasonic horn. In: AIP Conference Proceedings Vol. 1685, No. 1, pp. 020002. AIP Publishing, 2015.
- [22] <https://openfoamwiki.net> (letzter Aufruf: 03.04.2023)
- [23] Lesnik, S.; Aghelmaleki, A.; Mettin, R.; Brenner, G.: Modeling acoustic cavitation with inhomogeneous polydisperse bubble population on a large scale. Ultrason. Sonochem. 89, pp. 106060, 2022.
- [24] Nowak, T.: Untersuchung von akustischen Strömungen im kHz- und GHz-Bereich. Dissertation Georg-August-Universität Göttingen, 2013.
- [25] Lechner, C.; Lauterborn, W.; Koch, M.; Mettin, R.: Fast, thin jets from bubbles expanding and collapsing in extreme vicinity to a solid boundary: A numerical study. Phys. Rev. Fluids, 4, pp. 021601, 2019.
- [26] Koch, M.: Laser cavitation bubbles at objects: Merging numerical and experimental methods. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, 2020.
- [27] Koch, M.; Rosselló, J. M.; Lechner, C.; Lauterborn, W.; Eisener, J.; Mettin, R.: Theory-assisted optical ray tracing to extract cavitation-bubble shapes from experiment. Exp. in Fluids 62, pp. 1–19, 2021.
- [28] Reuter, F.; Ohl, C. D.: Supersonic needle-jet generation with single cavitation bubbles. Appl. Phys. Lett. 118, pp. 134103, 2021.
- [29] Benjamin, T. B.; Ellis, A. T.: The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A 260, pp. 221–240, 1966.
- [30] Koch, M.; Rosselló, J. M.; Lechner, C.; Lauterborn, W.; Mettin, R.: Dynamics of a laser-induced bubble above the flat top of a solid cylinder – Mushroom-shaped bubbles and the fast jet. Fluids 7, 2, pp. 1–39, 2022.
- [31] Reuter, F.; Deiter, C.; Ohl, C. D.: Cavitation erosion by shockwave self-focusing of a single bubble. Ultrason. Sonochem. 90, pp. 106131, 2022. ■

Dr. Robert Mettin
Georg-August-Universität Göttingen

Dr. Sergey Lesnik
Wikki GmbH, Wernigerode

Prof. Dr. Gunther Brenner
Technische Universität Clausthal

Bioinspiriertes Mikrofon – die MEMS-Cochlea

Ein bioinspirierter, smarter akustischer Sensor: frequenzselektiv nichtlinear, hochadaptiv und informationskodierend

Claudia Lenk, Daniel Beer, Andreas Männchen, Jan Küller, Kalpan Ved, Steve Durstewitz, Vishal Gubbi, Tzvetan Ivanov, Martin Ziegler

Dieser Artikel stellt ein neuartiges, bioinspiriertes Mikrofon mit integrierter Signalverarbeitung vor – die MEMS-Cochlea. Sie soll Aspekte des menschlichen Gehörs nachbilden und nutzt winzige, resonante Biegeschwinger mit piezoresistivem Wandlerprinzip als Schallempfänger. Die Sensor- und Verarbeitungseigenschaften können durch eine einfache Rückkopplungsschaltung in Echtzeit stark angepasst werden. Die einstellbare nichtlineare Amplitudenkennlinie des Sensors verbessert dabei die Erfassung von Signalen unter Störschall- und Rauscheinfluss, vergrößert den Dynamikbereich des Sensors und ermöglicht die Adaption an sich ändernde akustische Umgebungen. Elektroakustische Messungen und FEM-Simulationen zeigen die grundsätzlichen Sensoreigenschaften auf und bestätigen die Abhängigkeit des Sensorverhaltens von den einstellbaren Parametern. Die hier vorgestellten Eigenschaften der MEMS-Cochlea machen sie zu einem interessanten Kandidaten für die Schall-datengewinnung und -vorverarbeitung in KI-basierten Schallerkennungssystemen.

Motivation für die MEMS-Cochlea

Die akustische Überwachung von Maschinen und Prozessen ist bis heute auf Experten angewiesen, die anhand des abgestrahlten Schalls und ihrer langjährigen Hörerfahrungen beurteilen können, ob Fehler auftreten bzw. Qualitätskriterien, etwa in der End-of-Line-Kontrolle, erfüllt werden. Mit dem Wunsch einer zunehmenden automatischen Überwachung soll dieser Prozess technologisiert werden. In den vergangenen Jahren wurden zu diesem Zweck Lösungsansätze entwickelt, bei denen der abgestrahlte Schall einer Maschine mit Mikrofonen aufgenommen und anschließend mit Methoden des maschinellen Lernens analysiert wird [1]. Hierfür werden die Schallsignale in ihre Frequenzkomponenten zerlegt. Welche Frequenzen wie stark im Signal vertreten sind, kann wiederum zum Identifizieren der Geräusche genutzt werden. Nach einem notwendigen Trainingsprozess sind die Algorithmen in der Lage, selbstständig erlernte Zustände zu erkennen. Ein fehlerhafter Betriebszustand bei Maschinen kann so in gleicher Qualität wie

A bioinspired microphone – the MEMS cochlea

This article introduces a novel bioinspired microphone with integrated signal processing – the MEMS cochlea. It is designed to replicate aspects of human hearing and uses tiny, resonant flexural transducers with a piezoresistive transducer principle as sound receivers. Their sensing and processing characteristics can be greatly adjusted in real time by a simple feedback circuit. Dynamic switching between linear and nonlinear amplitude characteristics improves the detection of signals under noise influence, increases the dynamic range of the sensor, and allows adaptation to changing acoustic environments. Electroacoustic measurements and FEM simulations demonstrate the basic sensor characteristics and confirm the dependence of the sensor behavior on the adjustable parameters. The properties of the MEMS cochlea presented here make it an interesting candidate for sound data acquisition and preprocessing in AI-based sound detection systems.

von einem Experten detektiert werden. Ähnliches gilt für Systeme zur Spracherkennung beispielsweise für die Sprachsteuerung von Maschinen.

Obwohl die eingesetzten Mikrofone und die nachgeschalteten Signalverarbeitungselemente qualitativ hochwertig ausgeführt sind, stellen viele Schallsituationen eine große Herausforderung dar. Insbesondere schwierig sind Situationen, in denen das zu detektierende Geräusch gegenüber Umgebungsgeräuschen sehr leise ist (kleiner Signal-Rausch-Abstand, SNR von engl. signal-to-noise ratio) oder wenn die erlernte Schallsituation stark von der vorliegenden abweicht [2–4]. Letzteres tritt ein, wenn sich beispielsweise die Maschinenaufstellung ändert oder eine andere Produktionshalle (Transfer zu neuem Produktionsstandort) verwendet wird. Die damit einhergehende Veränderung der Raumakustik bringt für das Analysesystem bis dahin unbekannte Klangfärbungen (Schallreflexionen) und Geräusche mit, welche das Frequenzspektrum deutlich verändern, sodass die gelernte Erkennung nicht mehr funktioniert [5].

Mit Blick auf den Ausgangspunkt, nämlich den Experten mit langjähriger Hörerfahrung, scheint eine nähere Betrachtung der Schallwahrnehmung und -verarbeitung durch den Gehörsinn des Menschen lohnend, um daraus Optimierungsansätze für die Mikrofon- und die nachgeschaltete Signalverarbeitungstechnologie abzuleiten.

Das menschliche Gehör weist bemerkenswerte Wahrnehmungseigenschaften auf: einen Dynamikbereich von mehr als 120 dB Schalldruckpegel (SPL, von engl. sound pressure level), eine Frequenzauflösung von 0,1 %, eine Intensitätsunterscheidung von nur 1 dB und, am wichtigsten für die oben genannten Probleme, adaptives Hören [6–8]. Adaptives Hören beschreibt, dass die Eigenschaften der Schallaufnahme (wie Empfindlichkeit, Verstärkung etc.) und der Signalverarbeitung (z.B. Filterbandbreite) an die jeweilige Situation und die Erfordernisse angepasst werden, insbesondere bei kleinen Schalldruckpegeln und in lauten Umgebungen. Diese bemerkenswerten Eigenschaften werden durch drei Merkmale (Funktionsprinzipien) ermöglicht:

1. die Vorverarbeitung der Schalldaten auf der Sensorebene
2. die lokale frequenzselektive Rückkopplung auf der Sensorebene
3. die dynamische Adaption auf allen Systemebenen (ausgenommen Außenohr)

Die Vorverarbeitung der Schalldaten auf der Sensorebene meint die Frequenzfilterung, die frequenzselektive, nichtlineare Verstärkung des Signals und die Kodierung in eine definierte Anzahl an Spannungspulsen. Die Frequenzzerlegung (Analyse) wird realisiert, indem die Basilarmembran entlang ihrer Länge auf verschiedene Frequenzen jeweils mit einer lokal höchsten Empfindlichkeit (best frequency) reagiert (Abbildung 1), wobei an der betreffenden Stelle der Basilarmembran die Auslenkung maximal wird.

Die Kodierung in Spannungspulsfolgen (engl. spike patterns) bedeutet, dass die Amplitude des Sensorsignals (Spannung mit kontinuierlicher Amplitude und variablem Zeitverlauf) in eine binäre Antwort der Nervenfasern (Anzahl an Spannungspulsen mit fester Amplitude und Dauer) überführt wird (Abbildung 2). Die Spikerate, d.h. die Anzahl an Spannungspulsen pro Zeit, kodiert somit die Schallamplitude. Beide Funktionen (Frequenzfilterung und Kodierung) sind bereits auf der Sensorebene implementiert, die aus der Basilarmembran, den Haarzellen und der Synapse zum Hörnerv besteht [6, 7].

Die lokale frequenzselektive Rückkopplung auf der Sensorebene ermöglicht eine Veränderung der Verstärkung im Sensor um 40–60 dB [8] sowie nichtlineare (kompressive) Amplitudenkennlinien (Abbildung 3).

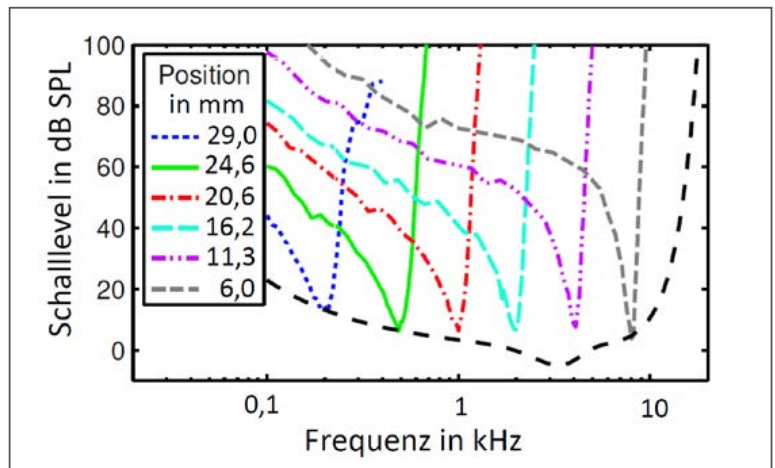


Abb. 1: Detektionsgrenzwerte der auditorischen Nerven an verschiedenen Positionen entlang der Basilarmembran des Innenohrs. Die Bandpass-ähnlichen Filtereigenschaften der Nervenzellen und die Resonanzeigenschaften der Basilarmembran führen zu einer Frequenzzerlegung des eintreffenden Schalls bei der Schallaufnahme. Adaptiert von [9].

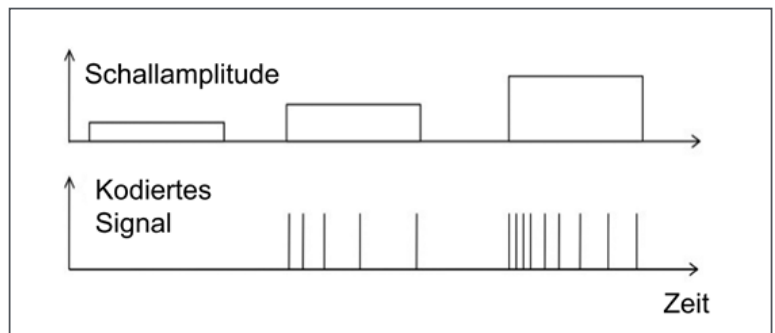


Abb. 2: Schematische Darstellung der Kodierung der Schallamplitude (oben) als Rate an Spannungspulsen (engl. spike pattern) (unten). Hierbei besitzt jeder Spannungspuls dieselbe Amplitude („alles-oder-nichts-Antwort“), ähnlich einer Kodierung in 0 (kein Puls) und 1 (Puls). Die Rate der Spannungspulse kennzeichnet zusätzlich das Maß der Signalveränderung, so dass eine Reduktion der Spannungspulsrate eintritt, wenn das Schallsignal mit der Zeit keine Änderungen aufweist.

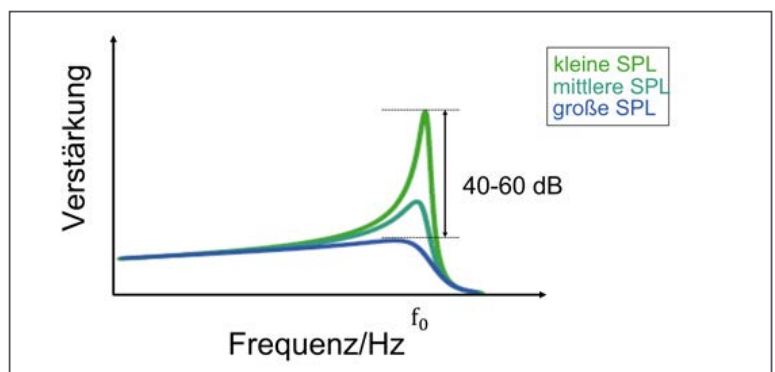


Abb. 3: Schematische Darstellung des Antwortverhaltens der Basilarmembran in der Cochlea auf verschiedene Frequenzen. Die nichtlineare Verstärkung um die Resonanzfrequenz f_0 kann bis zu 60 dB betragen. Aufgrund der amplitudenabhängigen Verstärkung werden leise Frequenzen nahe der Resonanzfrequenz mehr verstärkt als laute (kompressive Verstärkung). Modifiziert von [10].

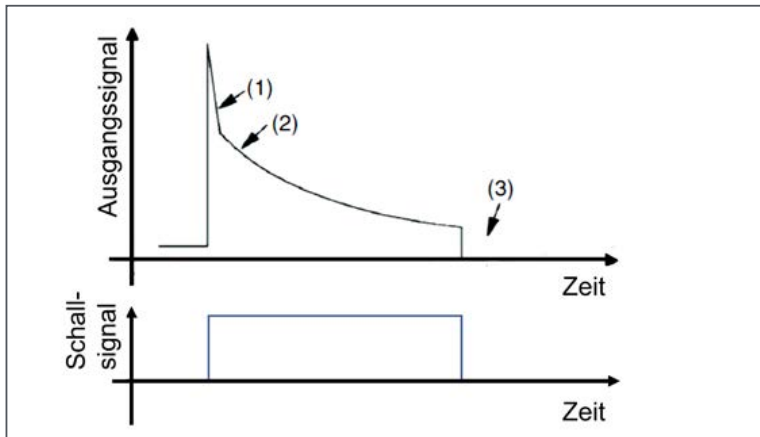


Abb. 4: Schematische Darstellung der Adaption der Sensorantwort bzw. Spikerate der Nervenfasern auf ein sprunghaft einsetzendes und endendes Schallsignal mit konstanter Amplitude. Hierbei zeigen die Kurvenabschnitte 1 und 2 die Onset-Adaption und Abschnitt 3 die Offset-Adaption. Modifiziert von [22].

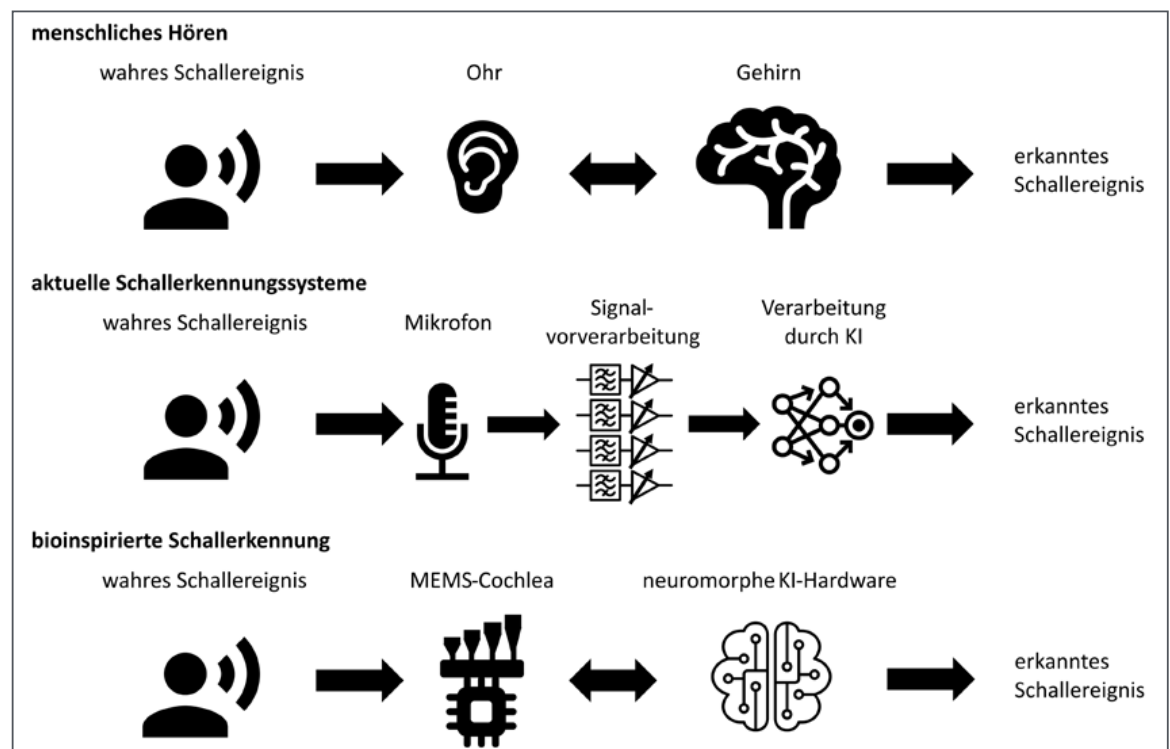
Diese Rückkopplung basiert hauptsächlich auf der Motilität der äußeren Haarzellen, welche die Bewegung der Basilarmembran und somit das Eingangssignal für die inneren Haarzellen verstärkt. Die inneren Haarzellen sind die eigentlichen Schallwandler. Durch die sich daraus ergebende nichtlineare Verstärkungskennlinie werden kleine SPL mehr verstärkt als laute. Dies bietet den Vorteil, dass der große Schalldynamikbereich (>120 dB SPL) in einen kleineren, welcher von den Sensoren und Nerven verarbeitet

werden kann, transformiert wird. Dies ermöglicht die Geräuscherkennung trotz hohem Systemgrundrauschen ($\text{SNR} \leq 0$ dB), zeitgleichen Störgeräuschen und Maskierungseffekten [11–13].

Die dynamische Adaption findet – mit Ausnahme des Außenohrs – auf allen Ebenen des auditiven Systems statt, einschließlich der Signalverarbeitung vor (Mittelohr-Übertragungsfunktion durch akustischen Reflex) und während der Wandlung (im Innenohr) sowie der nachfolgenden Verarbeitungsstufen. Im Innenohr wird beispielsweise die Rückkopplung situationsangepasst und frequenzselektiv reflexartig bzw. durch höhere Ebenen (Gehirn) angepasst [6, 14, 15]. Diese Anpassungsfähigkeit aller Komponenten ermöglicht verbesserte Wahrnehmungsbedingungen für unterschiedliche Hörumgebungen, insbesondere in Situationen mit niedrigem SNR [11, 16–18]. Weiterhin werden durch die Adaption auch spezifische Merkmale des Schallsignals hervorgehoben, was deren Analyse erleichtert (vgl. Abbildung 4). Beispielsweise ist das Hervorheben des Beginns eines Geräusches (Onset-Adaption) hilfreich bei der Schallquellenlokalisierung, da hierfür der Laufzeitunterschied zwischen zwei Messpunkten ausgewertet wird [19]. Auch wurde in [20, 21] gezeigt, dass die Offset-Adaption, d.h. das Hervorheben des Endes eines Geräusches, wichtig für die Spracherkennung ist.

Im Gegensatz zum menschlichen Gehörsinn ist bei aktuellen technischen Schallerkennungssystemen die

Abb. 5: Schematische Darstellung der Schallaufnahme und Signalverarbeitungskette in verschiedenen Systemen zur Schallereigniserkennung: menschlicher Hörsinn, aktuelle technologische Systeme, bioinspirierter Ansatz mit MEMS-Cochlea.



Frequenzfilterung und nichtlineare Amplitudenadaption meist nach dem Mikrofon integriert (vgl. Abbildung 5 (a), (b)). In den meisten Systemen fehlen die Adaption und die Rückkopplung zur Sensorik ganz. Simulationen haben gezeigt, dass Modelle für die KI-basierte Schallereigniserkennung bei kleinem SNR wesentlich besser sind, wenn sie die biologische Signalverarbeitung des Ohres berücksichtigen [23, 24]. Diese Modelle können aber nur bedingt in echtzeitfähige und energieeffiziente Systeme eingebaut werden. Daher wird in diesem Artikel ein bioinspiriertes Mikrofon – die MEMS-Cochlea – vorgestellt, welches sich am Wirkprinzip des menschlichen Gehörs orientiert [25]. In diesem Mikrofonansatz sind die drei beschriebenen Merkmale des menschlichen Gehörs – Frequenzfilterung und Signalkodierung, nichtlineare Verstärkung und Adaption – berücksichtigt. Dadurch passt sich das Mikrofon schnell an sich ändernde akustische Umgebungen an, reagiert frequenzselektiv auf unterschiedliche Spektralanteile des Schalls und kann die Signale in Spannungspulse kodieren [26]. Es eignet sich somit gut als „Universalmikrofon“, das seine Leistungsparameter in einem gegebenen Frequenzbereich automatisch an die jeweilige Schallsituation anpasst, sich also selbst kalibriert und parametrisiert. Es ist mit Hilfe von mikroelektromechanischen Sys-

temtechnologien (MEMS-Technologien) realisiert, sodass es preislich und bezüglich seiner Abmessungen sehr gut für die (quellnahe) Installation/Integration in Maschinen und an Produktionsstrecken geeignet ist. Durch die Informationskodierung und die Hervorhebung wichtiger Schallmerkmale kann mit der MEMS-Cochlea die Datenerfassung und -weiterleitung sowie die Schallereigniserkennung effizienter und schneller werden.

Konzept und Wirkprinzip

Die entwickelte MEMS-Cochlea dient der Schallaufnahme und Signalvorverarbeitung u. a. in Systemen zur Erkennung von spezifischen Schallereignissen, bspw. Maschinengeräusche oder Sprache. Durch ihre bioinspirierten Eigenschaften (Frequenzzerlegung, frequenzselektive Rückkopplung und Adaption) führt sie eine Signalverarbeitung durch, welche die Ereigniserkennung gerade für stark wechselnde Situationen (z. B. Fabrikhalle A, Fabrikhalle B) einfacher und leistungsfähiger macht. Hierfür besteht die MEMS-Cochlea aus drei Teilen (vgl. Abbildungen 6–8):

1. einem Array aus Biegebalken,
 2. einer Rückkopplungsschleife pro Biegebalken,
 3. einer Regelung der Rückkopplung.
- Diese drei Hauptmerkmale werden nun beschrieben.

CRADLE TO CRADLE CERTIFIED® PRODUKTE DER ACOUSTICS DIVISION



akustik@regupol.de
www.regupol.com

PRODUKTE AUS FOLGENDEN RANGES SIND ZERTIFIZIERT:

REGUPOL
sound



REGUPOL
sound and drain



REGUPOL
vibration



REGUPOL
comfort



REGUPOL

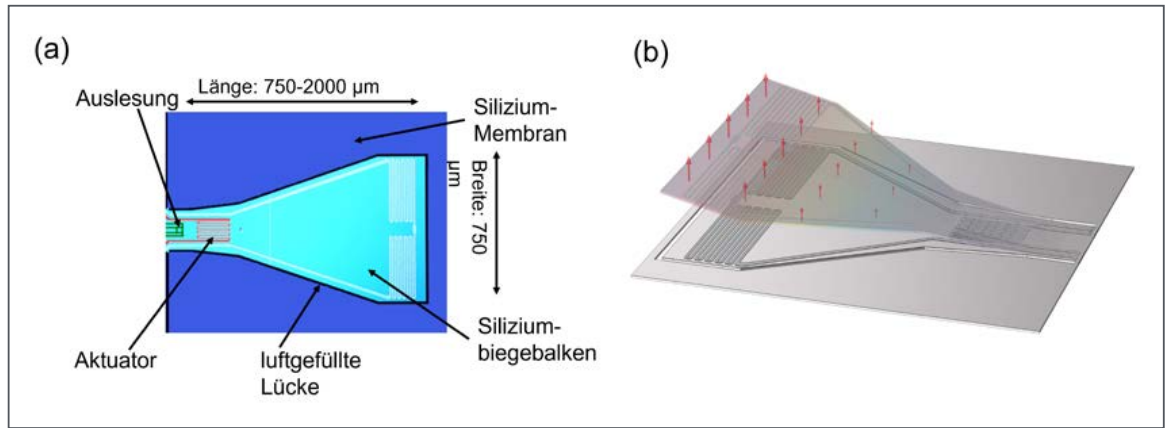


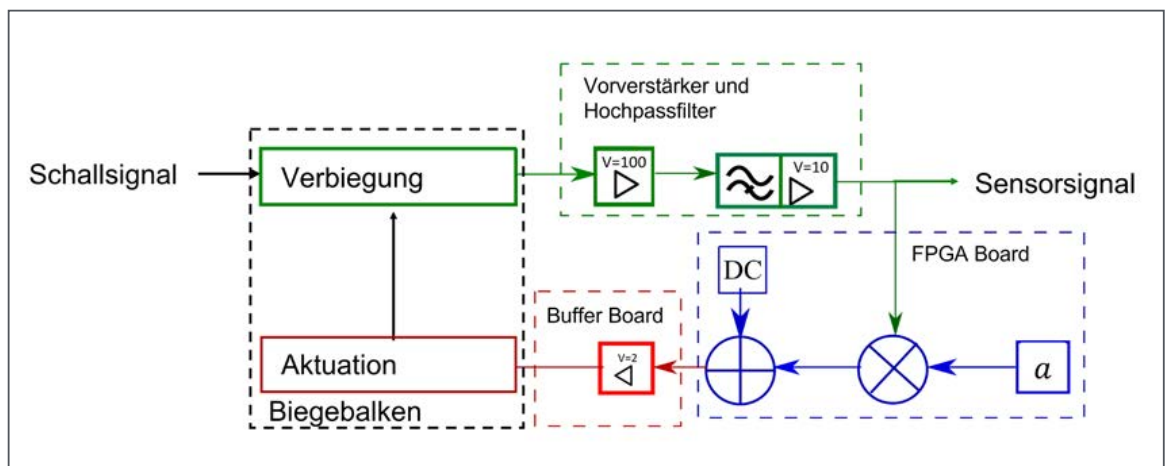
Abb. 6: Eingefärbtes Mikroskopbild eines Biegebalkens der MEMS-Cochlea mit einem integrierten thermomechanischen Aktuator (rot) und einer piezoresistiven Auslesesensorik (grün). Um die Empfindlichkeit zu erhöhen, ist eine Membran um den Biegebalken angebracht (a). Simulation der Auslenkung eines Biegebalkens durch Anregung seiner ersten Schwingungsmode durch eine ebene Schallwelle von unten (b).

Frequenzzerlegung durch ein Array aus Biegebalken

Die Schallaufnahme erfolgt durch ein Array aus Silizium-Biegebalken. Hierbei wird die durch den Schall entstehende mechanische Auslenkung des Balkens mit Hilfe integrierter piezoresistiver Elemente („Auslesung“ in Abbildung 6: (a), grün markiert) detektiert, welche in Wheatstone-Brückenkonfiguration angeordnet sind und die Auslenkung in ein Spannungssignal umwandeln [27, 28]. Im Gegensatz zu konventionellen Mikrofonen, deren Arbeitsbereich unterhalb der Resonanzfrequenz liegt, erstreckt sich der Arbeitsbereich des einzelnen Biegebalkens über einen schmalen Bereich um seine Resonanzfrequenz. Die Resonanz ermöglicht eine hohe sensorische Empfindlichkeit trotz kleiner Balkengröße und eine bandpassartige Filterfunktion (3 dB-Bandbreite je nach Design zwischen 30 Hz und 500 Hz). Typische Balkenlängen erstrecken sich von 750 µm bis

2 mm. Die Balkenbreite liegt bei 750 µm und -dicke bei 1 µm bis 10 µm. Die Resonanzfrequenz des Balkens ist von der Länge und der Dicke abhängig. Daher kann mit einem Array aus unterschiedlichen Balken eine Filterbank realisiert werden, welche das eintreffende Schallsignal in seine Frequenzkomponenten zerlegt. Um trotz der geringen Größe eine hohe Empfindlichkeit zu erreichen, ist der Biegebalken von einer Membran umgeben, welche an allen Seiten eingespannt ist. Zwischen Biegebalken und Membran gibt es eine definierte Lücke. Dadurch sind beide mechanisch entkoppelt. Gleichzeitig sind die Membran und der jeweilige Biegebalken aber akustisch gekoppelt aufgrund thermoviskoser Grenzschichteffekte, wenn die Lücke schmaler als 30 µm ist. Dadurch wird der Druckgradient zwischen Vorder- und Rückseite des Biegebalkens erhöht und somit die auf ihn bei gleichem Schalldruck einwirkende Kraft, die

Abb. 7: Schematische Darstellung der Rückkopplungseinheit für einen Biegeschwinger. Die Verbiegung des Balkens durch den Schall wird piezoresistiv ausgelesen, verstärkt und hochpassgefiltert und anschließend als Sensorsignal ausgegeben. Für die Rückkopplung wird das Sensorsignal um den Faktor a verstärkt und ein DC-Anteil hinzugefügt und anschließend damit der thermische Aktor des Biegebalkens betrieben.



sensorische Empfindlichkeit nimmt also zu [29, 30]. Die Biegebalken werden mittels MEMS-Technologie fabriziert, d. h. den (CMOS-)Fabrikations-, Design- und Funktionsprinzipien von MEMS [27, 28]. Die Biegebalken können im Wafermaßstab produziert werden, wobei ein 4-Zoll-Wafer ca. 200–500 Biegebalken enthält.

Anpassbare Verstärkung und Bandbreite durch die Rückkopplungsschleife

Die Rückkopplungsschleife beeinflusst das Schwingverhalten des Biegebalkens und ermöglicht so die elektronische Regelung seiner Bandbreite und seines Amplitudenverlaufes (Abbildung 7) [25, 31]. Hierfür wird zunächst das piezoresistiv gemessene Spannungssignal verstärkt, dann ein konstanter DC-Anteil hinzugefügt, und anschließend mit diesem Signal der thermische Aktor des Biegebalkens betrieben. Der Aktor besteht aus einer Aluminiumschicht/-schleife, welche auf dem Siliziumbiegebalken aufgebracht ist. Die Anregung basiert hierbei auf dem Bimorph-Effekt, d. h. eine angelegte Spannung führt zur Erwärmung des Balkens, woraufhin dieser sich verbiegt, da Silizium und Aluminium unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten haben [28, 29]. Durch Veränderung des Verstärkungsfaktors oder des DC-Anteils der Rückkopplungsschleife kann die Empfindlichkeit und Bandbreite der Biegebalken verändert werden, entsprechend einer Verringerung bzw. Erhöhung der Dämpfung. Damit lässt sich die Linearität der Amplitudenkennlinie steuern [25] und die amplitudenabhängige Empfindlichkeit des menschlichen Hörens nachbilden.

Adaption durch die Regelschleife

Die Regelschleife verändert die Rückkopplungsparameter und passt somit die Eigenschaften des Systems (Empfindlichkeit, Bandbreite) automatisch an das ermittelte Sensorsignal an [25, 32]. Damit wird es möglich, dass die MEMS-Cochlea die Schallsignale mit den dafür am besten geeigneten Sensoreinstellungen (Empfindlichkeit, Frequenzauflösung u. Ä.) aufnimmt und verarbeitet. Die nachgeschaltete Ereigniserkennung kann somit auf eine bessere Datengrundlage zurückgreifen. Ein fortwährendes Wechseln der Mikrofone oder Mikrofoneinstellung bei stark unterschiedlichen Schallsituationen ist – im Gegensatz zu den bisherigen Erkennersystemen – nicht mehr erforderlich. Weiterhin bietet die Umwandlung des kontinuierlichen Signals in Spannungspulse durch Schalten der Rückkopplungsparameter eine vorteilhafte Ausgangsbasis für die anschließende Digitalisierung, da deutlich geringere Abtastraten als für die Abbildung der Wellenform des Schallsignals notwendig sind. Gleichzeitig ermöglicht dies, nur Daten zu erzeugen

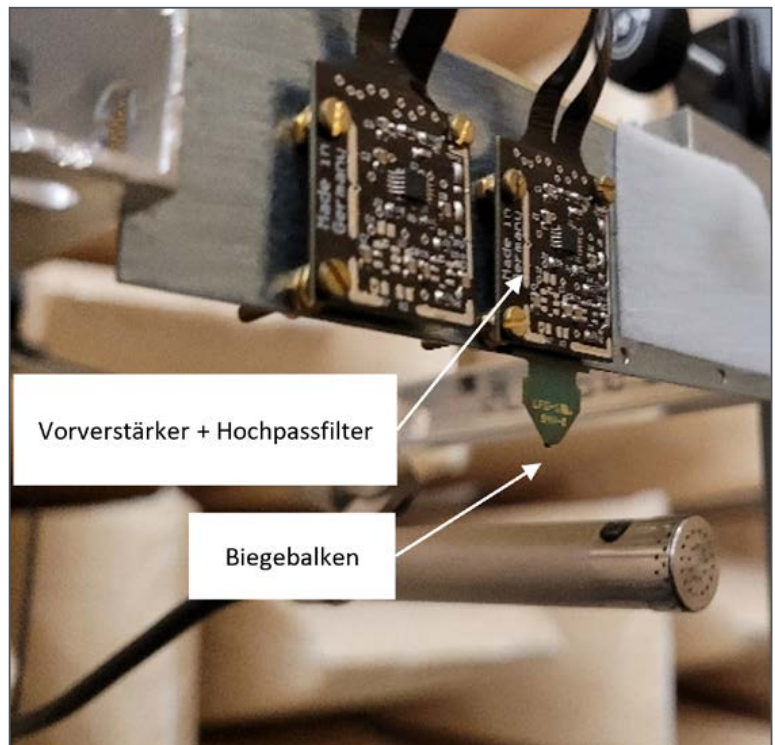


Abb. 8: Messaufbau im reflexionsarmen Raum des Fraunhofer IDMT mit Biegebalken samt Elektronik und Referenzmessmikrofon.

und zu senden, wenn eine Änderung des Schallsignales auftritt (ereignisbasierte Aufnahme). Die Adaption der Rückkopplungsschleife hebt zudem bestimmte Schallanteile hervor, z. B. den Beginn des Geräusches, was mit den bereits genannten Vorteilen einhergeht. Die Rückkopplungsschleife und die Regelung wurden für das bioinspirierte Mikrofon sowohl auf einer Embedded-Plattform (STEMlab 125-14 von RedPitaya) als auch in analogen Schaltkreisen (mit diskreten Bauelementen) umgesetzt [25, 32]. Für die spätere Industrialisierung sollen beide als ASIC (application-specific integrated circuit) implementiert werden.

Evaluation der MEMS-Cochlea

Die MEMS-Cochlea wurde hinsichtlich der Nachbildung ausgewählter Eigenschaften des menschlichen Gehörs messtechnisch und simulativ evaluiert [29, 30]. Hierfür fanden Messungen einzelner Biegebalken mit Rückkopplungsschleife im reflexionsarmen Raum des Fraunhofer IDMT statt. Parallel kamen FEM-Simulationen zur Evaluation des Biegebalkendesigns in COMSOL Multiphysics zum Einsatz. Der Messaufbau ist in Abbildung 8 dargestellt. Er umfasste neben dem jeweiligen Biegebalken mit Elektronik noch ein nur wenige Zentimeter entfernt platziertes Messmikrofon (Kapsel Microtech Gefell MK221). Dieses zeichnete den mit einem Lautsprecher (Neumann KH 310 A) generierten Anregungsschall zu Referenzzwecken auf. Die Entfernung des Biegebalkens sowie des Referenzmikrofons zum Lautsprecher betrug für die

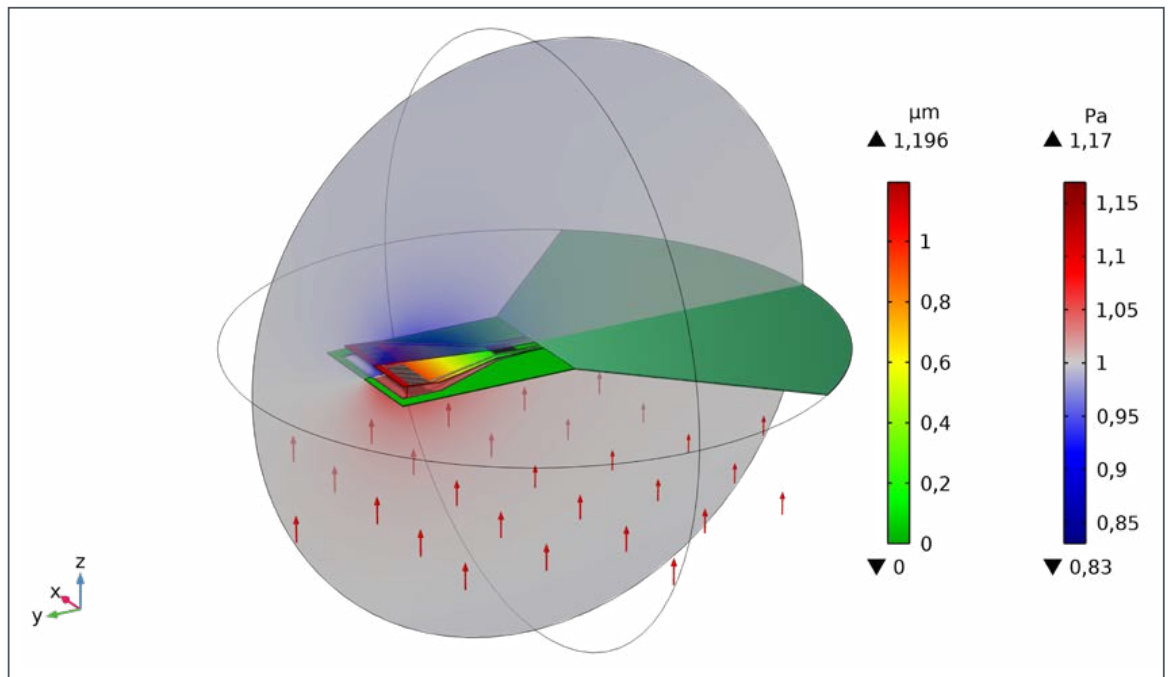
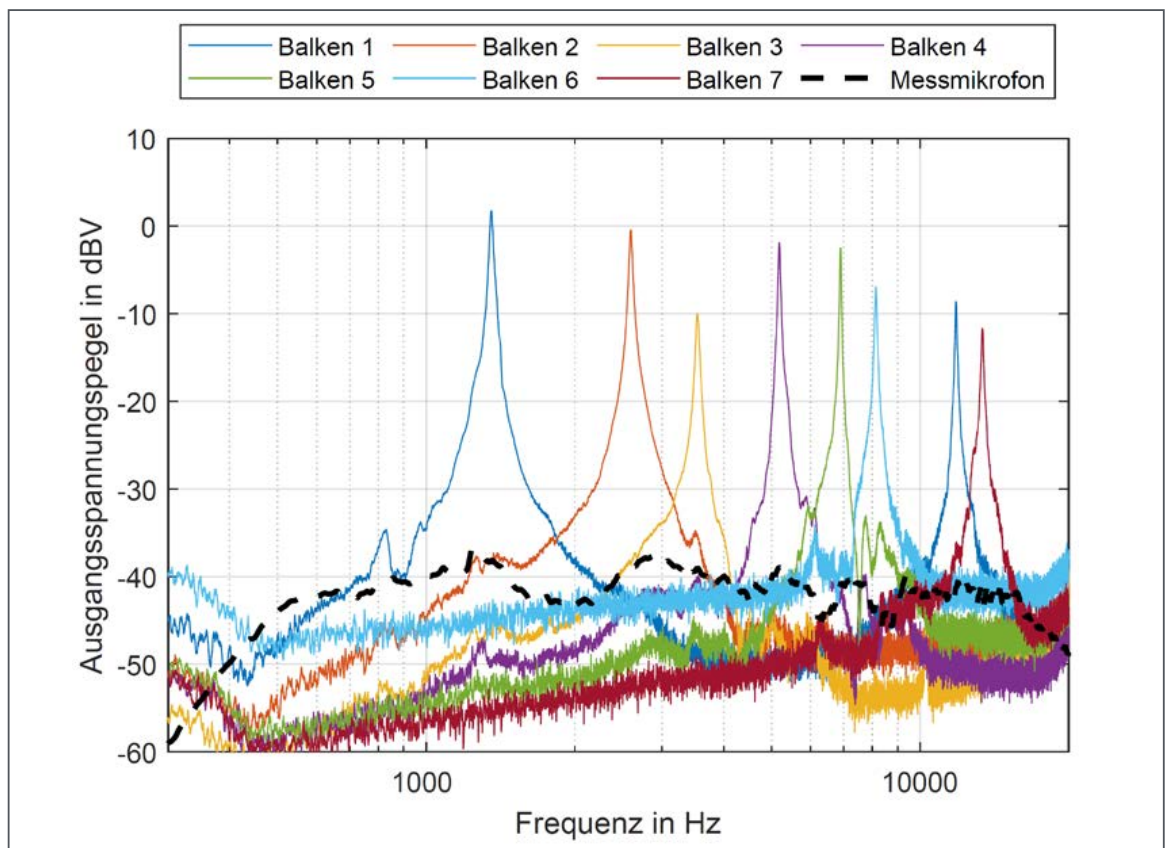


Abb. 9: FEM-Simulationsmodell eines Biegebalkens, welcher von einer Membran umgeben ist. Die Pfeile deuten die eingehende ebene Schallwelle mit 1 Pa Amplitude bei der Resonanzfrequenz an. Die linke Skala zeigt die mechanische Auslenkung und die rechte Skala den Schalldruck, der sich vor und hinter dem Biegebalken unterscheidet.

Abb. 10: Darstellung einer exemplarischen Filterbankcharakteristik bei Verwendung des Ausgangspegels von sieben Biegebalken (blaue, orangefarbene, gelbe, violette, grüne, hellblaue und dunkelrote Linien) und des Ausgangspegels des Referenzmikrofons (schwarz gestrichelte Linie). Man beachte: Die blau gefärbte Spitze mit der insgesamt zweithöchsten Frequenz der acht sichtbaren Bandpassfilter resultiert aus einer höheren Schwingungsmode von Balken 1. Je nach Balkendesign, -anzahl und Parametrisierung der Rückkopplungsschleife ist eine breite Varianz an Filterbankcharakteristiken erzielbar.



allgemeine Charakterisierung der Übertragungseigenschaften 1,6 m und für die Bestimmung des Verhaltens bei hohen Eingangspegeln 6,9 cm. Der kleine Abstand war für das Erzielen hoher SPL bis zu 130 dB notwendig, lässt aber signifikante Nahfeldeffekte erwarten. Als Anregungssignal diente stets ein exponentielles Chirp-Signal von 500 Hz bis 16 kHz. Die AD/DA-Wandlung erfolgte durch die Hilo-Schnittstelle der Firma Lynx mit einer Abtastrate von 96 kHz.

Mit Hilfe von FEM-Simulationsmodellen konnte die akustomechanische Reaktion des Biegebalkens auf eine einfallende ebene Schallwelle mit 1 Pa Amplitude bei verschiedenen Frequenzen bestimmt werden (Abbildung 9). Verglichen wurden unterschiedliche Designs hinsichtlich [29, 30]:

- der maximalen mechanischen Auslenkung,
- der mechanischen Spannung,
- der Schalldruckdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite,
- der Resonanzfrequenz und
- der Richtcharakteristik des Biegebalkens.

Da der Schall von beiden Seiten auf die Biegebalken in den Simulationen und in den Messungen traf, weist die MEMS-Cochlea die Charakteristik eines Druckgradientenempfängers und damit eine Achterrichtcharakteristik auf. Durch kleine Veränderungen

des Designs kann auch eine Druckempfängercharakteristik erreicht werden.

Frequenzerlegung

Die Filterbankcharakteristik für die Zerlegung des Schallsignals in verschiedene Frequenzkomponenten wurde durch die Aufnahme der Antwortspektren von sieben Biegebalken ohne Rückkopplungsbetrieb experimentell untersucht. Wie aus Abbildung 10 hervorgeht, ergibt sich durch die unterschiedlichen Resonanzfrequenzen der Balken zwischen 1,35 kHz und 13,4 kHz eine Abfolge von meist überlappenden Bandpasscharakteristika. Durch eine geschickte Abstimmung der Resonanzfrequenzen und die Auswahl einer ausreichenden Zahl an Biegebalken lässt sich so eine Frequenzerlegung über das gesamte Audiospektrum direkt in der MEMS-Cochlea erreichen. Dabei können die Resonanzfrequenz (best frequency) und die Bandbreite eines jeden Biegebalkens durch die Rückkopplung während des Betriebs angepasst werden, was die Anzahl der benötigten Biegebalken reduzieren kann. Hierbei besitzen die Biegebalken im passiven Betrieb ohne Rückkopplungen Gütefaktoren zwischen 30 und 150 (Bandpassfilter im Ohr ca. 1–10), welche durch die Rückkopplung erhöht bzw. vermindert werden können.



**KEINE
KOMPROMISSE MEHR:
ALLES IN EINER LÖSUNG!**

Hohe EMV-Abschirmung mit akustischer Wirksamkeit

Unsere vorgefertigten Räume bieten Ihnen alles, was Sie für genaue und zuverlässige Messungen benötigen.

ÜBER UNS

Mit über 50 Jahren in Deutschland und als Vorreiter in der Entwicklung, Fertigung und Montage von akustischen Messräumen, sind wir zu einem der weltweit führenden Anbieter von hochwirksamen Schallschutzprodukten geworden. Unser guter Ruf basiert auf unserem Engagement für qualitativ hochwertige Produkte und einem ausgeprägten Verständnis für die tatsächlichen Bedürfnisse und Wünsche unserer Kunden.



Sohlweg 17, 41372 Niederkrüchten
T: +49 2163 9991 0
E: deutschland@iac-gmbh.de
www.linkedin.com/company/iac-germany



www.iac-gmbh.de

UMFOTEC

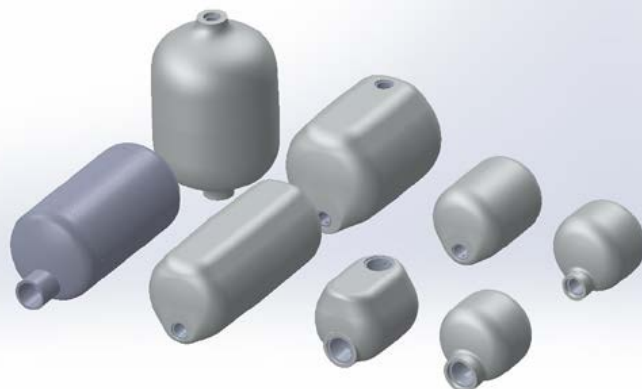
ACOUSTIC SOLUTIONS

• Weltmarktführer von *Resonatoren* für Turbolader

- Edelstahl, Aluminium, technische Kunststoffe
- Maximale Dämmung, minimaler Druckverlust
- Robust auch mit kontaminierten Medien

• *NEU: Resonatoren* für Kältekreisläufe

- „Best-in-Class“ akustische Wirkung pro benötigtem Bauraum
- Für konventionelle und CO₂ KFZ-Klimaanlagen
- In Edelstahl und Aluminium verfügbar
- Für Saugseite und Druckseite (9mm bis 22mm Anschlüsse)



info@umfotec.de; UMFOTEC Acoustic Solutions GmbH Northeim; Tel.: 05551/9868-0

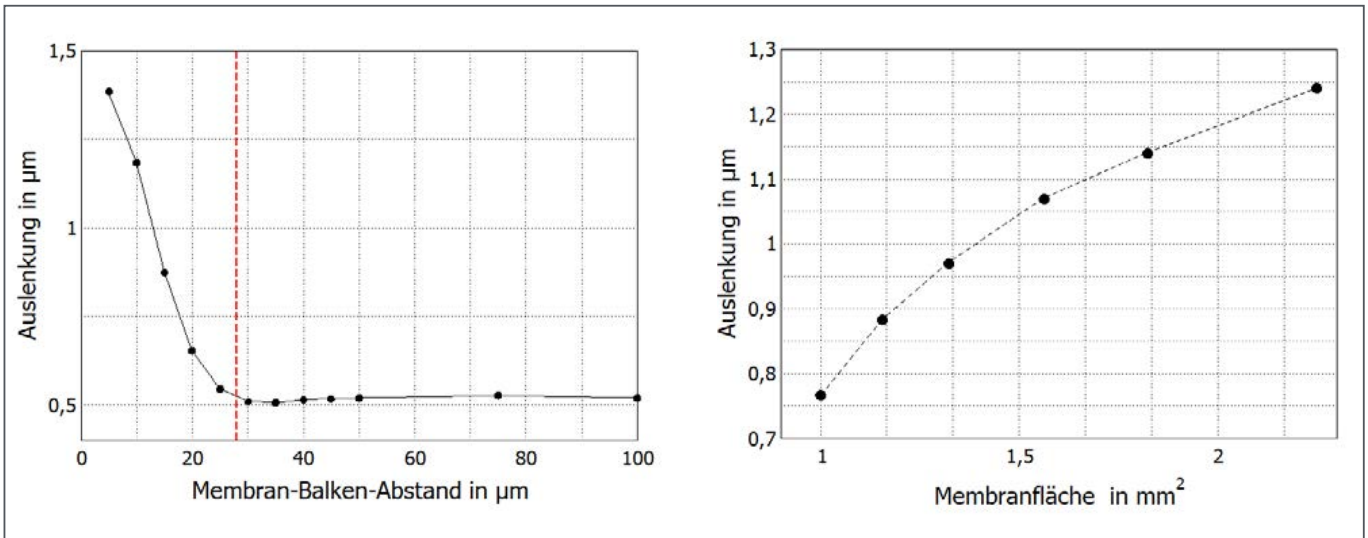


Abb. 11: Maximale Auslenkung des Balkens, als Maß für die Empfindlichkeit, in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Membran und Balken (links) und von der Membranfläche (rechts). Hierbei repräsentiert die rote gestrichelte Linie (links) die Breite der viskosen Grenzschicht. Für größere Abstände sind Membran und Balken akustisch entkoppelt. Eine Vergrößerung der Membranfläche (für einen Abstand von 15 μm) erhöht die Empfindlichkeit des Balkens, da die Druckdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite größer wird [30].

Einstellung der Empfindlichkeit durch das Design

Das Design des Balkens beeinflusst nicht nur die Resonanzfrequenz (Bandpasscharakteristik) des Sensors, sondern auch dessen Empfindlichkeit. Eine Möglichkeit diese Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Balkengeometrie auszugleichen ist es, die Geometrie der umgebenden Membran und ihren Abstand vom Biegebalken zu verändern. Um dies zu untersuchen wurde in Simulationen die maximale Auslenkung des Balkens an seinem freien Ende als Maß für die Empfindlichkeit verwendet. Wie die Si-

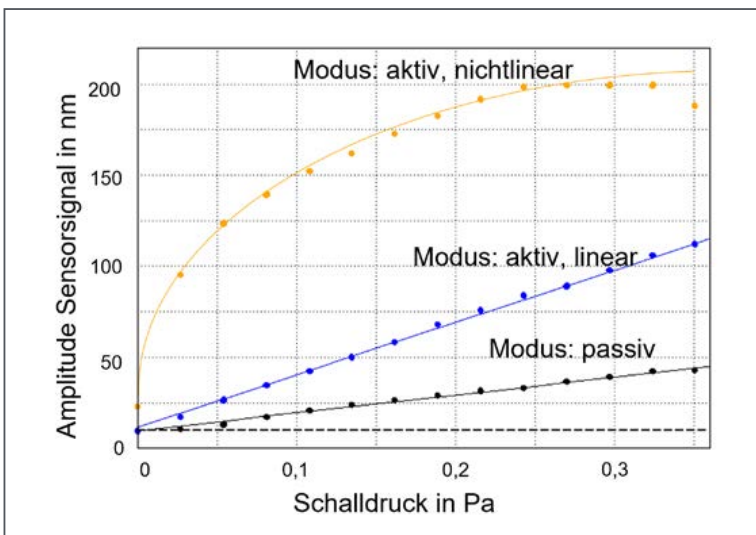
mulationsergebnisse in Abbildung 11 (links) zeigen, sinkt die Empfindlichkeit deutlich mit zunehmendem Abstand der Membran vom Balken bis schließlich eine konstante Empfindlichkeit erreicht wird [30]. Dies ist auf die Verringerung der akustischen Kopplung zurückzuführen, welche durch (thermo-)viskose Grenzschichteffekte in schmalen Durchgängen auftritt. Für die verwendete Frequenz beträgt die Breite der viskosen Grenzschicht, oberhalb derer keine akustische Kopplung mehr vorhanden sein sollte, ca. 28 μm . Wie in Abbildung 11 ersichtlich, sind Membran und Balken für Spaltbreiten $>30 \mu\text{m}$ akustisch entkoppelt, sodass die Empfindlichkeit unabhängig vom Abstand zwischen Membran und Balken wird.

Vergrößert man im akustisch gekoppelten Fall, d. h. für eine Spaltbreite von 15 μm , die Membranfläche, so zeigen die Simulationen (Abbildung 11 (rechts)), dass sich die maximale Auslenkung erhöht [30]. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die vergrößerte Membranfläche zu einem höheren Druckgradienten zwischen Vorder- und Rückseite des Balkens führt, wodurch die Kraftwirkung auf diesen größer wird. Somit kann durch Veränderung der Membranfläche und der Breite des Spalts zwischen Biegebalken und umgebender Membran die Empfindlichkeit des Sensors angepasst werden.

Anpassbare Verstärkung und Bandbreite

Aus Abbildung 12 geht hervor, dass die Biegebalken nicht nur passiv, sondern durch die Rückkopplung des jeweiligen Sensorsignals auch aktiv betrieben werden können. Die Stärke der Rückkopplung lässt sich dabei über den Faktor a einstellen. Neben dem

Abb. 12: Übertragungscharakteristik des Biegebalkens bei unterschiedlichen Betriebsmodi (unterschiedlicher Verstärkungsfaktor a : $a = 0$ (schwarz), $a = 0,5$ (blau), $a = 0,73$ (orange)). Die Linien stellen Näherungen dar und sind als Orientierungshilfe eingefügt. Die gestrichelte schwarze Linie visualisiert das Grundrauschen des Systems, hauptsächlich verursacht durch die Elektronik. Modifiziert von [33].



passiven Modus ($a=0$) können im aktiven Modus ($a>0$) drei verschiedene Arten von Ansprechcharakteristiken beobachtet werden:

1. ein lineares Ansprechverhalten (Abbildung 12, blau),
2. ein nichtlineares Ansprechverhalten (Abbildung 12, orange),
3. ein von der Schallamplitude unabhängiges, selbstoszillierendes Ansprechverhalten (nicht in Abbildung 12 gezeigt).

Das selbstoszillierende Verhalten ist ein Effekt der nichtlinearen Dynamik des Systems und wird hierbei durch eine Hopf-Bifurkation des Systems in Abhängigkeit vom Verstärkungsfaktor a ausgelöst.

Zusätzlich zeigt sich für einen gleichbleibenden SPL, dass – gegenüber dem passiven Betrieb – negative a -Werte zu einer Dämpfung und positive zu einer Verstärkung und einem zunehmend nichtlinearen Verhältnis von Eingangsschalldruck- und Ausgangsspannungspegel führen (Abbildung 13). Im nichtlinearen Bereich reagiert der Sensor auf geringe Schalldrücke empfindlicher als auf große, was der kompressiven Verstärkung ähnelt, die im menschlichen Hörsystem bei der Wahrnehmung von Lautheit, d. h. auf der Verarbeitungsstufe [34], und bei den Haarzellen im Innenohr, d. h. auf der Wandlerstufe, beobachtet wird [26, 35, 36]. Eine nichtlineare Amplitudenkennlinie (Abbildung 12, orange) ist u. a. auch vorteilhaft, um leise und sehr laute Signale bei begrenztem Ausgangsdynamikbereich (signalverarbeitende Elektronik mit begrenztem Dynamikbereich) verarbeiten zu können. Durch eine Kombination aus Verstärkung und Dämpfung, wie in Abbildung 13 sichtbar, folgt ein nutzbarer Spielraum für die Sensorempfindlichkeit von mehr als 25 dB. Durch die Auswahl hoher Verstärkungen für geringe SPL-Werte und hoher Dämpfung für hohe SPL-Werte können die entsprechenden Eigenschaften des menschlichen Gehörs angenähert werden. Schließlich bieten ausgewählte Biegebalkendesigns einen möglichen Anpassungsbereich der Verstärkung von bis zu 44 dB, was mit der zusätzlichen Verstärkung von 40–60 dB durch die Aktivität der äußeren Haarzellen in der Cochlea von Säugetieren vergleichbar ist [25].

Die Adaptabilität der Sensorempfindlichkeit erlaubt gleichzeitig die relative Reduktion des Sensoreigenrauschens und damit ein Herabsetzen des Ersatzgeräuschpegels, also des vom System gerade noch erfassbaren Schalldruckpegels. Der Ersatzgeräuschpegel beträgt bei ausgewählten Sensordesigns im passiven Modus 26–28 dB SPL. Dies ist vergleichbar mit Standard-MEMS-Mikrofonen [37]. Durch den aktiven nichtlinearen Modus kann das Eigenrauschen auf bis zu 18 dB SPL gesenkt werden, was fast dem Niveau der verwendeten Messmikrofone (ca.

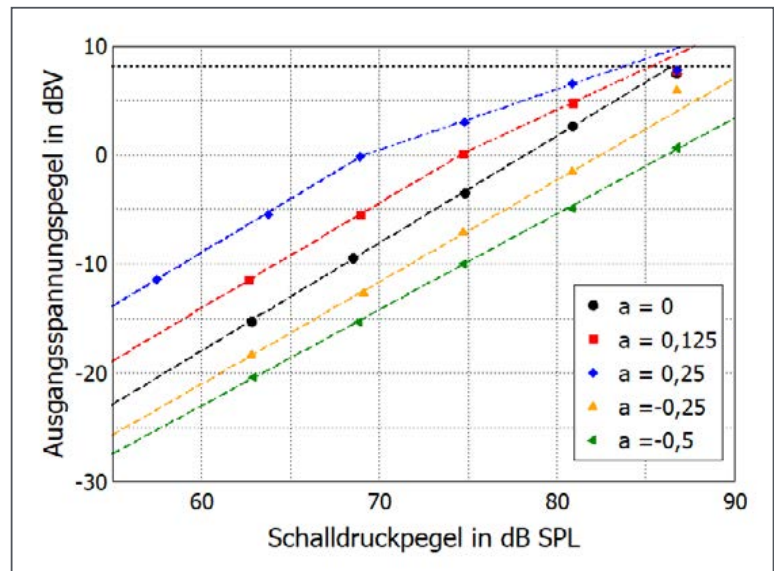
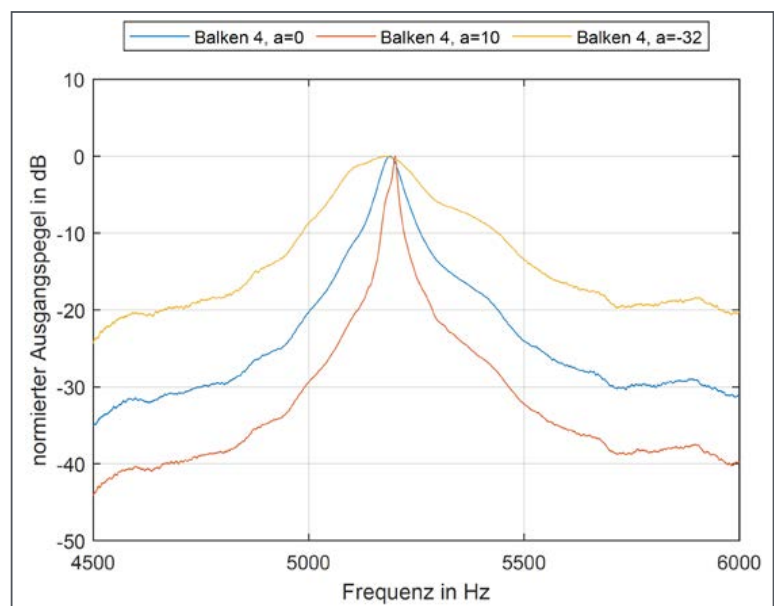


Abb. 13: Veränderung der Amplitudenkennlinie eines Biegebalkens in Abhängigkeit vom Verstärkungsfaktor a . Die gepunktete schwarze Linie kennzeichnet die Clipping-Grenze der aktuellen Elektronik. Hierbei sind die gestrichelten Linien lineare Fits der Daten in dB (Symbole). Während der Anstieg für fast alle Verstärkungsfaktoren nahezu linear ist (Anstieg ca. 0,93 bis 0,98), ist die nichtlineare Charakteristik bei großen Schalldruckpegeln für $a = 0,125$ und $a = 0,25$ deutlich erkennbar (Anstieg ca. 0,76 bzw. 0,56). Für negative Verstärkungsfaktoren sind die Kennlinien leicht nichtlinear (Anstieg 0,88 für $a = -0,5$).

15 dB SPL) entspricht.

Die Veränderung des Verstärkungsfaktors a erlaubt außerdem die Anpassung der Bandbreite des Biegebalkens. Abbildung 14 zeigt anhand des auf 0 dB normierten Ausgangspegels, dass positive Verstärkungsfaktoren zu einer höheren Güte und negative zu einer geringeren Güte und damit erhöhten Bandbreite der

Abb. 14: Die Veränderung der Resonanzbandbreite eines Biegebalkens in Abhängigkeit vom eingestellten Verstärkungsfaktor a im aktiven Betriebsmodus.



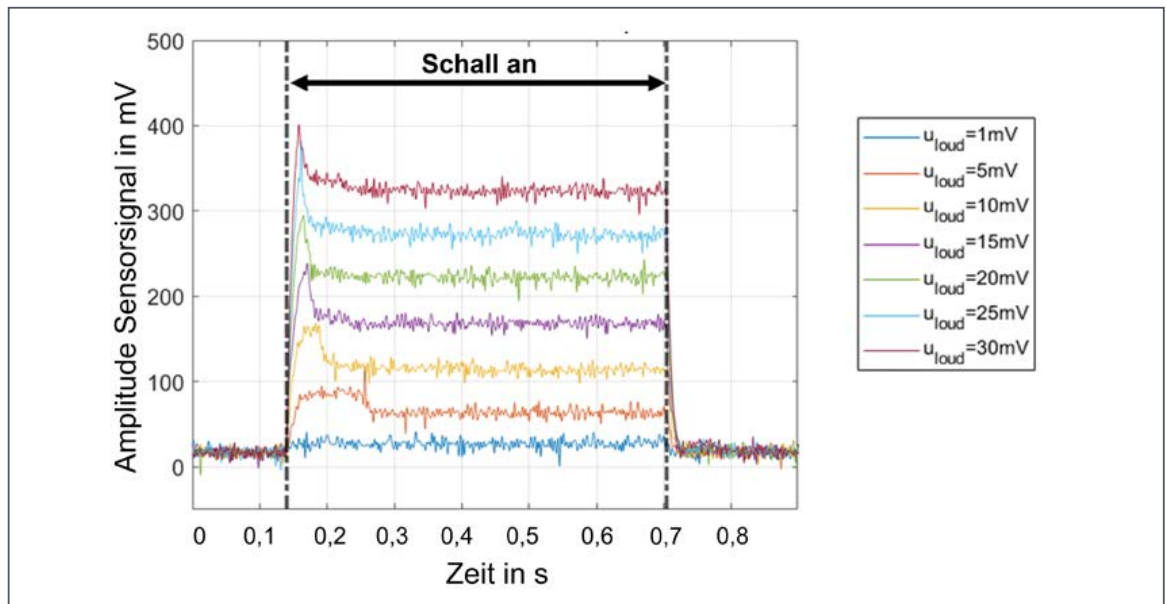


Abb. 15: Adaption des Sensorsignals eines Biegebalkens für Schallanregung mit unterschiedlicher Amplitude (gegeben durch die Spannung des Signalgenerators für den Lautsprecher u_{loud}), aber konstantem Verlauf. Die Adaption wird durch eingangssignalabhängige Änderung des Verstärkungsfaktors a erreicht. In jeder Konstellation wird der Anfang des Schallsignals im generierten Sensorsignal hervorgehoben. Die Hervorhebung variiert aber mit der Schalldruckamplitude. Abbildung von [32].

Sensorcharakteristik gegenüber dem passiven Betrieb führen.

Adaption

Die MEMS-Cochlea setzt die Adaption durch eine automatische Anpassung des Rückkopplungsparameters a in Abhängigkeit von der Amplitude des Schallsignals um. Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse von Messungen der Adaption. Hierbei wurde das Verhalten eines rückgekoppelten Biegebalkens bei unterschiedlichen Schallamplituden, deren Verlauf über den Anregungszeitraum konstant blieb, betrachtet. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass:

- der Anfang des gemessenen Schallsignals im Sensorsignal hervorgehoben wird, was z. B. für Lokalisationsaufgaben hilfreich ist,
- der dynamische Bereich des Sensors vergrößert wird.

Die Dynamikvergrößerung wird dadurch erreicht, dass der Sensor grundsätzlich in einem empfindlichen Bereich betrieben wird (aktiver Betriebsmodus mit $a = 0,6$), um auch geringe Schalldruckpegel und damit den Beginn eines Schallereignisses erfassen zu können. Das Umschalten auf eine niedrigere Empfindlichkeit (passiver Betriebsmodus mit $a = 0,2$) nach der ersten Reaktion führt zu einer angepassten Dynamik bei höheren Schalldruckpegeln. Das Umschaltensignal kann verwendet werden, um entweder eine Datenübertragungseinheit auszulösen, die die Erfassungssignale an ein Verarbeitungssystem sendet oder um eine Verarbeitungseinheit einzuschalten. So wird nur dann,

wenn Schallsignale erkannt werden, die Datenübertragung oder die Klangverarbeitung eingeleitet, was den Stromverbrauch und die Streaming-Anforderungen für Aufgaben wie die Maschinenüberwachung oder Systeme wie Hörgeräte stark reduziert.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Artikels wurde ein neuartiger bioinspirierter, smarter akustischer Sensor – die MEMS-Cochlea – vorgestellt. Diese bietet weitgehend abstimmbare und adaptive Sensoreigenschaften (Empfindlichkeit, Bandbreite, lineare/nichtlineare Übertragungscharakteristik) und integriert typische, sonst auf Signalverarbeitungssysteme ausgelagerte Schritte wie eine Frequenzzerlegung (durch Nutzung eines multifrequenten Resonator-Arrays aus rückgekoppelten Biegebalken) und eine nichtlineare, kompressive Verstärkung direkt auf Sensorebene. Die Stärke der integrierten Rückkopplung des Sensorsignals steuert die Linearität der Übertragungseigenschaften sowie die Empfindlichkeit und die Filtereigenschaften durch Veränderung des Gütefaktors und Ausnutzung der nichtlinearen Dynamik des Systems. Diese Eigenschaften können adaptiv gesteuert werden, um einerseits den Dynamikbereich optimal an Schallsituationen anzupassen und andererseits eine ereignisbasierte Schallerfassung sowie die Puls-basierte Kodierung von Schalleigenschaften zu implementieren.

Im Vergleich zu bekannten bioinspirierten akustischen Sensorsystemen wie bioinspirierten akusti-

schen Sensoren mit integrierter Signalverarbeitung und Adaptionseigenschaften [38–41] oder Silizium- und FPGA-Cochlea [42–52] bietet die MEMS-Cochlea folgende vier Hauptvorteile:

- Variation der Empfindlichkeit (bis zu 44 dB) durch aktiven Betrieb,
- schnelle (wenige μ s) und effiziente Rückkopplungs- und Adaptionsmechanismen (wenige Bauelemente notwendig),
- Sensorherstellung auf der Grundlage von Standard-CMOS-Prozessen und
- eine hohe Robustheit gegenüber Bauteiltoleranzen aufgrund der großen Betriebsbereiche für die Rückkopplungsparameter.

Darüber hinaus ist die adaptive Schallerfassung des hier vorgestellten Systems besonders hilfreich unter verrauschten Bedingungen und/oder Situationen mit mehreren Schallquellen, die für aktuelle technische Schallverarbeitungssysteme, basierend auf herkömmlicher Mikrofontechnik, immer noch eine Herausforderung darstellen. Die adaptiven Eigenschaften der MEMS-Cochlea erlauben es, umfangreiche Algorithmen zur Rauschunterdrückung und ereignisbasierten Schallaufnahme zu vermeiden. Bei ungünstigen Signal-Rausch-Verhältnissen kann die Empfindlichkeit eines jeden Biegebalkens jeweils mit Hilfe des aktiven Betriebsmodus erhöht werden, während bei hohen Schalldruckpegeln die Empfindlichkeit (mit Hilfe des linearen oder auch aktiv dämpfenden Modus) reduzierbar ist, um ein Übersteuern des Sensorsignals zu vermeiden. Durch die einzeln abstimmbaren Eigenschaften eines jeden Balkens lassen sich auch unterschiedliche Frequenzbereiche zur gleichen Zeit optimal erfassen. Zudem wird der Eingangsdynamikbereich direkt auf Sensorebene komprimiert, wodurch mögliche Einschränkungen des Dynamikbereichs der Folgeelektronik umgangen werden. Beide Aspekte sind in der herkömmlichen Mikrofontechnik kaum möglich.

Die oben beschriebenen Eigenschaften machen die MEMS-Cochlea zu einer vielversprechenden Alternative zur aktuell noch vorherrschenden Kombination der herkömmlichen Mikrofonaufnahme mit anschließender Signalverarbeitung als Eingangsstufe für Schallverarbeitungssysteme.

Danksagung

Das Autorenteam dankt:

- Frau Evelin Baumer und Herrn Prof. Detlef Krahé/Redaktion des Akustik-Journals der DEGA für die hervorragende Zusammenarbeit

Diese Arbeiten wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 434434223 – SFB 1461, die Carl-Zeiss-Stiftung Projekt „Memristive Materials for Neuromorphic En-

gineering (MemWerk)‘ und das Leistungszentrum InSignA im Rahmen des iHub ElevatorPitch 2022 gefördert.

Literatur

- [1] Saichand, G.; Grollmisch, S.; Abeßer, J.; Liebetrau, J.: Potentials and Challenges of AI-Based Audio Analysis in Industrial Sound Analysis. Fortschritte der Akustik – DAGA 2022, 48. Jahrestagung für Akustik, pp. 94–97, 2022.
- [2] Schafer, P. B.; Jin, D. Z.: Noise-robust speech recognition through auditory feature detection and spike sequence decoding. *Neural Comput.* 26, pp. 523–556, 2014.
- [3] Barker, J.; Vincent, E.; Ma, N.; Christensen, H.; Green, P.: The pascal chime speech separation and recognition challenge. *Computer Speech & Language* 27, pp. 621–633, 2013.
- [4] Zai, A. T.; Bhargava, S.; Mesgarani, N.; Liu, S.-C.: Reconstruction of audio waveforms from spike trains of artificial cochlea models. *Front. Neurosci.* 9, p. 347, 2015.
- [5] Johnson, D.S.; Grollmisch, S.: Techniques Improving the Robustness of Deep Learning Models for Industrial Sound Analysis. 2020 28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), pp. 81–85, 2020.
- [6] Hudspeth, A. J.: Integrating the active process of hair cells with cochlear function. *Nat. Rev. Neurosci.* 15, pp. 600–614, 2014.
- [7] Kandel, E. R.; Schwartz, J. H.; Jessell, T. M. (eds.): *Principles of Neural Science* (Elsevier, New York, 2000), fourth edn.
- [8] Robles, L.; Ruggero, M. A.: Mechanics of the mammalian cochlea. *Physiol. Rev.* 81, pp. 1305–1352, 2001.
- [9] Holmberg, M.; Hemmert, W.: An auditory model for coding speech into nerve-action potentials. *Proc Joint Congr CFA DAGA* 4, pp. 773–774, 2004.
- [10] Reichenbach, T.; Hudspeth, A. J.: The physics of hearing: fluid mechanics and the active process of the inner ear. *Rep. Prog. Phys.* 77, 076601, 2014.
- [11] Guinan Jr, J. J.: Olivocochlear efferents: Their action, effects, measurement and uses, and the impact of the new conception of cochlear mechanical responses. *Hear. Res.* 362, pp. 38–47, 2018.
- [12] Sivian, L. J.; White, S. D.: On minimum audible sound fields. *J. Acoust. Soc. Am.* 4, pp. 288–321, 1933.
- [13] Sasmal, A.; Grosh, K.: The competition between the noise and shear motion sensitivity of cochlear inner hair cell stereocilia. *Biophysical Journal* 114, pp. 474–483, 2018.
- [14] Ashmore, J. et al.: The remarkable cochlear amplifier. *Hear. Res.* 266, pp. 1–17, 2010. Special Issue: Annual Reviews 2010.
- [15] Peng, A. W.; Ricci, A. J.: Somatic motility and hair bundle mechanics, are both necessary for cochlear amplification? *Hear. Res.* 273, pp. 109–122, 2011.
- [16] Schafer, P. B.; Jin, D. Z.: A novel concept for dynamic adjustment of auditory space. *Sci. Rep.* 8, 8335, 2018.
- [17] Milewski, A. R.; Ó Maoiléidigh, D.; Salvi, J. D.; Hudspeth, A. J.: Homeostatic enhancement of sensory transduction. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 114, E6794–E6803, 2017.
- [18] Fettiplace, R.: Hair Cell Transduction, Tuning, and Synaptic Transmission in the Mammalian Cochlea. *Compr. Physiol.* 7(4), pp. 1197–1227, 2017.
- [19] Knudsen, E. I.; Konishi, M.: Mechanisms of sound localization in the barn owl (*tyto alba*). *J. Comp. Physiol.* 133, pp. 13–21, 1979.
- [20] Wang, H.; Gelbart, D.; Hirsch, H.-G.; Hemmert, W.: The Value of Auditory Offset Adaptation and Appropriate Acoustic Modeling. 9th Annual Conference of the International Speech Communication Association (Interspeech 2008), pp. 902–905, 2008.
- [21] Hemmert, W.; Wang, H.: Offset adaptation in the inner hair cell synapses is important for speech coding. *Front. Syst.*

Dr. Claudia Lenk
Technische Universität
Ilmenau

Dr.-Ing. Daniel Beer
Fraunhofer Institute for
Digital Media Techno-
logy IDMT, Ilmenau

**M. Sc. Andreas
Männchen**
Fraunhofer Institute for
Digital Media Techno-
logy IDMT, Ilmenau

B. Sc. Jan Küller
Fraunhofer Institute for
Digital Media Techno-
logy IDMT, Ilmenau

M. Sc. Kalpan Ved
Technische Universität
Ilmenau

**M. Sc. Steve
Durstewitz**
Technische Universität
Ilmenau

M. Sc. Vishal Gubbi
Technische Universität
Ilmenau

Dr. Tzvetan Ivanov
Technische Universität
Ilmenau

**Prof. Dr. Martin
Ziegler**
Technische Universität
Ilmenau

- Neurosci. Conference Abstract: Computational and systems neuroscience 2009.
- [22] Rudnicki, M.; Schoppe, O.; Isik, M. et al: Modeling auditory coding: from sound to spikes. *Cell Tissue Res* 361, pp. 159–175, 2015.
 - [23] Araujo, F. A. et al.: Role of non-linear data processing on speech recognition task in the framework of reservoir computing. *Sci. Rep.* 10, pp. 1–11, 2020.
 - [24] Baby, D.; Verhulst, S.: Biologically-inspired features improve the generalizability of neural network-based speech enhancement systems. 19th Annual Conference of the International-Speech-Communication-Association (Inter-speech 2018), pp. 3 264–3 268, 2018.
 - [25] Lenk, C.; Hövel, P.; Ved, K. et al.: Neuromorphic acoustic sensing using an adaptive microelectromechanical cochlea with integrated feedback. *Nat. Electron.*, 2023.
 - [26] Smith, L. S.: Toward a neuromorphic microphone. *Front. Neurosci.* 9, p. 398, 2015.
 - [27] Rangelow, I. W. et al.: Review article: Active scanning probes: A versatile toolkit for fast imaging and emerging nanofabrication. *J. Vac. Sci. Technol. B* 35, 06G101, 2017.
 - [28] Ivanov, T.: Piezoresistive cantilevers with an integrated bi-morph actuator. Thesis urn:nbn:de:hebis:34-1153, 2003.
 - [29] Lenk, C. et al.: Bio-inspired, nonlinear and adaptive acoustic sensing – Study of sensor design. *Fortschritte der Akustik – DAGA 2022*, 48. Jahrestagung für Akustik, pp. 393–396, 2022.
 - [30] Khan, E. et al.: Influence of sensor design on bio-inspired, adaptive acoustic sensing. *Fortschritte der Akustik – DAGA 2023*, 49. Jahrestagung für Akustik, pp. 415–418, 2023.
 - [31] Lenk, C.; Seeber, L.; Ziegler, M.; Hövel, P.; Gutschmidt, S.: Enabling adaptive and enhanced acoustic sensing using nonlinear dynamics. In 2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 1–4 (IEEE, 2020).
 - [32] Durstewitz, S.; Lenk, C.; Ziegler, M.: Bio-inspired acoustic sensor with gain adaptation enhancing dynamic range and onset detection. In 2022 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 10, 2022.
 - [33] Lenk, C. et al.: Dynamically adaptable acoustic sensor with nonlinear filtering functionality. In *MNE2021 – 47th international conference on Micro and Nano Engineering*. 2021.
 - [34] Jesteadt, W.; Wier, C. C.; Green, D. M.: Intensity discrimination as a function of frequency and sensation level. *J. Acoust. Soc. Am.* 61, pp. 169–177, 1976.
 - [35] Hudspeth, A. J.: Making an effort to listen: mechanical amplification in the ear. *Neuron* 59, pp. 530–545, 2008.
 - [36] Hudspeth, A. J.; Choe, Y.; Mehta, A. D.; Martin, P.: Putting ion channels to work: Mechano-electrical transduction, adaptation, and amplification by hair cells. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 97, pp. 11 765–11 772, 2000.
 - [37] Zawawi, S. A.; Hamzah, A. A.; Majlis, B. Y.; Mohd-Yasin, F.: A review of MEMS capacitive microphones. *Micromachines* 11, p. 484, 2020.
 - [38] Koickal, T. J. et al: Design of a spike event coded rgt microphone for neuromorphic auditory systems. In 2011 IEEE International Symposium of Circuits and Systems (ISCAS), pp. 2 465–2 468 (IEEE, 2011).
 - [39] Tsuji, T.; Nakayama, A.; Yamazaki, H.; Kawano, S.: Artificial cochlear sensory epithelium with functions of outer hair cells mimicked using feedback electrical stimuli. *Micromachines* 9, p. 273, 2018.
 - [40] Yamazaki, H.; Yamanaka, D.; Kawano, S.: A preliminary prototype high-speed feedback control of an artificial cochlear sensory epithelium mimicking function of outer hair cells. *Micromachines* 11, p. 644, 2020.
 - [41] Guerreiro, J. et al.: Enhancing Acoustic Sensory Responsiveness by Exploiting Bio-inspired Feedback Computation. In *ICASSP (2019)*.
 - [42] Wang, S.; Koickal, T. J.; Hamilton, A.; Cheung, R.; Smith, L. S.: A bio-realistic analog CMOS cochlea filter with high tunability and ultra-steep roll-off. *IEEE Trans. on Biomed. Circ. and Syst.* 9, pp. 297–311, 2015.
 - [43] van Schaik, A.; Liu, S.-C.: AER EAR: a matched silicon cochlea pair with address event representation interface. In 2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems 5, pp. 4 213–4 216, 2005.
 - [44] J-Fernandez, A. et al.: A binaural neuromorphic auditory sensor for FPGA: A spike signal processing approach. *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.* 28, pp. 804–818, 2017.
 - [45] Liu, S.-C.; van Schaik, A.; Minch, B. A.; Delbruck, T.: Asynchronous binaural spatial audition sensor with 2x64x4 channel output. *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.* 8, pp. 453–464, 2013.
 - [46] Yang, M.; Chien, C.-H.; Delbruck, T.; Liu, S.-C.: A 0.5 V 55 μ W 64x2-channel binaural silicon cochlea for event-driven stereo-audio sensing. In 2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), pp. 388–389, 2016.
 - [47] Hamilton, T. J.; Tapson, J.; Jin, C.; Van Schaik, A.: Analogue VLSI implementations of two dimensional, nonlinear, active cochlea models. In 2008 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference, pp. 153–156 (IEEE, 2008).
 - [48] Thakur, C. S.; Hamilton, T. J.; Tapson, J.; van Schaik, A.; Lyon, R. F.: FPGA implementation of the CAR model of the cochlea. In 2014 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), pp. 1 853–1 856, 2014.
 - [49] Thakur, C. S. et al.: Sound stream segregation: a neuromorphic approach to solve the „cocktail party problem“ in real-time. *Front. Neurosci.* 9, p. 309, 2015.
 - [50] Xu, Y. et al: A FPGA implementation of the CAR-FAC cochlear model. *Front. Neurosci.* 12, 2018.
 - [51] Singh, R. K. et al.: CAR-Lite: A multi-rate cochlear model on FPGA for spike-based sound encoding. *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Regul. Pap.* 66, pp. 1 805–1 817, 2019.
 - [52] Nouri, M. et al.: A Hopf resonator for 2-D artificial cochlea: Piecewise linear model and digital implementation. *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Regul. Pap.* 62, pp. 1 117–1 125, 2015. ■

Physiological Acoustics

How nature makes sense of sound

Bastian Epp

The sense of hearing plays an important role in our everyday life. Hearing impairment is a big and ever-growing global problem – with severe personal and socio-economic consequences. Various technologies have been developed to improve hearing for listeners suffering from a hearing loss. But their performance still falls short relative to healthy hearing, especially in the presence of multiple sound sources. How comes? Decades of research continuously improved our understanding of the sense of hearing. But more and more model-based approaches fail to provide the pre-

dicted benefit. Physiological acoustics approaches this challenge with a focus on physiological boundary conditions. The goal is to identify the mechanism utilized by nature to solve this problem. The physiology of the hearing system is outlined and the inclusion of the ubiquitous physical phenomenon of entrainment into models of hearing is discussed. This, from currently established models, deviating approach might remove some of the limitations of current models and might open up for a broad variety of applications in health science and audio technology.

The facets of hearing

Physiological acoustics and relevance of hearing research

The sense of hearing is key to communicate by means of sound. Pressure variations in air and matter inform about the presence of predators, sources of food, and transmit the beauty of a voice and music. Nature developed unique sensor- and information processing devices built on the principles of physics and maximizing performance within the limitations of biology. The relevance of hearing becomes salient when hearing is impaired or lost. Normal hearing listeners can easily separate a moving car and music from the voice of the person they are talking to. Hearing im-

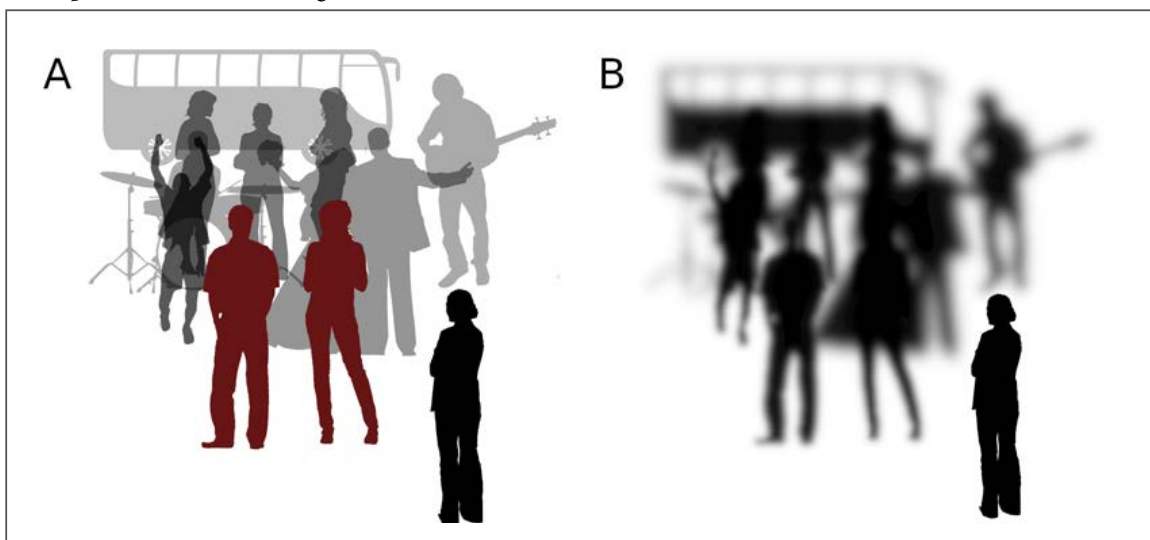
paired listeners lose this ability to a certain extent and perceive a more “blurred” acoustic image of the environment (figure 1). This challenge is often referred to as the “cocktail party problem” – more focused on the communication than the cocktails.

Hearing loss has also implications that lead to social isolation and cognitive decline [1]. Hence, it is not only an individual challenge, but a challenge for our global society in a world with increasing noise exposure caused by ships, cars, buildings, and lifestyle. The World Health Organization (WHO) projects that 2.5 billion people will have some degree of hearing loss, and that 10 % of the human population will have a disabling hearing loss that will exclude them

Fig. 1: A visual analogue of a complex acoustic scene with a number of simultaneously active sound sources.

A) A normal hearing listener can separate the sound sources into a relevant sound to attend to (red) and a background (grey).

B) A listener with hearing impairment cannot separate sound sources and will perceive a “blurry” sound image where it is impossible to attend to a single source.

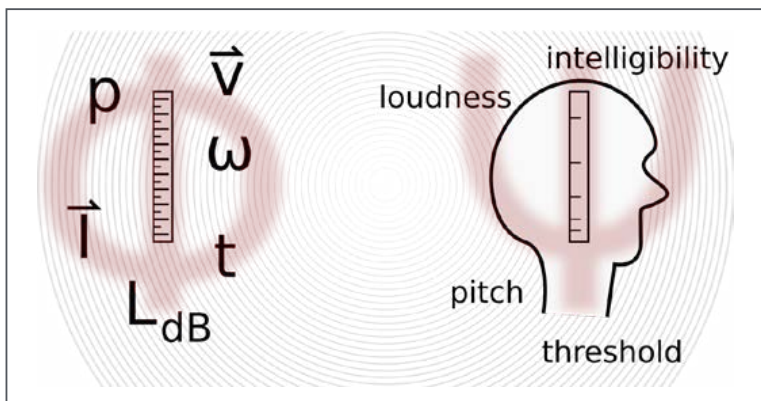


from social interaction [2]. This is still a relevant problem to solve!

A lot of progress has been made in the field of hearing during the last decades – and the field has spread out and incorporated even more disciplines. Descriptions of the processing of sound by using engineering techniques have led to numerous models of hearing. They provide a basis for the development of hearing assistive technology like hearing aids and cochlear implants. However, these devices cannot enable listeners to perceive the same “sharp” acoustic image of the environment, and too many people still suffer from hearing impairment, despite technological development.

The field of “physiological acoustics” can be regarded at as the approach to solve the “cocktail party problem” by mapping principles from physics onto the function and natural limitations of biology. It benefits from other approaches applying various levels of detail. These include, among others, psychoacoustics that maps sound directly to perception in a “black box approach”, physiology that investigates the biological function of the organism, and from the mathematical description of sound used in acoustic signal processing. The goal of physiological acoustics is to map, describe and mimic how nature processes sound in the biological system of hearing. This will help to identify the key mechanisms and key phenomena that can be used to implement solutions and to restore hearing as much as possible using audio-, neural-, and biotechnology. Building solutions on the same principles used by nature will have implications not only for the health sector, but also improve everyday communication, improve virtual reality and significantly reduce the resources required to process sound. In short – a modern discipline within acoustics!

Fig. 2: Psychoacoustics projects the physical metrics used to describe a sound field (pressure, intensity, frequency, ...) onto perceptual quantities (loudness, pitch, ...). Perceptual measures are usually influenced by various physical parameters. Hence, perception can be considered to be a projection of one multidimensional (physical) space into another (psychometrical) space. Fundamental in psychoacoustics is that the “system as a whole” is evaluated.



Psychoacoustics and acoustic signal processing – here be dragons

A corner stone in hearing research is psychoacoustics, e.g. [3]. Psychoacoustics can be considered a chimera of psychology and physics – or psychometrics and metrology. It investigates the effect of a sound (a stimulus) on perception (figure 2). This is particularly important because it evaluates the “system as a whole” by correlating a physical measure with a behavioural measure.

One prominent example is sound pressure level. Sound pressure level is related to the physical energy in the stimulus. In hearing, the information in the stimulus is processed by the whole hearing system and finally evaluated by the listener by answering the question “How loud is that signal”? Sound pressure level is, however, not the only relevant parameter for loudness. Loudness changes as a function of frequency, bandwidth, temporal properties, and even context. Hence, multiple physical dimensions need to be mapped onto perceptual dimensions – and this requires careful experimental design and control of the physical parameters of the stimulus. And even though various prediction models of loudness exist [4, 5], it is, especially in realistic environments, still not possible to reliably predict the perception of loudness (see, e.g. [6] for a review). A relevant task for everything from office rooms to the noise generated by sustainable energy sources.

Here, acoustic signal processing plays an important role. It is a mathematical method to describe, analyse, and manipulate sound signals. The precise manipulation of a specific stimulus property allows to investigate the correlation of this sound property with perception.

There are numerous suggestions for where and how certain psychoacoustically measured effects are processed in the physiological system. Ultimately, all these ideas are based on some postulated function or a correlation between the activity of single neurons, or groups of neurons, and the behavioural measure. The first challenging aspect of this approach is that psychoacoustics always evaluates the system as a whole – while physiological studies focus on individual elements of the highly interconnected system. Hence, given the high number of neurons in the auditory system, one cannot be sure that the response of a single neuron in a complex system is relevant. The second point to consider is that acoustic signal processing is completely free of any biological boundary conditions. While mathematical elegance can be attractive to describe hearing, it is challenging to correlate it with physiology. So far, no evidence for complex numbers in the brain was found – but it is a useful concept to describe sound signals.

Despite all these pitfalls serves psychoacoustics as the ultimate test of any technological development within hearing science. A hearing impairment compensation technique is only successful if it restores the desired aspects of perception. And even solutions that are far from physiologically plausible, like recent developments within deep neural networks, will serve a purpose. But it is important to remember that this will not necessarily identify the way by which the hearing system is implemented by nature.

Human auditory anatomy and physiology in a nutshell – the snail in your head

To better appreciate the complexity of the hearing system, a view into physiology is instructive. The physiology of the human hearing system, commonly referred to as human auditory physiology, is rather unique in that it spans a broad variety of domains. From a structural point of view, it contains visible elements like the pinna and the ear canal (figure 3).

The small bones in the middle ear link air-borne sound to structure-borne sound. From there, the sound energy is transferred into the fluid-filled structure in the inner ear containing the snail-shaped structure of the cochlea. Within the cochlea, specialized cells translate the mechanical vibration into a neural signal. From here on and towards the brain, the signals are passed on to a wide network of groups of interconnected neurons (nuclei). These nuclei are not only connected towards the direction of the auditory cortex, but also communicate “backwards” to earlier stages of processing, all the way down to the inner and middle ear where they affect the activity of hair cells and the mechanical impedance of the middle ear. Physiological acoustics targets all these parts of the auditory system. In the following, we will focus on sound processing of the mechanical parts of the system and its special role as a bottleneck of information.

Sound processing already starts at the pinna where the incoming wave is reflected at the complex surface before funneling the sound wave into the ear canal. In the spectral domain, this can be observed as a shaping of the spectrum which depends on the angle of incident. Hence, this filtering process already provides information about the location of the sound source before even entering the ear canal. This information is individually different – this means that it is hard to “hear with the ears” of others. But with some training, the auditory system can even adjust to such a modification [7].

The middle ear connects the ear canal through the tympanic membrane to the inner ear through the oval window. The arrangement of the bones and the size of the membrane surfaces allows to maximize the energy transfer between the two media, liquid and

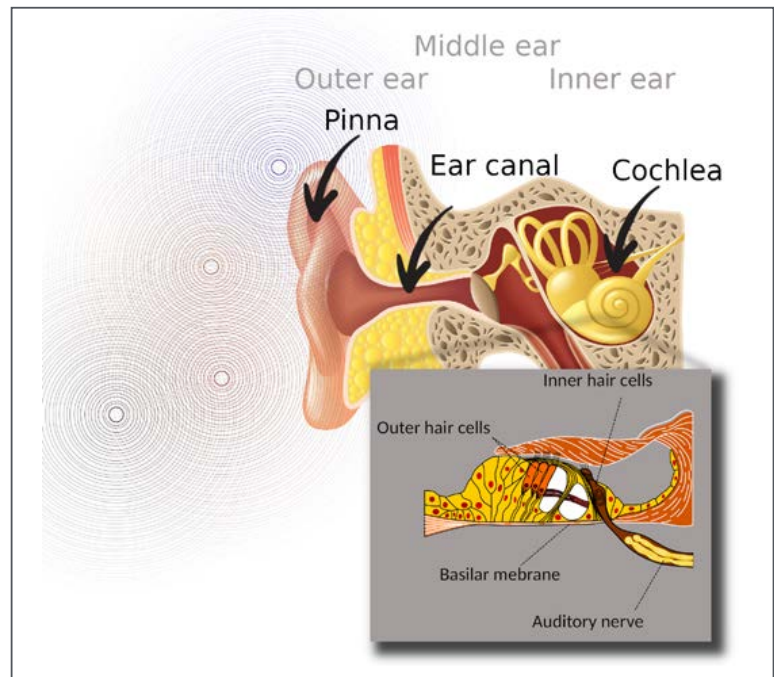


Fig. 3: Anatomy of the outer-, middle-, and inner ear. A mixture of sound waves enters the ear canal and is spectrally formed by the pinna. The vibrations in air excite the middle ear which excites an oscillation in the inner ear, the cochlea. Along the length of the cochlea, the organ of Corti is located with an arrangement of three rows of outer hair cells (OHC) and one row of inner hair cells (IHC). Action potentials generated through mechano-electric transduction are passed on through the auditory nerve to the brain. (Organ of Corti modified from <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6888273> by “Madhero88 – Own work”, CC BY-SA 3.0,)

air with heavily differing densities and therefore impedance. High efficiency in the energy transfer from air to fluid is desirable to maximize the sensitivity to detect sounds. Humans can detect everything from a small needle falling to the ground (approximately 20 μ Pa of pressure amplitude) up to the sound of a jumbo jet at take-off (over 20 Pa of pressure amplitude). For high sound intensities it might be detrimental to transfer too much energy into the middle ear. A too high energy influx can damage inner ear structures. To avoid this, the hearing system can actively change the properties of the middle ear in the case of too high energy influx by contracting a small muscle. This stiffens the mechanical chain in the middle ear, reduces transmission and increases reflection.

The inner ear consists of a system of three fluid-filled chambers. One chamber is separated from the other two by a membrane which changes in width and mechanical properties along the length. In a simplified view, this fluid-embedded membrane has a gradually changing impedance and hence displays a frequency-dependent response to the incoming sound. This means, that when the stimulus is a pure tone, the maximum vibration will change when changing the frequency of the tone. In a first approximation, the

inner ear can hence be viewed as a mechanical frequency analyzer. The vibration of the basilar membrane is often referred to as the “macromechanics” of the inner ear. The gradual change in the mechanical properties of the inner ear is implemented such that the transmission is maximally efficient [8] and that the overall pattern evoked by a tone in the inner ear looks approximately the same, but is only translated along the length of the inner ear [9]. Nature solved a complex optimization problem.

The key to performance and the genius of the inner ear lies in the “micromechanics”. A closer look at one location of the basilar membrane (figure 3) reveals a unique arrangement of specialized cells. This arrangement is called the “organ of Corti”. In simplified terms, the organ of Corti is displaced by the vibration of the basilar membrane. Functionally, it transforms this vibration into a complex mechanical interaction, finally leading to the generation of electrical signals, so-called action potentials, by the inner hair cells (IHC). These action potentials with the relevant information about the sound are then passed on to the attached auditory nerve. There are some key elements in that process. A main contributor lies in the group of outer hair cells. These unique cells have the ability to change their length and hence act as active devices – this means that they are moving while you hear a sound. Contraction and elongation of the cell body optimizes the generation of action potentials and thereby improves not only the sensitivity, but also the selectivity of the hearing system. Hence, the inner ear is an active sensor with outer hair cells actively pushing and pulling on the basilar membrane – with the correct timing to optimize processing by the inner hair cells. Another element is that the chambers separated by the basilar membrane show a voltage gradient. This “physiological battery” provides the energy source for the mobility of the outer hair cells (OHC). A very efficient, but also fragile construction.

Yet another property that makes the inner ear both attractive and complex is the fact that its processing properties change with input level. This means that the system is highly nonlinear! At high input levels, the response is highly dominated by the passive mechanical parameters. At low input levels, the system is able to provide an effective gain of up to 50 dB! At these low input levels, the excitation on the basilar membrane is very narrow while it broadens towards higher input levels. In case when damaged, the inner ear loses the ability to amplify and acts purely linear. This is a good example of an efficient and elegant solution where low intensity sounds are heavily amplified, while sounds with high intensity are processed passively – or even attenuated with the help of the middle ear.

The inner ear – how special is it?

The way in – the function of mechano-electric transduction

The most relevant task of the inner ear is to transmit information towards the brain. From a mathematical point of view, a sound signal is a one-dimensional source of information. The task of the inner ear is therefore to transduce, preprocess and preserve all the relevant information in that signal. This is implemented by a combination of the mechanical place-frequency mapping, active amplification and distribution of the mechano-electrical transducers along the whole length of the inner ear. Mechano-electrical transduction is done by inner hair cells of which there exist around 3 000 in the human inner ear. Each hair cell is connected to around 10 nerve fibers that transmit the generated electrical action potentials to the brain. This means that the one-dimensional sound signal is transformed into a set of about 30 000 channels of neural information! The task of the interconnected nuclei following the inner ear is then to further process this information, finally leading to the perception of sound we know.

Computational models help to conceptualize this complex process. Such numerical models are successful in accounting for a variety of measurable phenomena and found application in numerous technological applications like, for example, the development of the “MPEG2 – audio layer III” codec (MP3). Depending on their focus, different assumptions need to be made. The key focus of most models is place-frequency mapping. The concept is as elegant as it is simple: Consider one place on the inner ear. Determined by the mechanical properties, this place will show maximum amplitude for a specific frequency when a pure tone is played. The amplitude will be lower when the frequency of the tone is either increased or lowered. Based on this, one can define a “frequency response” of this place and formulate this in mathematical terms as a “transfer function” in the frequency domain. Doing this for a variety of places leads to a collection of filters – a filter bank. Each of the filters can be considered an independent “channel” which can be further processed and manipulated.

Problem solved? Not quite. These models are successful, but they imply a large number of assumptions – many of which are mathematically convenient, but physiologically implausible or questionable in the light of more recent data. One critical assumption is that the response to a complex sound can be derived from the mapping established by presentation of pure tones. This means that one assumes that a sound that consists of multiple tones will evoke an oscillation in the inner ear that looks like the superposition of the oscillations of each of the tones in isolation. These

(linear) models exclude phenomena where the oscillation evoked by one tone can be influenced by the oscillation by another tone, often referred to as “suppression”. More elaborate models exist that account for some of these aspects of the nonlinearity of the inner ear. They compensate for some of the shortcomings of linear models on cost of increased number of parameters. The second critical assumption is that humans’ ears are very similar to chinchillas and guinea pigs. Most data exist from animal models like guinea pigs and mice – while hardly any observations of human inner ear mechanics have been made since the efforts of Georg van Békésy in the late 1960’s. Maybe with the current approaches, we are effectively trying to restore hearing of a beast that is a mixture of guinea pig, mouse, cat, and human.

The way out – otoacoustic emissions

Usually, the ear is considered a “microphone” in the sense that it receives a sound signal and transforms it into an electrical signal. The ear of many mammals and non-mammalian species (even insects!) do not only receive sound, but also emit sound! Placing a microphone into the ear canal of a human listener will, with a probability of over 70 %, allows recording a sound signal that reminds of the sound of a vacuum cleaner, e.g. [10]. These sound signals are generated in the inner ear and are often referred to as “spontaneous otoacoustic emissions (SOAE)”. The amplitude spectrum of SOAEs reveals narrow distributions of energy across a broad frequency range. Why are they there? And where do they come from? Taking into consideration that the inner ear is active and highly tuned might provide a hint. The presence of an SOAE in the ear canal dictates, based on reciprocity, that there needs to be an oscillation in the inner ear – which energy travels through the middle ear into the ear canal where it can be recorded. And the elements of nonlinearity and an active source (which are required for the high sensitivity) make it plausible that such a system can enter a self-sustained oscillation – either by noise excitation or by entering an intrinsic limit-cycle oscillation as often observed in complex dynamical systems.

Otoacoustic emissions (OAEs) are considered an artifact and non-informative regarding the function of hearing. But even though often considered an artifact, OAEs provide a window into the function of the inner ear. They can serve as a “remote sensing” method where sound is sent into the system and the reflected sound is analyzed to derive properties of the system. This is analogue to electromagnetic devices like radar or lidar. OAEs are today used in standard newborn screening, audiological diagnostics and even considered for technological application to act as the “acous-

tic fingerprint” of an individual.

Current models of hearing struggle to account for the increasing body of data reaching the field of hearing from various directions – and most of them neglect the presence of OAEs. The intrinsic and often implicit assumptions and simplifications made by the models can be a reason for the relative stagnation in the ability to restore hearing for hearing-impaired listeners. Perhaps, the field of physiological acoustics can contribute to the process of evaluating the assumptions and implications of the last decades of hearing research considering the increasing body of physiological insights.

The balance between elegance and complexity

Appreciating the sense and the physiology of hearing in all its complexity highlights the necessity to continuously consider which conclusions can be drawn. The evidence derived from a given experiment can never be stronger than the method applied. Obviously, assumptions need to be made based on the currently available data. When interested in the physiology of hearing, the field of physiological acoustics needs to balance between the elegance and the complexity of a method. An elegant method can allow for precise predictions of individual parts of the system. Describing the place-frequency mapping in the cochlea with a transfer function is elegant because it allows for efficient processing of arbitrary signals efficiently. On the other hand, a complex method might be a more precise description of the system including various phenomena. Describing the cochlea as a 3-dimensional system with air-fluid-structure coupling might be precise within the boundaries of known parameters but is hard to handle and interpret.

Physiological acoustics contribute to test many of the important conclusions drawn from the last decades of hearing research. Recent approaches were successful to link physiological and psychoacoustical data using models that allow to account for OAE data, provide reasonable control of the mechanics in the inner ear, provide plausible neural response patterns, and even allow to predict non-invasive electrophysiological responses in human listeners [11, 12]. While still simplified and based on assumptions such an approach can provide direct testable predictions across fields and species. The price to pay is computational complexity and the requirement to estimate unknown physiological parameters.

Going one step further – are there “first principles of hearing”?

There is broad consensus that a key element in healthy hearing is the ability to amplify weak sounds. Overexposure to noise, ototoxic drugs or genetic defects

affecting the integrity of the OHC motility leads to a reduction in amplification and hence a hearing impairment. One of the still most relevant questions is: *Which physical principles are used by the auditory system?*

And, in the light of an evolutionary argument assuming optimization and natural selection:

Are there any “basic” principles that are used in all physiological information processing systems?

A promising path can be found in the field of nonlinear dynamical systems. Efforts to model the behaviour of bullfrog hair cell motility lead insightful experiments that link knowledge from physics to the key element in physiological sound processing. A basic element in this approach is to describe a system (the hair cell in this case) in a way to allow for various patterns of behaviour. Depending on the imposed parameters, such nonlinear dynamical systems can behave like a damped oscillator (like a mass-spring-damper system or a linear filter), oscillate in a non-harmonic way (like a mass-spring-damper system with amplitude-dependent parameters or a non-linear filter), or even oscillate spontaneously [13].

What justifies the increase in complexity relative to linear formulations using transfer functions? Both descriptions can account for certain aspects of tuning, compression and frequency selectivity. But only a description based on nonlinear dynamical systems provides an integrated view on experimental data where there is a strong link between OAEs and psychoacoustics – and potentially neuroscience. A prominent example is an early finding that the mean frequencies of SOAE peaks coincide with the most sensitive frequencies of the same listener [14]. A filter bank approach can account for such a frequency-dependent sensitivity but cannot account for SOAE. An approach based on nonlinear dynamic systems can provide an explicit link between these two phenomena [11].

Systems of coupled nonlinear and active oscillators also display another phenomenon that might allow re-interpreting both physiological and psychoacoustical data. In a nutshell a spontaneously oscillating system can be “forced” to change its intrinsic frequency when coupled to other oscillators (see figure 4). This effect of “entrainment” [15] and “clustering” has been observed broadly in various fields, including in a system of coupled clocks and in neuroscience in connection to diabetes [16], to name a few. It has also explicitly been applied to model the hearing organ of amphibians and properties of SOAEs in these species [17].

One might speculate that such phenomena might be advantageous for the sense of hearing. High sensitivity can be achieved by amplification and adaptive tuning. Relevant frequencies can be “improved” by

entraining parts of the inner ear towards dominant frequencies. This could potentially improve neural coding and hence the interpretability of the neural signal by the brain. A filter-based approach is based on the phenomenon that one sound can be made inaudible by another sound by the choice of an (arbitrarily chosen) signal-to-noise ratio. In a system of coupled oscillators can this phenomenon explained purely by the entrainment of oscillators. Such a (so far speculative) mechanism might save resources to process irrelevant information and hence be one of the reasons underlying the efficiency and precision of the sense of hearing.

New insights from physiology, physics, mathematics and novel measurement techniques might provide the required insights to re-interpret the sense of hearing in a way where observable phenomena can, in parts, be derived from a limited set of physical principles that are universal to nature. This will allow to mimic the principles of nature in technological applications. It can also help to restore a necessary mechanism in information processing (rather than an isolated observable phenomenon), and hence get us closer to solving the challenge of hearing impairment.

Current challenges and opportunities

The field of hearing research and, in particular, physiological acoustics can provide the basis for some groundbreaking developments for a benefit of society. In the following, few highlights will be presented that might outline important directions for the upcoming years.

In the health sector

Physiological acoustics provides a direct link to how nature implements sound processing in physiology. Access to these mechanisms will allow to design and implement increasingly sensitive diagnostic methods. Damages and deficits can be detected earlier and met with a suitable compensation or therapy.

Current challenges that need to be solved are, for example, that the largest amount of knowledge stems from other species than humans. Even though similar to human anatomy, the evolutionary relevant challenges are different between guinea pigs, cats, and humans. Another factor might be the use of anesthesia in neuroscience. The drugs applied during the experiments might change the neural activity and hence mislead our interpretation of the data. In general, little details are known about human auditory physiology – mainly due to obvious ethical reasons. Neither the mechanical nor the neural code of human hearing is cracked! This might have direct consequences in clinical audiological practice.

Physiological acoustics can help to improve non-in-

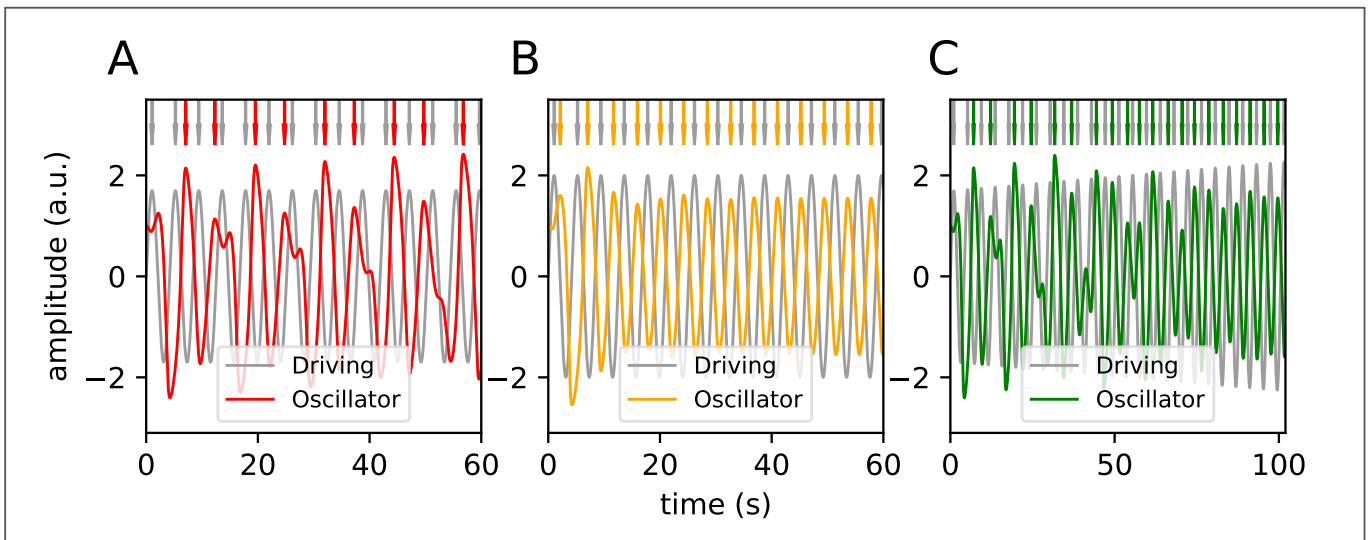


Fig. 4: Interaction of a self-sustained oscillator (coloured) with a harmonic driving force. The oscillator (coloured) is driven by the external driving force (grey). The arrows on top indicate the periodic maximum. In this example, a van der Pol oscillator was used. The scale is arbitrarily chosen and can be freely scaled by the oscillator parameters.

A) The driving leads to a superposition of the oscillator frequency and the driving force frequency, resulting in a “beating” effect. The oscillator keeps its intrinsic frequency.

B) With an increased driving force amplitude, the oscillator is forced into entrainment with the driving force and the oscillator adopts the driving force frequency.

C) Transition from “beating” state (low driving amplitude) to “entrained” state at higher amplitudes. Simulations made by Lene Højberg Christensen and Jonas Birkedal Dudal Jensen.

vasive measurement techniques based on otoacoustic emissions and electrophysiology. When the relevant processes underlying hearing can be understood, sensitive metrics can be defined that are closer to the mechanisms used by nature than the metrics used by engineers! And with proper therapeutic tools it will be possible to restore the ability of the relevant parts required to utilize the basic mechanisms underlying hearing. It might be better to restore hair cell motility and all consequences thereof (like entrainment) rather than only the aspect of amplification or selectivity in isolation.

In technology

From an audio-technological perspective, it is desirable to capture the relevant aspects of sound while limiting computational effort. Hence, it might be beneficial to include certain processing on the level of the sensor rather than recording a sound signal and then processing the information by a computer afterwards. First approaches exist that try to mimic inner ear processing within micro-mechanical system design, e.g. [18]. A mechanical beam with feedback behaves in parts like a hair cell and can show high tuning and sensitivity. A system of such sensors might behave similar to the inner ear and hence provide an optimized, pre-processed stream of information about the sound signal picked up by the sensor. Such a sensor would save a tremendous amount of energy

in wearable applications like hearing aids and cochlear implants - and might even improve encoding of audio information for transmission. The latter can directly contribute towards improved communication in challenging environments. One might also consider that such technological devices directly mimic the function of the inner ear and hence replace a defective physiological element.

Summary and conclusions

The sense of hearing is highly relevant for everyday communication and it is also threatened by increasing sound exposure and environmental factors. The physiological implementation of sound processing (the “auditory system”) displays high efficiency and precision while complying with strict biological limitations. Physiological acoustics is the interdisciplinary approach to reveal the biophysical principles underlying hearing – with the goal to restore and mimic the basic underlying principles that allow communication in complex acoustical environments. Principles from physics can be transferred to hearing and can overcome limitations of current approaches to describe and model hearing. Hence, hearing research and physiological acoustics can be considered one of the modern and relevant hubs for health and innovation for the benefit of society.

Acknowledgements

The thoughts presented in this article are the result of extensive and supportive discussions with numerous colleagues, collaborators and mentors in the interdisciplinary field of hearing science. I would also like to highlight and acknowledge the tremendous efforts put into various projects by incredibly talented student colleagues, and the help of Marina Kliuchko for proof-reading.

Bibliography

- [1] Lin FR; Yaffe K; Xia J; et al.: Hearing Loss and Cognitive Decline in Older Adults. *JAMA Intern Med.* 173(4), pp. 293–299, 2013.
- [2] World Health Organization WHO: Deafness and hearing loss. 2023.
<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss> (accessed: 30. March 2023)
- [3] Fastl, H.; Zwicker, E.: Psychoacoustics: Facts and models. *Psychoacoustics: Facts and Models* (pp. 1–463). Springer Berlin Heidelberg. 2007.
- [4] Moore, B. C.; Glasberg, B. R.; Varathanathan, A.; Schlittenlacher, J.: A Loudness Model for Time-Varying Sounds Incorporating Binaural Inhibition. *Trends in hearing*, 20. 2016.
- [5] Rennie, J.; Verhey, J.L.; Fastl, H.: Comparison of loudness models for time-varying sounds. *Acta Acustica United With Acustica*, 96(2), pp. 383–396, 2010.
- [6] Moore, B. C.J.: Development and Current Status of the “Cambridge” Loudness Models. *Trends in Hearing*, 18. 2014.
<https://doi.org/10.1177/2331216514550620>
- [7] Hofman, P.M.; Van Riswick, J. G.A.; Van Opstal, A.J.: Re-learning sound localization with new ears. *Nature Neuroscience*, 1(5), pp. 417–421, 1998.
- [8] Zweig, G.; Lipes, R.; Pierce, J. R.: Cochlear Compromise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 59(4), pp. 975–982, 1976.
- [9] Zweig, G.; Shera, C. A.: The origin of periodicity in the spectrum of evoked otoacoustic emissions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 98(4), pp. 2018–2047, 1995.
- [10] Shera, C.A.: Mammalian spontaneous otoacoustic emissions are amplitude-stabilized cochlear standing waves. *Journal of the Acoustical Society of America*, 114(1), pp. 244–262, 2003.
- [11] Epp, B.; Verhey, J.L.; Mauermann, M.: Modeling cochlear dynamics: interrelation between cochlea mechanics and psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(4), pp. 1870–1883, 2010.
<https://doi.org/10.1121/1.3479755>
- [12] Keshishzadeh, S.; Garrett, M.; Verhulst, S.: Towards Personalized Auditory Models: Predicting Individual Sensorineural Hearing-Loss Profiles From Recorded Human Auditory Physiology. *Trends in Hearing*, 25, 2021.
<https://doi.org/10.1177/2331216520988406>
- [13] Ashmore, J.; Avan, P.; Brownell, W.E.; Dallos, P.; Dierkes, K.; Fettiplace, R.; Canlon, B.: The remarkable cochlear amplifier. *Hearing Research*, 266(1–2), pp. 1–17, 2010.
- [14] Zwicker, E.; Schloth, E.: “Interrelation of different otoacoustic emissions.” *J. Acoust. Soc. Am.* 75, pp. 1148–1154, 1984.
- [15] Acebrón, J.A.; Bonilla, L.L.; Vicente, C.J.P.; Ritort, F.; Spigler, R.: The Kuramoto model: A simple paradigm for synchronization phenomena. *Reviews of Modern Physics*, 77(1), pp. 137–185, 2005.
<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.77.137>
- [16] Adablah, J.E.; Vinson, R.; Roper, M.G.; Bertram, R.: Synchronization of pancreatic islets by periodic or non-periodic

muscarinic agonist pulse trains. *Plos One*, 14(2), e0211832, 2019.

- [17] Vilfan, A.; Duke, T.: Frequency clustering in spontaneous otoacoustic emissions from a lizard’s ear. *Biophysical Journal*, 95(10), pp. 4622–4630, 2008.
- [18] Lenk, C.; Seeber, L.; Hoevel, P.; Ziegler, M.; Gutschmidt, S.: “Enabling Adaptive and Enhanced Acoustic Sensing Using Nonlinear Dynamics.” *Conf Proc IEEE Int Symp. on Circuits and Systems (ISCAS)*, arXiv:2007.06902 [physics.appph], 2020.
<http://arxiv.org/abs/2007.06902> ■



Prof. Dr. rer. nat.

Bastian Epp

*Auditory Physics group,
Hearing Systems
section,
Department of Health
Technology,
Technical University of
Denmark*

Ehrungen der DEGA

Auf der DAGA 2023 verlieh die DEGA folgende Auszeichnungen

■ Helmholtz-Medaille für Prof. Brigitte Schulte-Fortkamp



Auf der Eröffnungsfeier zur Tagung DAGA 2023 in Hamburg am 7. März 2023 überreichte die Präsidentin der DEGA, Prof. Sabine C. Langer, die Helmholtz-Medaille an die Preisträgerin, Prof. Dr. Brigitte Schulte-Fortkamp, für ihre herausragenden Leistungen in der Soundscape-Forschung und ihr außerordentliches Engagement für die Akustik und den Lärmschutz im nationalen und internationalen Umfeld. Die Laudatio wurde gehalten von Prof. Michael Vorländer, Aachen (siehe Seite 40) ■

■ Lothar-Cremer-Preis für Dr. Leander Claes



Auf der Eröffnungsfeier zur Tagung DAGA 2023 in Hamburg am 7. März 2023 überreichte die Präsidentin der DEGA, Prof. Sabine C. Langer, den Lothar-Cremer-Preis an den Preisträger, Dr.-Ing. Leander Claes, für seine innovativen Arbeiten auf dem Gebiet der physikalischen Akustik. Die Laudatio wurde gehalten von Prof. Bernd Henning, Paderborn (siehe Seite 41). ■

■ DEGA-Studienpreise 2023



Im Rahmen der diesjährigen Tagung DAGA 2023 wurden die folgenden herausragenden Abschlussarbeiten auf dem Gebiet der Akustik mit dem DEGA-Studienpreis ausgezeichnet:

- M.Sc. Paul A. Bereuter (rechts) für seine Masterarbeit „Abstract feature sets in analysis and classification of phonation types in singing“ an der Kunstuniversität Graz, und an
- M.Sc. Julia Seitz (links) für ihre Masterarbeit „Intentional Switching of Spatial Auditory Selective Attention in Preschool Children“ an der RWTH Aachen. ■

■ Posterpreise der DAGA 2023

Im Rahmen der Tagung DAGA 2023 in Hamburg wurden wieder die besten Poster durch eine Jury prämiert. Die Übergabe der Preise fand am 09.03.2023 vor dem Plenarvortrag statt.

Gewonnen haben die Poster der folgenden Erstautoren:

- Felix Czwiolong („Der Prandtlventilator – Die glockenförmige Arbeitsverteilung für den minimal induzierten Widerstand“)
- Florian Denk („Evaluation of Active Occlusion Effect Cancellation using Subjective, Probe Tube and Coupler Measurements“)
- Braj Bhushan Prasad („Einsatz granularer Materialien zur passiven Schwingungsreduktion von Komponenten einer Windenergieanlage“)

Wir gratulieren den Preisträgern und hoffen, auch in den kommenden Jahren viele weitere herausragende Poster auszeichnen zu können. ■

■ Laudatio für Prof. Brigitte Schulte-Fortkamp

Sehr geehrter Vorstand der DEGA, liebe Kolleginnen und Kollegen, liebe Brigitte!

Ich zitiere aus einer Tischrede von Hermann von Helmholtz, die er 1891 gehalten hat, aus dem Artikel „Költzsch/Klemenz: Hermann von Helmholtz – zum 200. Geburtstag“ im Akustik Journal 03/2021:

„Dieser Trieb, den ursächlichen Zusammenhang der Erscheinungen zu entdecken, hat mich durch mein Leben geführt, und seine Intensität war auch wohl daran Schuld, dass ich keine Ruhe bei scheinbaren Auflösungen eines Problems fand, so lange ich noch dunkle Punkte darin fühlte. Nun sollte ich zur Universität übergehen. Die Physik galt damals noch für eine brodlose Kunst. Meine Eltern waren zu großer Sparsamkeit gezwungen; also erklärte mir der Vater, er wisse mir nicht anders zum Studium der Physik zu helfen, als wenn ich das der Medizin mit in den Kauf nähme. Diese Arbeiten genügten, um ... mir den Ruf nach Berlin ... zu verschaffen.“

Dieses Zitat passt wunderbar auch in unsere Zeit, denn es charakterisiert die Notwendigkeiten, unkonventionelle Wege zu finden und zu beschreiten, Brücken zu bauen auch gegen etablierte Traditionen in den wissenschaftlichen Disziplinen und am Ende etwas völlig Neues zu entwickeln und durchzusetzen. Ich wandle das Zitat nun etwas ab, um es für Brigitte anzupassen, damit Sie verstehen, was ich meine: „Die Akustik galt damals noch für eine brodlose Kunst. Meine Eltern waren zu großer Sparsamkeit gezwungen; also erklärte mir der Vater, er wisse mir nicht anders zur Akustik zu helfen, als wenn ich das der Soziologie und Psychologie mit in den Kauf nähme.“ Danach folgt das mit dem Ruf nach Berlin. Neue Wege in der Psychoakustik, völlig neue Konzepte in der Lärmwirkungsforschung, Schall nicht nur als Lärm, sondern auch als Ressource verstehen. Von all dem war in den 1990er Jahren kaum die Rede. Es brauchte neue Sichtweisen quer zu den Disziplinen, weil in den etablierten Fächerkulturen allein kein dauerhafter Fortschritt möglich ist.

Nach dem Studium der Soziologie und Psychologie an den Universitäten Freiburg und Göttingen promovierte Brigitte Schulte-Fortkamp in Oldenburg zum Thema „Geräusche beurteilen im Labor. Entwicklung interdisziplinärer Forschungsmethoden und ihre forschungssoziologische Analyse“. Bei der Verteidigung der Dissertation nahmen fünf Professorinnen und Professoren aus der Soziologie, der Politologie und der Akustik teil. Entsprechend bunt kann man sich die Diskussion vorstellen!

Nach einer Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Universität Oldenburg wurde sie im Jahre 2000 als Gastprofessorin für Lärmwirkungen und Psychoakustik an die TU Berlin berufen, an der sie bis zu ihrem „Ruhestand“ 15 Jahre lang in Forschung und Lehre gewirkt hat – selbstverständlich quer zu den Disziplinen. In dem Zusammenhang sind Forschungsaufenthalte am MIT in Boston, und vor allem an der Université Pierre et Marie Curie, Laboratoire d'Acoustique Musicale in Paris zu erwähnen.

Für eine sehr kompakte Beschreibung des wissenschaftlichen Fokus von Brigitte darf ich nochmals zitieren, und nun aus dem einleitenden Satz im Buch von ihr und Jian Kang (Soundscape and the Built Environment): *„Soundscape research represents a paradigm shift, as it involves human and social sciences and physical measurements to account for the diversity of soundscapes across countries and cultures. Moreover, it treats environmental sounds as a resource rather than a waste“*.

Diesen Ansatz international durchzusetzen, war in der Tat eine sehr große Leistung! Brigitte war maßgeblich an der Standardisierung der ISO 12913-Reihe „Soundscape“ beteiligt, auch stark in der Rolle der Leitung von normungsbegleitenden Projekten. Die moderne Lärmwirkungsforschung ist mittlerweile ohne den Soundscape-Ansatz nicht mehr denkbar. Das stellt einen sehr großen Verdienst dar! Es gibt keine Akustiktagung national oder international, in der Soundscape nicht mit einer oder mehreren Sitzungen vertreten ist. Bis dies auch in Immissionsschutz-Richtlinien berücksichtigt wird, wird es sicher noch dauern, denn zwischen Wissen und An-

wendung in breiter Praxis liegen gerne mal ein paar Jahrzehnte.

Ich möchte ihrem Plenarvortrag nicht vorgreifen, aber dennoch versuchen, die doch so einleuchtende Logik in Soundscapes zusammenzufassen:

1. Schall ist überall
2. Schall wird von Menschen wahrgenommen
3. Ob Schall Lärm ist oder nicht, entscheiden die Menschen.
4. All das ist nicht mit herkömmlichen „Schallpegeln“ messbar, denn die Bedeutung der Schalle und die Kontexte sind wichtig.
5. Die Betroffenen sind die besten Experten, also sind die auch die besten „Messapparate“.
6. Wenn Partizipation gelebt wird, schließt sich der Kreis zwischen Planern und Betroffenen durch den Soundcape-Ansatz in ganz natürlicher Weise.

Wie so etwas gehen kann, hat Brigitte Schulte-Fortkamp an Pilotprojekten in Berlin demonstriert.

Darüber hinaus all ihre Ehrenämter und ihr riesiges Engagement für die Fachwelt in Gänze aufzuzählen, würde den Rahmen deutlich sprengen. Nur drei Organisationen seien hier herausgehoben: DEGA, EAA und ASA. Für die DEGA hat sie vor nunmehr 26 Jahren den Tag gegen Lärm – eine Aktion der DEGA – initiiert, ist seitdem Aktionsleiterin und bringt das Thema unter Einbeziehung von Politikerinnen und Politikern in die breite Öffentlichkeit, auch international als Teil des International Noise Awareness Day. In der DEGA war sie viele Jahre im Vorstand und im Vorstandsrat, hat den Fachausschuss Lärm mit gegründet und war sechs Jahre lang in der Leitung des FA Lärm. Sie hat unzählige Sitzungen für die verschiedenen DAGAs organisiert und durchgeführt, und nicht zuletzt die DAGA 2010 in Berlin zusammen mit Martin Ochmann organisiert sowie die Internoise 2016 in Hamburg mit Otto von Estorff.

Für die European Acoustics Association, EAA, war sie zuletzt sechs Jahre lang (2016–2022) Vize-Präsidentin, zuvor viele Jahre lang Produkt-Managerin und Mitglied im Executive Board.

Brigitte Schulte-Fortkamp ist Fellow der Acoustical Society of America und wirkt auch dort in vielen Gremien mit. Sie war 12 Jahre lang Associate Editor für die JASA, hatte den Vorsitz des TC Noise (Fachausschuss Lärm) von 2008–2010 und wurde schließlich als erste nicht-nordamerikanische Person zur Vize-Präsidentin der ASA (2010–2012) gewählt. Mit Brigitte Schulte-Fortkamp ehrt die DEGA eine sehr geschätzte Kollegin, die einen sehr großen Beitrag in der Lärmwirkungsforschung geleistet hat und die über die fachliche Arbeit hinaus enormes Engagement in der nationalen und internationalen Vernetzung gezeigt hat. Liebe Brigitte, zu den Preisen, die Du schon gewonnen hast, dem Hear the World Foundation Award 2010 für „Sustainable education, prevention and support“ und dem 2012 Soundscape Award der European Environment Agency (EEA) und der Noise Abatement Society (NAS) gesellt sich nun die Helmholtz-Medaille als Anerkennung einer großen Leistung „quer zu den Disziplinen“ und zwar aufgrund eines riesigen Engagements, mit wichtigen Beiträgen für die Akustik, für die Gesellschaft, für die DEGA! Ist das nicht wunderbar?

Dir, liebe Brigitte, möchte ich dazu ganz herzlich gratulieren, und Ihnen liebe Kolleginnen und Kollegen danke ich für Ihre Aufmerksamkeit. ■

Michael Vorländer

■ Laudatio für Dr. Leander Claes

Es ist mir eine besondere Freude und Ehre, die Laudatio für den diesjährigen Lothar-Cremer-Preisträger halten zu dürfen.

Man könnte heute meinen, dass es für fast alle physikalischen Größen eine Vielzahl von Messverfahren gibt. Selbst bei physikalischen Größen, die uns im alltäglichen Leben begleiten, wie auch die Viskosität. Bei genauerem Hinsehen müssen wir jedoch die physikalische Größe Viskosität in zwei Komponenten unterscheiden: der Scherviskosität und der Volumenviskosität. Während für die Scherviskosität das zuvor Gesagte gilt (hier gibt es tatsächlich eine Vielzahl

von etablierten Messverfahren), verhält es sich bei der Volumenviskosität gänzlich anders, welche insbesondere bei kompressiblen Strömungsverhältnissen bedeutsam wird.

Will man beispielsweise die Strömungsverhältnisse beim Wiedereintritt von Raumflugkörpern in die Atmosphäre oder bei Objekten, die sich mit Hyperschallgeschwindigkeit bewegen, möglichst exakt vorhersagen oder gar deren Flugeigenschaften gezielt beeinflussen, benötigt man neben komplexen mathematischen Modellen die präzise Kenntnis aller relevanten physikalischen Größen. Das gilt insbesondere für die rheologischen Stoffkenngrößen – Dichte, Scherviskosität und Volumenviskosität. Weil man heute kaum Informationen über die Volumenviskosität hat, schätzt man diese nur grob. Die Konsequenz: Vorhersagen werden unsicher und diverse technische Probleme bleiben heute noch ungelöst.

Getreu dem Spruch von Galileo Galilei (1564–1642) „*Alles messen, was messbar ist – und messbar machen, was noch nicht messbar ist*“ widmete Herr Dr. Claes genau dieser Aufgabe sein Promotionsstudium und liefert mit seiner Dissertation „Messverfahren für die akustische Absorption in reinen Fluiden zur Bestimmung der Volumenviskosität“ einen substanziellen Beitrag zur Entwicklung und Umsetzung eines Messverfahrens für die Volumenviskosität.

Sein Lösungsansatz beruht auf der hochpräzisen Auswertung der Absorption von Ultraschallwellen, denn auch dieser physikalische Vorgang zählt zu den kompressiblen Vorgängen der Fluidodynamik. Allerdings ist die zu bestimmende Absorption des Ultraschalls in reinen Fluiden im Vergleich zum Beispiel zu Stoffgemischen sehr gering, was noch einmal die besonderen messtechnischen Anforderungen hinsichtlich der Präzision betont. Bei der Realisierung des Messsystems entwickelte er viele kreative, originelle Lösungen, z. B.:

- die Entwicklung einer robusten Messmethode durch Auswertung der gewöhnlichen Momente des Signalspektrums,
- die Entwicklung einer Sensoreinfassung zur Gewährleistung einer exakt

symmetrischen und unbeeinflussten Schallabstrahlung innerhalb der Messkammer,

- eine additiv gefertigte Messzellenkonstruktion zur zuverlässigen Unterdrückung von sich parasitär ausbreitendem Ultraschall, und vieles anderes mehr.

Das von Herrn Dr. Claes entwickelte Messverfahren ermöglicht nun die experimentelle Bestimmung der Volumenviskosität fluider Medien über einen weiten Temperatur- und Druckbereich, so dass Simulationen zukünftig auch bei Berücksichtigung kompressibler Fluidströmungen realitätsnah durchgeführt werden können. Freuen Sie sich schon auf den Plenarvortrag des Preisträgers, der am Donnerstag um 11:45 Uhr im Plenarsaal stattfinden wird.

Diese Forschungsarbeit ist eingebettet im Forschungsschwerpunkt des Fachgebiets Elektrische Messtechnik, der auf die Entwicklung von Messsystemen zur Bestimmung akustischer Materialkenngrößen zielt. Herr Dr. Claes führte diese Forschungsarbeiten in enger Kooperation mit den Kollegen des Fachgebiets Thermodynamik und Energietechnik der Universität Paderborn unter Leitung von Professor Jadran Vrabec (heute an der TU Berlin) aus. Sein Promotionsverfahren hat Dr. Claes mit dem bestmöglichen Prädikat abgeschlossen und er wurde in 2022 auch mit dem Preis des Präsidiums der Universität Paderborn für ausgezeichnete Dissertationen gewürdigt.

Herr Dr. Claes ist als Wissenschaftler hoch produktiv, was seine überdurchschnittliche Publikationstätigkeit eindrucksvoll belegt. So ist er Erst- bzw. Koautor von 17 Peer-Reviewed-Beiträgen in einschlägigen Fachjournalen und mehr als 28 Konferenzbeiträgen. Für seine Forschungsarbeiten wurde Dr. Claes bereits mehrfach ausgezeichnet, z. B. mit dem RWB Stephens Prize beim 2019 International Congress on Ultrasonics in Brügge. Auch in der universitären Lehre zur Messtechnik und Akustik engagiert sich Herr Dr. Claes vorbildlich. Er konzipierte selbst neue Wahlpflichtlehrveranstaltungen und in 2017 erhielt er gemeinsam mit Kollegen den Förderpreis für Innovation und Qualität in der Lehre

für das Lehrkonzept „Klanganalyse und -synthese“, welches seitdem von ihm als Lehrveranstaltung für die Studierenden des Studiengangs „Populäre Musik und Medien“ an der Universität Paderborn angeboten wird.

Auch in einer anderen Weise passt er perfekt in die Gemeinschaft der Akustiker, denn zu seinen wichtigen Hobbies gehört neben dem Klettern auch das Musizieren. Einige Jahre war er als Hornist im Hochschulorchester aktiv und in den letzten Jahren ist er Gitarrist der „Isolier-Band“, einer Gruppe Musik-begeisterter Elektrotechniker am Fachgebiet Elektrische Messtechnik der

Universität Paderborn.

So passt die Vita von Herrn Dr. Claes auch in einigen Punkten zum Namensgeber des seit 1992 vergebenen Nachwuchspreises – Lothar Cremer –, denn auch er studierte Elektrotechnik und musizierte leidenschaftlich.

Mein Dank gilt der Jury bzw. dem Vorstand der DEGA für die Auswahl und die damit verbundene Würdigung der wissenschaftlichen Leistung von Herrn Dr. Claes. Ich bin überzeugt, Herr Dr. Claes ist ein überaus würdiger Preisträger für den diesjährigen Lothar-Cremer-Preis der Deutschen Gesellschaft für Akustik. Herzlichen Glückwunsch an den Preis-

träger Herrn Dr. Leander Claes!

Herrn Dr. Claes danke ich noch einmal herzlich für die ausgezeichnete und erfolgreiche Zusammenarbeit. Ich wünsche ihm in seiner wissenschaftlichen Karriere weiterhin viel Erfolg sowie alles Gute im persönlichen Leben. ■

Bernd Henning

Menschen

Gratulationen und Personalien

■ Wir gratulieren

- zum 90. Geburtstag (März 2023):
Prof. Dr. Jürgen Meyer,
ehem. Präsident der DEGA (1995–1998), Träger der Helmholtz-Medaille (2004), erster Leiter des DEGA-Fachausschusses Musikalische Akustik
- zum 85. Geburtstag (April 2023):
Dr. Erhard Werner,
ehem. Leiter des DEGA-Fachausschusses Elektroakustik ■

■ Personalien

Die DEGA-Geschäftsstelle wird seit Februar 2023 durch eine Halbtagskraft verstärkt:

Frau Runhild Arnold-Schwandt (M. A.) übernimmt derzeit die Elternzeit-Vertretung für Frau Julia Zech (geb. Schneiderheinze) als Projektassistentin für Sekretariat und Veranstaltungen.

Kontakt: E-Mail ras@dega-akustik.de / Tel. 030 / 340 60 38-04. ■



meTecno

PERFORATED

NACHGEWIESENE* KORROSIONSBESTÄNDIGKEIT RC5



BESUCHEN SIE UNS AUF DEM
FORUM AUSTICUM IN TURIN
11. bis 15.09.2023



Schallabsorption
 $\alpha_w \geq 0,95 - 1,00$

Schalldämmung
 R_w bis 70 dB

Schallschutz-Sandwichelement mit Dämmkern aus Glaswolle oder Steinwolle





*Prüfbericht auf Anfrage

Markus Bayha • Gebietsverkaufsleiter Akustik D-A-CH
Tel: +49 7151 20609 80 markus.bayha@metecno.de
Mobil: +49 163 8203115 www.metecno.de

Veranstaltungen

■ Veranstaltungshinweise

08.–10.09.2023

EAA Summer School
in Torino (IT)



Im Vorfeld der Tagung Forum Acusticum 2023 wird eine EAA Summer School für junge Akustikerinnen und Akustiker in Turin (IT) stattfinden, veranstaltet von der European Acoustics Association (EAA).

Es werden folgende Kurse angeboten:

- Fundamentals in Acoustics (course is suitable for undergraduate and first-year graduate students)
- Hot Topics 1–8: Environmental Acoustics and Sound-scape / Aeroacoustics / Auralization / Acoustic Product Design / Metamaterials / Metrology and measurement science in Acoustics / Acoustic analysis of Speech and Voice / Toolboxes for auditory modeling and psycho-acoustic research

Alle weiteren Informationen (Anmeldung, Gebühren, Anreise, Unterkunft) finden Sie auf der Seite

<https://www.fa2023.org/eaa-summer-school>. ■

11.09.–15.09.2023

Forum Acusticum 2023
in Torino (IT)



Das Forum Acusticum findet alle drei Jahre als große europäische Tagung für Akustik statt, organisiert von einer nationalen Fachgesellschaft für Akustik im Namen der European Acoustics Association (EAA). Im Jahr 2023 wird die Tagung von der Italian Acoustical Association (AIA) durchgeführt.

Sie sind herzlich eingeladen, am Forum Acusticum 2023 vom 11. bis 15. September 2023 in Turin teilzunehmen.

Junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler können sich bis zum 30.06.2023 um die „Best Student Paper Awards“ bewerben.

Alle weiteren Informationen finden Sie auf der Webseite

<https://www.fa2023.org>. ■

25.09.–29.09.2023**5th Polish-German Structured Conference on Acoustics (PGSCA)**

Im Rahmen des „69th Open Seminar on Acoustics“ (25.–29. September 2023 in Karpacz, im polnischen Riesengebirge) wird auch die „5th Polish-German Structured Conference on Acoustics“ stattfinden. Sie wird von der Polnischen Gesellschaft für Akustik PTA und der DEGA gemeinsam organisiert. Webseite mit aktuellen Informationen (Tagungsort, Anmeldung, Beiträge, Termine):

siehe <https://acoustics.org.pl/polger2023>

Ziel der Konferenz ist es, Kontakte zwischen der polnischen und deutschen Akustik zu vertiefen und Erfahrungen und Ideen auszutauschen. Während der Konferenz werden sieben thematische Sitzungen abgehalten. Die vorgestellten Beiträge können in den Konferenzunterlagen oder in den Zeitschriften „Vibration in Physical Systems“ und „International Journal of Electronics and Telecommunication“ gegen eine Zusatzgebühr veröffentlicht werden. Die Konferenz findet parallel zur „SPSympo23“-Konferenz statt. Die Anmeldung zur PGSCA2023 berechtigt zur Teilnahme an allen Sitzungen der Parallelkonferenzen.

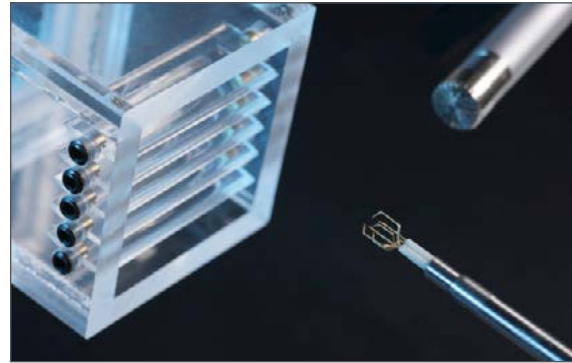
Einladung:

On behalf of the organizing committee, it is our great pleasure to invite you to the 69th Open Seminar on Acoustics and 5th Polish-German Structural Conference on Acoustics (PGSCA). The 5th PGSCA is organised by the Wrocław Branch of the Polish Acoustical Society, the latter jointly with the German Acoustical Society DEGA. These scientific events will be held at the Hotel „Sandra Spa“ in Karpacz, Poland, on 25–29 September 2023. The topics of the papers submitted for the 69th Open Seminar on Acoustics cover a large area of theoretical, technical and experimental research in the field of acoustics.

The 5th PGSCA will be held with special sessions in the fields of Psychoacoustics, Electroacoustics, Ultrasound, Hydroacoustics, Noise, and more.

We would like to welcome you in Karpacz! ■

*Michael Vorländer and Andrzej Dobrucki
(Coordinators of the 5th PGSCA)*

25.09.–26.09.2023**DEGA-Akademie****Kurs „Strömungsakustik 1 – Grundlagen, Auslegungen und Anwendungen“**

Auch die diesjährige DEGA-Akademie zur Strömungsakustik besteht aus 2 Kursen:

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

Der Kurs 1 findet am 25. und 26. September 2023 in Erlangen statt.

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

Leitung und Referenten:

- Prof. Dr.-Ing. Stefan Becker, Universität Erlangen (Leitung)
- Prof. Dr.-techn. Manfred Kaltenbacher, TU Graz (Leitung)
- Prof. Dr.-Ing. Ennes Sarradj, TU Berlin
- Prof. Dr. sc. techn. Philipp Schlatter, Universität Erlangen
- Ass. Prof. Dr. techn. Stefan Schoder, TU Graz
- M.Sc. Felix Czwiolong, Universität Erlangen

Veranstaltungsort:

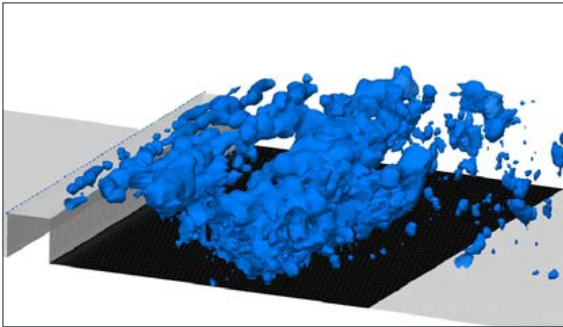
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Cauerstraße 4, Kurssaal II
91058 Erlangen

Programm, Leistungen, Gebühren und Anmeldung:

siehe <https://www.dega-akustik.de/aktuelles> ■

27.09.–28.09.2023 DEGA-Akademie

Kurs „Strömungsakustik 2 – Theorie, numerische Verfahren und Anwendungen“



Wie auf der vorherigen Seite beschrieben, besteht die diesjährige DEGA-Akademie zur Strömungsakustik aus 2 Kursen:

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

Der Kurs 2 findet am 27.09. und 28.09.2023 in Erlangen statt. Er ergänzt den Kursteil 1 und ist eine Erweiterung und Vertiefung der bisherigen Akademie-Kurse zur Strömungsakustik. Er lehrt die Theorie der Strömungsakustik und gibt einen intensiven Einblick in die CAA-Berechnungsverfahren. Es wird der momentane Entwicklungsstand in der Behandlung strömungsakustischer Fragestellungen aufgezeigt.

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

Leitung und Referenten:

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

Veranstaltungsort:

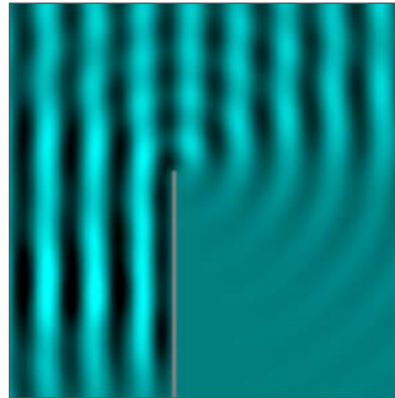
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Cauerstraße 4, Kurssaal II
91058 Erlangen

Programm, Leistungen, Gebühren und Anmeldung:

siehe <https://www.dega-akustik.de/aktuelles> ■

05.10.–06.10.2023 DEGA-Akademie

Kurs „Grundlagen der Technischen Akustik“



Dieser Kurs findet wieder am 5. und 6. Oktober 2023 in Berlin statt.

Er richtet sich an Beschäftigte 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 in ihrer Tätigkeit erstmals mit Fragestellungen der Technischen Akustik konfrontiert sind und sich deshalb entsprechendes Grundlagenwissen auf diesem Gebiet aneignen wollen.

Leitung und Referierende:

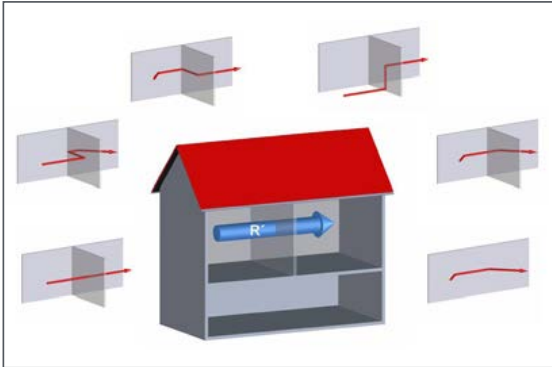
- Dr.-Ing. Judith Galuba, DIN/VDI-Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS), Berlin
- Prof. Dr.-Ing. Ennes Sarradj, TU Berlin, Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik

Veranstaltungsort:

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.,
Burggrafenstraße 6,
10787 Berlin

Programm, Leistungen, Gebühren und Anmeldung:

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

09.10.–11.10.2023**DEGA-Akademie****Kurs „Bauakustik – von den Grundlagen zur Anwendung“**

Wegen der hohen Nachfrage findet der Kurs „Bauakustik – von den Grundlagen zur Anwendung“ in diesem Jahr wieder ein zweites Mal statt.

Er richtet sich an alle, die sich mit der Thematik intensiver auseinander setzen wollen (insbesondere aus Architektur, Bauingenieurwesen etc.).

Leitung und Referenten:

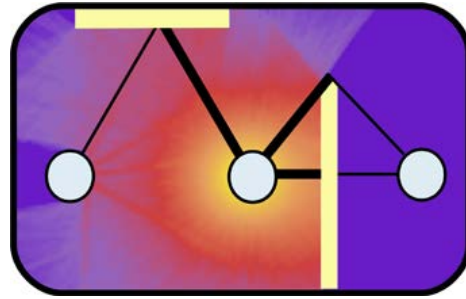
- Prof. Dr.-Ing. Alfred Schmitz (Leitung), TU Braunschweig / TAC-Technische Akustik, Grevenbroich
- Hon.-Prof. Dr.-Ing. Volker Wittstock, PTB Braunschweig

Veranstaltungsort:

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

Programm, Leistungen, Gebühren und Anmeldung:

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

14.11.–15.11.2023**16. DEGA-Symposium****Akustik und Lärm in Büro und Schule**

Das 16. DEGA-Symposium findet am 14.11. und 15.11.2023 in Ilmenau statt.

Es richtet seinen Fokus auf die akustische Situation an Arbeitsplätzen, insbesondere in Büros und Schulen. Aus technischer Sicht ist in der Raumakustik von derartigen Alltagsräumen theoretisch alles klar. Die Berechnung von Schallfeldern kann auf unterschiedlichste Weisen erfolgen. Eine Vielzahl von raumakustischen Parametern ist Messungen und auch den Planungen zugänglich.

Diskretion und Kommunikation sind Zielkonflikte beim hybriden wie auch agilen Arbeiten im Büro. In Schulen werden zunehmend ähnliche Konzepte wie in Großraumbüros (als Lernlandschaften, Open Schools etc. bezeichnet) angewendet. Wie so häufig in der Akustik ist die subjektive Seite, also die menschliche Wahrnehmung, ein wichtiger Aspekt bei der Einschätzung und Bewertung der Arbeitsumgebung. Neben normativen Vorgaben und Empfehlungen bestehen seit 2018 erstmals raumakustische Anforderungen aus Richtung des Arbeitsschutzes in Form der ASR A3.7 „Lärm“. Hier bestehen Anforderung an die Nachhallzeit in Büros wie auch Räumen in Bildungsstätten. Fünf Jahre nach Einführung dieser Technischen Regel zur Konkretisierung der Arbeitsstättenverordnung ist eine Rückschau notwendig und ein Ausblick hilfreich.

Das Symposium beleuchtet die vermeintlich neuen alten Herausforderungen, zeigt anhand von Beispielen aus Forschung und Praxis verschiedene Sichtweisen und Ansätze auf und soll ganz im Sinne eines Symposiums dem geselligen Austausch dienen. Verantwortlich für das Programm ist der Fachausschuss Bau- und Raumakustik der DEGA (Koordination: Christian Nocke) in Zusammenarbeit mit den Fachausschüssen Lärm, Hörakustik und Virtuelle Akustik. Die Veranstaltung wird finanziell unterstützt durch den Industrieverband Büro und Arbeitswelt e. V. (IBA), durch Ecophon Deutschland und durch Gerriets GmbH.

Veranstaltungsort:

Festhalle Ilmenau / Parkcafé,
Naumannstraße 22,
98693 Ilmenau

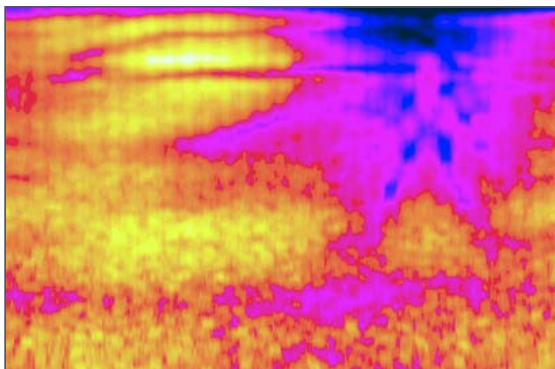
Programm und Anmeldung:

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

15.11.–17.11.2023

DEGA-Akademie

Kurs „Psychoakustik – Grundlagen und Anwendungen“



Der Kurs „Psychoakustik – Grundlagen und Anwendungen“ findet vom 15. bis 17. November 2023 wieder als Online-Kurs statt.

Er richtet sich an alle, die Kenntnisse im Bereich der Wahrnehmung und Beurteilung von Geräuschen erlangen oder vertiefen möchten. Dabei sollen durch die Vermittlung der Grundlagen der Psychoakustik und deren Anwendung in Bereichen wie Produktgeräuschoptimierung, Umweltgeräuschbewertung und Soundscape, Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus Wissenschaft, Verwaltung und Industrie gleichermaßen adressiert werden.

Leitung und Referierende:

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

Programm, Leistungen, Gebühren und Anmeldung:

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

■ Vorschau

18.–21.03.2024

DAGA 2024

50. Jahrestagung für Akustik



Hannover klingt – Willkommen zur 50. DAGA

Hannover – UNESCO-City of Music, Stadt der Chöre und des Klangs – im Jahr der 50. DAGA ist Hannover im Herzen Deutschlands zum zweiten Mal Gastgeber: Seien Sie nun herzlich eingeladen zur DAGA 2024.

Das Hannover Congress Center (HCC) bietet für die DAGA 2024 einen besonderen Rahmen: Historische Tagungsräume und „Future Meeting Spaces“ laden ein zu wissenschaftlichen Präsentationen, zur Begegnung, fachlichem Austausch und zum kreativen Miteinander.



In der Region Hannover leben wir Akustik mit Herzblut: An der Leibniz Universität Hannover (LUH), der Medizinischen Hochschule Hannover (MHH) und der Hochschule für Musik, Theater und Medien Hannover (HMTMH), aber auch in vielen Initiativen und Industrieunternehmen im Umland existieren umfangreiche Forschungsaktivitäten im Bereich des Hörens, der Elektroakustik und Audiotechnik, der Technischen Akustik sowie der Musik- und Klangforschung. Zu nennen ist hier insbesondere der Beitrag von LUH und MHH im Exzellenzcluster Hearing4all in der niedersächsischen Kooperationspartnerschaft Auditory Valley.

Zwischen Harz und Heide, Oker und Leine findet sich eine Vielfalt der Akustikforschung – insbesondere an den außeruniversitären Forschungseinrichtungen wie dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), der Technischen Universität Clausthal und nicht zuletzt an der Technischen Universität Braunschweig. An allen Hochschulstandorten der Region begeistern wir uns darüber hinaus mit großer Leidenschaft für motivierende Lehre und solide Ausbildung der Akustiker und Akustikerinnen von morgen.

Die DAGA 2024 wird geplant, organisiert und durchgeführt von Kolleginnen und Kollegen der Institute und Einrichtungen der Leibniz Universität Hannover. Wir alle freuen uns sehr darauf, Gastgeber der 50. DAGA in Hannover zu sein.

Freuen Sie sich mit uns auf eine stimmungsvolle Abendveranstaltung mit Musik im Lichthof des Welfenschlosses, dem Hauptgebäude der Leibniz Universität Hannover. Seien Sie herzlich Willkommen zur DAGA 2024 in Hannover!

Jürgen Peissig und Raimund Rolfes
Tagungsleitung



Vorkolloquien

- Elektroakustik und Immersive Audioverfahren (Jürgen Peissig & Stephan Preihs)
- Schall von Windenergieanlagen: On- und Offshore (Raimund Rolfes)
- Audiosignalverarbeitung, Soundcodierungsstrategien und Computermodelle für Auditorische Implantate (Waldo Nogueira & Andreas Büchner)

Zentrale Termine

- ab September 2023: Anmeldung zur Teilnahme und Einreichung von Poster- und Vortragsanmeldungen
- 1. November 2023: letzter Termin für die Anmeldung von Vorträgen
- 31. Januar 2024: letzter Termin für die Anmeldung zu den günstigen „frühen“ Teilnahmegebühren
- Februar 2024: Veröffentlichung von Konferenz-App und Tagungsprogramm
- 18. März 2024: Vorkolloquien zur DAGA, DEGA-Mitgliederversammlung
- 18.–21. März 2024: Tagung DAGA 2024
- Frühjahr 2024: Tagungsband wird online veröffentlicht

Veranstaltungsort



HCC Hannover Congress Centrum
Theodor-Heuss-Platz 1-3
30175 Hannover
<https://www.hcc.de>

Rahmenprogramm

Wir planen unseren geselligen Abend im Welfenschloss der Leibniz Universität Hannover. Auch die traditionelle Jam-Session soll wieder stattfinden.

<https://www.daga2024.de/programm/rahmenprogramm>

Daneben werden auch wieder verschiedene Fachexkursionen zu Hannovers akustischen Besonderheiten angeboten. Der gesellige Abend und die meisten Exkursionen sind in der Teilnahmegebühr enthalten.

Anmeldung zur Tagung und Gebühren

Ab diesem Herbst unter

<https://www.daga2024.de/registrierung>

Beitragsanmeldung

Vorträge und Poster können ab September bis zum 1. November 2023 über diese Seite eingereicht werden:

<https://www.daga2024.de/autoren>



Ausstellung und Sponsoring

Die wissenschaftliche Tagung wird in langjähriger Tradition von einer Firmenausstellung begleitet, die Unternehmen die Möglichkeit bietet, ihre Produkte und Dienstleistungen vorzustellen.

Wir möchten Sie außerdem herzlich einladen, die DAGA durch Werbung, durch Sponsoring oder durch eine Spende zu unterstützen. Gern können Sie Ihre eigenen Vorschläge und Ideen einbringen. Nähere Information folgen ab diesem Herbst hier:

<https://www.daga2024.de/ausstellung>

Kontakt und Information

Teresa Lehmann und Runhild Arnold-Schwandt
(DEGA-Geschäftsstelle)

E-Mail: tagungen@dega-akustik.de

Webseite: <https://www.daga2024.de>

Tel: 030 / 340 60 38 04 oder 030 / 340 60 38 03

Mobil: 0176 / 56 84 55 64 ■

■ Veranstaltungsrückblick

26.04.2023

Mach' mal leise!

26. Tag gegen Lärm 2023



Unter dem Motto „Mach' mal leise“ fand am 26. April 2023 der 26. Tag gegen Lärm – International Noise Awareness Day statt.

In diesem Jahr wurde neben dem Verkehrslärm der „Lärm im Alltag“ in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt. Dabei ging es aber nicht nur um den Lärm und dessen Entstehung, sondern auch um notwendige Maßnahmen, die zur Verbesserung der akustischen Umwelt beitragen.

Bei der zentralen Veranstaltung „Lärm im Alltag“, die die DEGA gemeinsam mit dem Umweltbundesamt durchgeführt hat, standen daher verschiedene Fragestellungen im Mittelpunkt: Welche Möglichkeiten der Geräuschreduktion gibt es in den verschiedenen Lebensbereichen? Welche Maßnahmen führen zu einer Verbesserung der Geräuschsituation? Welche Synergieeffekte können genutzt werden? Was kann jede:r einzelne tun, um die Lärmbelastung nicht nur zu reduzieren, sondern auch um eine angenehme akustische Situation zu gestalten? Welche technischen Entwicklungen und die damit verbundenen Anforderungen an den Immissionsschutz gibt es?

Zwischen 100 bis 130 Teilnehmer:innen verfolgten die digitale Veranstaltung mit insgesamt 5 Fachvorträgen und beteiligten sich vielfach an den Diskussionen.

Leitung:

- Brigitte Schulte-Fortkamp (Aktionsleiterin Tag gegen Lärm)

Eröffnung und Grußwort:

- André Fiebig, TGL-Aktionsleitung und
- Thomas Myck, Umweltbundesamt

Vorträge:

- Mensch, Schall und Lärm
Sabine Schlittmeier, RWTH Aachen University
- Neue Produkte, neue Anforderungen, neue Probleme?
Klaus Genuit, HEAD acoustics GmbH

- Lärm von Luft-Wärmepumpen
Christian Fabris, Umweltbundesamt
- Auswirkungen von Fluglärm auf Kinder
Susanne Bartels, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
- Stadtklang gestalten

Thomas Kusitzky, Müller-BBM Industry Solutions GmbH
Die freigegebenen Vorträge werden auf Anfrage von der Geschäftsstelle der DEGA als PDF-Datei zur Verfügung gestellt. Im Rahmen des Tag gegen Lärm hat der Arbeitsring Lärm der DEGA (ALD) eine Onlinebefragung zum Thema „Schutz vor Lärm“ durchgeführt. Jede:r Interessierte konnte an der Befragung teilnehmen. Die Ergebnisse werden im Akustik Journal 03/2023 (Oktober) veröffentlicht.

Der Tag gegen Lärm war auch in diesem Jahr zahlreich in den Medien vertreten. Sowohl in überregionalen als auch in regionalen Zeitungen bzw. Zeitschriften (z. B. Berliner Zeitung, Süddeutsche Zeitung, Tinnitus-Forum) wurden Beiträge zum Tag gegen Lärm veröffentlicht. Fernseh- und Radiobeiträge zum Aktionstag mit Interviewpartner:innen der DEGA waren u. a. im NDR, bei WDR5, im Deutschlandfunk oder bei ARD (Tagesschau) und ZDF (Volle Kanne) zu sehen bzw. zu hören. In den sozialen Medien wurde der Tag gegen Lärm ebenfalls thematisiert (siehe z. B. <https://twitter.com/taggegenlaerm>).

Auch am 26. Tag gegen Lärm – International Noise Awareness Day hat sich gezeigt, dass es wichtig bleibt und ist, auf aktuelle oder bereits seit langem existierende Lärmprobleme aufmerksam zu machen.

Ein herzliches Dankeschön geht an alle Akteur:innen! Besonders möchten wir uns auch in diesem Jahr bei den Förderern und Sponsoren bedanken und last, but not least beim Gesundheitsladen München, der erneut so viele Aktionen in München und Umgebung organisiert hat.

Der Termin zum 27. „Tag gegen Lärm – International Noise Awareness Day“ steht noch nicht fest. Er wird zeitnah auf der Website des Tag gegen Lärm bekannt gegeben. ■

Brigitte Schulte-Fortkamp,

André Fiebig,

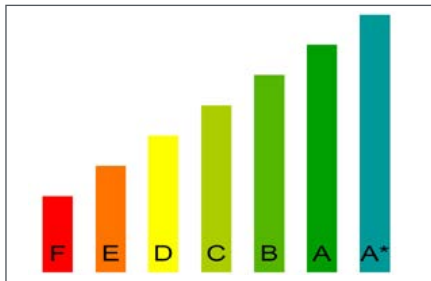
Evelin Baumer

■ Kalender

- **20.–23.08.2023 in Chiba, Greater Tokyo (J):**
Inter-Noise 2023,
siehe <https://internoise2023.org/>
- **08.–10.09.2023 in Torino (IT):**
EAA Summer School,
siehe Seite 43 und
<https://www.fa2023.org/eaasummer-school>
- **11.–15.09.2023 in Torino (IT):**
Forum Acusticum 2023,
siehe Seite 43 und
<https://www.fa2023.org>
- **19.–20.09.2023 in Dortmund:**
Herbstworkshop des Fachausschusses „Fahrzeugakustik“,
siehe Seite 58
- **26.–29.09.2023 in Karpacz (PL):**
5th Polish-German Structured Conference on Acoustics,
siehe Seite 44 und <https://www.dega-akustik.de/pgsca23>
- **25.–26.09.2023 in Erlangen:**
DEGA-Akademie-Kurs „Strömungsakustik 1 – Grundlagen, Auslegungen und Anwendungen“,
siehe Seite 44 und <https://www.dega-akustik.de/aktuelles>
- **27.–28.09.2023 in Erlangen:**
DEGA-Akademie-Kurs „Strömungsakustik 2 – Theorie, numerische Verfahren und Anwendungen“,
siehe Seite 45 und <https://www.dega-akustik.de/aktuelles>
- **05.–06.10.2023 in Berlin:**
DEGA-Akademie-Kurs „Grundlagen der Technischen Akustik“,
siehe Seite 45 und <https://www.dega-akustik.de/aktuelles>
- **09.–10.10.2023 in Stuttgart:**
Sitzung des Fachausschusses „Lehre der Akustik“
- **09.–11.10.2023 in Braunschweig:**
DEGA-Akademie-Kurs „Bauakustik – von den Grundlagen zur Anwendung“,
siehe Seite 46 und <https://www.dega-akustik.de/aktuelles>
- **19.–20.10.2023 in Bad Honnef:**
Herbstworkshop „Physikalische Akustik“
- **01.–03.11.2023 in Drübeck:**
9. Workshop „Kavitation“,
siehe <https://www.soft-matter.ovgu.de/Aktuelles/Kavitationsworkshop+2023.html>
- **08.–11.11.2023 in Düsseldorf:**
tmt 32 – Tonmeistertagung,
siehe <https://www.tonmeistertagung.com>
- **14.–15.11.2023 in Ilmenau:**
16. DEGA-Symposium
„Akustik und Lärm in Büro und Schule“,
siehe Seite 46 und <https://www.dega-akustik.de/aktuelles>
- **15.–17.11.2023 als Online:-Kurs:**
DEGA-Akademie-Kurs „Psychoakustik – Grundlagen und Anwendungen“,
siehe Seite 47 und <https://www.dega-akustik.de/aktuelles>
- **17.–19.11.2023 in Aachen:**
Herbstworkshop der Fachgruppe „Junge DEGA“,
siehe Seite 56
- **23.11.2023 in Berlin:**
Sitzung des Fachausschusses „Bau- und Raumakustik“,
siehe Seite 58
- **18.–21.03.2024 in Hannover:**
Jahrestagung DAGA 2024,
siehe Seite 47f und
<https://www.daga2024.de>

Weitere Termine (international) finden Sie im Newsletter „EAA Nuntius“:
<https://euracoustics.org/products/nuntius> ■

■ Entwurf zur DEGA-Richtlinie 103-1 „Schallschutz im Wohnungsbau, Teil 1: Schallschutzklassen und erhöhter Schallschutz“, Mai 2023



Der Vorstandsrat der DEGA hat kürzlich beschlossen, dass neben den bisherigen „DEGA-Empfehlungen“ auch „DEGA-Richtlinien“ veröffentlicht werden sollen. Hierfür gelten dieselben Regularien wie für die Empfehlungen, so dass u. a. auch jeweils ein Einspruchsverfahren durchgeführt werden muss.

Die erste DEGA-Richtlinie wurde vom Fachausschuss Bau- und Raumakustik erstellt. Sie ist in Abstimmung mit dem Vorstand unter der Nummer 103-1 als Entwurf kürzlich erschienen: „Schall-

schutz im Wohnungsbau, Teil 1: Schallschutzklassen und erhöhter Schallschutz“ (<https://www.dega-akustik.de/aktuelles>). Zusammen mit einem späteren zweiten Teil „DEGA-Schallschutzausweis“ (103-2) sollen diese beiden Richtlinien die bisherige DEGA-Empfehlung 103 „Schallschutz im Wohnungsbau – Schallschutzausweis“ aus dem Jahr 2018 ersetzen, wobei folgende Veränderungen im vorliegenden ersten Teil der Richtlinie vorgenommen wurden:

- Abtrennung des Teils 2 zum Schallschutzausweis,
- Einführung und Umsetzung eines parallelen („zweigleisigen“) Konzepts mit „raumbezogenen“ und „bauteilbezogenen“ Kenngrößen zur Klassifizierung des Schallschutzes,
- Umstrukturierung mit eigenen Abschnitten zu Begriffen und Formelzeichen,

- Einführung von optionalen Anforderungen,
- Erweiterung und Anpassung der Empfehlungen an den eigenen Wohnbereich aus dem DEGA-Memorandum BR 0104 von Februar 2015,
- redaktionelle Überarbeitung.

Die DEGA-Richtlinie 103-1 wird zunächst einem Einspruchsverfahren unterzogen. Somit haben Sie die Möglichkeit, bis spätestens

Montag, den 9. Oktober 2023

Einsprüche an die DEGA-Geschäftsstelle zu richten (Adresse siehe Seite 66). Auf <https://www.dega-akustik.de/aktuelles> finden Sie den Entwurf der Richtlinie als PDF-Download, ein Formblatt für Einsprüche sowie die Regularien für DEGA-Richtlinien. Bitte beachten Sie auch die technischen Hinweise auf der Titelseite des Entwurfs. ■

■ Abstimmung über Änderung der DEGA-Satzung

Nach 14 Jahren soll die Satzung der DEGA fortgeschrieben werden. Die Änderungen basieren vor allem auf dem Wunsch, dass Wahlen bei der DEGA künftig online durchgeführt werden können. Ebenfalls macht es in diesem Zusammenhang Sinn, die Satzung auf eine gender-gerechter Sprache umzustellen. Daneben gibt es noch weitere Passagen, die im Zuge der Fortschreibung angepasst werden sollen.

Wie im § 28 der bisherigen Satzung vorgeschrieben, ist dieser Entwurf sowohl im DEGA-Vorstandsrat als auch auf der letzten Mitgliederversammlung (siehe folgende Seiten, Protokoll) ausführlich diskutiert worden. Zur gender-gerechten Schreibweise wurden auf der Mitgliederversammlung mehrere Varianten diskutiert, bei denen allerdings keine eindeutige Priorität erkennbar war (s. u.). In Abstimmung zwischen DEGA-Vorstand und DEGA-Vorstandsrat wurde letztlich die inklusive Form mit Dop-

pelpunkt („Präsident:in“) präferiert. Diese Schreibweise scheint sich derzeit in der geschriebenen Sprache (d. h. in Regelwerken und Presstexten) gegenüber anderen Formen durchzusetzen, und vor allem die „junge DEGA“ hat sich auf ihrer letzten Sitzung deutlich für diese Schreibweise ausgesprochen.

So wurden Anfang Juni alle DEGA-Mitglieder per Post gebeten, ihr Votum zur Neufassung der Satzung bis spätestens 08.09.2023 abzugeben. ■

■ Reisekostenzuschüsse

„DEGA Young Scientist Grants“

Um jungen Akustikerinnen und Akustikern 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/ys-grants>. ■

■ Protokoll der Mitgliederversammlung

am Montag, den 6. März 2023 um 17:00 Uhr in Hamburg

1. Begrüßung

Die Präsidentin der DEGA, Sabine Langer, eröffnet die Mitgliederversammlung, begrüßt die 112 anwesenden Mitglieder und stellt die Beschlussfähigkeit fest.

2. Genehmigung der Tagesordnung

Die Einladung mit Tagesordnung wurde allen Mitgliedern per E-Mail bzw. per Brief fristgerecht zugestellt; ebenso steht sie im Akustik Journal Nr. 01/23. Diese Tagesordnung wird ohne Ergänzungen angenommen.

3. Bericht des Vorstands

Einleitend fasst Frau Langer die wichtigsten Ereignisse und Entwicklungen des letzten Jahres zusammen:

- Seit Sommer 2022 ist ein neuer Vorstand im Amt.
- Die DEGA hat derzeit ca. 1.930 persönliche Mitglieder; dies entspricht in etwa dem Stand vor einem Jahr.
- Für die Durchführung der Tagung DAGA 2022 in Stuttgart geht ein großer Dank an Philip Leistner und sein Team, vor allem für den besonderen Aufwand einer Hybrid-Tagung.
- Der DEGA-Lärmschutzpreis wurde während der DAGA 2022 erstmals vergeben.
- Der letztjährige Gewinner des Lothar-Cremer-Preises (Christian Adams) hat sein gesamtes Preisgeld dankenswerterweise an Schulen im Ahrtal gespendet.
- Im Vorstandsrat der DEGA wird derzeit über eine mögliche intensivierte Mitwirkung der DEGA in der Normung diskutiert.

Es folgen Berichte der übrigen Mitglieder des Vorstands über die Aktivitäten der DEGA:

- Herr Becker blickt auf das 15. DEGA-Symposium im Herbst 2022 („Erneuerbare Energien und Lärmschutz“) zurück, welches mit ca. 150 Teilnehmenden ein großer Erfolg war. Er verweist auf die derzeit 76 Fördermitglieder, deren Anzahl

trotz Inflations-Krise beinahe gleich geblieben ist. Er bedankt sich für die damit verbundene großzügige Unterstützung.

- Herr Behler erläutert, dass der Vorstand seit März 2022 fünf neue Projekte bewilligt hat:
 - 1) „Interaktive Apps“,
 - 2) 6. Workshop „junge DEGA“,
 - 3) „Audio-Wiki“,
 - 4) „DEGA-Richtlinie Schallschutzklassen“ und
 - 5) „Empfehlung Schallschutzausweis“.

Er erinnert daran, dass die DEGA-Mitgliedsgebühren im Januar 2023 um 10 % angehoben wurden. Schließlich merkt er an, dass der DEGA-Preis für Kommunikationsräume in 2023 leider nicht vergeben wird.

- Herr Bös berichtet, dass für die Neufassung der Satzung umfangreiche Vorarbeiten geleistet wurden (siehe TOP 8). Er weist darauf hin, dass im September 2023 wieder eine „Polish-German Structured Conference on Acoustics“ in Karpacz (PL) stattfinden wird.
- Herr Fiebig dankt Brigitte Schulte-Fortkamp für die erfolgreiche Aktionsleitung des „Tag gegen Lärm“ seit nunmehr 25 Jahren. Er fasst den Tag gegen Lärm 2022 zusammen, der unter dem Motto „Hört sich gut an“ stattfand. Das Thema der zentralen Online-Veranstaltung lautete „Ein Vierteljahrhundert Tag gegen Lärm – Stand und Perspektiven“. Der nächste Tag gegen Lärm wird am 26.04.2023 unter dem Motto „Mach mal leise“ stattfinden. Seitens des Umweltministeriums sind kürzlich neue Zuschüsse für den Tag gegen Lärm genehmigt worden. Schließlich blickt er auf den neuen Akademie-Kurs „Soundscape“ zurück.
- Herr Koch berichtet von zahlreichen Aktivitäten der „jungen DEGA“ während der DAGA-Tagung, u. a. mit einem Mentoring-Programm. Für das Akustik Journal hat der Vorstandsrat die Chefredak-

tion und den Redaktionsbeirat für weitere drei Jahre ernannt. Er wirbt dafür, für das Journal mehr Beiträge einzureichen und zählt die Vorteile der Zeitschrift auf (große Sichtbarkeit, große thematische Bandbreite). Schließlich weist er darauf hin, dass die Online-Tagungsbände der DAGA-Tagungen künftig nicht mehr mit einem Passwort geschützt werden.

Herr Klemenz erläutert, dass in der DEGA-Geschäftsstelle aufgrund von Mutterschutz und Elternzeit ab Februar eine neue Mitarbeiterin eingestellt wurde (Frau Arnold-Schwandt). Er blickt auf eine erfreulich hohe Anzahl an neun DEGA-Akademie-Kursen im Jahr 2022 zurück, nämlich „Strömungsakustik 1+2“ (online), „Bauakustik“ (Braunschweig, erstmals mit zwei Kursen, wegen der hohen Nachfrage), „DEGA-Schallschutzausweis“ (online), „Raumakustik und Beschallungstechnik“ (Aachen), „Soundscape“ (neuer Kurs, online), „Grundlagen der Technischen Akustik“ (Berlin) und „Raumakustik kompakt“ (Braunschweig). Er dankt allen Kursleiterinnen und Kursleitern für ihren Einsatz. Im Jahr 2023 werden nach heutigem Stand die Kurse „Bauakustik“ (Braunschweig), „DEGA-Schallschutzausweis“ (online), „Strömungsakustik 1+2“ (Erlangen), „Grundlagen der Technischen Akustik“ (Berlin) und „Psychoakustik“ (online) stattfinden.

Im zurückliegenden Jahr hat die DEGA zwei „Young Scientist Grants“ vergeben, und zur laufenden DAGA werden 16 junge Teilnehmende mit einem „DEGA Student Grant“ gefördert.

4. Finanzbericht

Herr Behler und Herr Klemenz erläutern den Finanzrechnungsbildungsbericht für das Jahr 2022 sowie den vom Vorstand aufgestellten und vom Vorstandsrat genehmigten Finanzplan für 2023, jeweils unterteilt in Einnahmen und Ausgaben. Sie erläutern auch die sich daraus ergebenden Rücklagen der DEGA.

Für das Jahr 2022 wurde eine „schwarze Null“ eingeplant; tatsächlich konnte

aber ein (erfreulich hoher) Überschuss in sechsstelliger Höhe erzielt werden. Die hauptsächlichen Ursachen für diese Abweichung liegen in geringeren Ausgaben bei der DAGA 2022 (vor allem durch die pandemiebedingte Umwandlung des geselligen Abends in eine Open-Air-Veranstaltung), in höheren Umsätzen bei der DEGA-Akademie angesichts der hohen Anzahl an Kursen, und in vorgezogenen Einnahmen bei der DAGA 2023 aufgrund eines früheren Zahlungsziels für frühe Anmeldungen. Die Rücklagen sind gegenüber dem Jahr 2021 entsprechend angewachsen.

Die Planung für das Jahr 2023 sieht einen Verlust vor, der größtenteils durch einmalige Effekte zustande kommt (vorgezogene Einnahmen bei der DAGA 2023, restliche Umweltbundesamt-Projektmittel aus 2022, zusätzliches Porto für die briefliche Abstimmung zur neuen Satzung). Der verbleibende inflationsbedingte Verlust müsste streng genommen durch weitere Gebührenerhöhungen oder Sparmaßnahmen kompensiert werden. Der Vorstand schlägt hingegen vor, zunächst einen Teil der o. g. hohen Rücklagen abzubauen und auf Beitragserhöhungen vorerst zu verzichten. Der Vorstandsrat der DEGA hat diesen Plan bereits verabschiedet und hat darüber hinaus bestätigt, dass die Konsolidierungs-Maßnahmen des letzten Jahres trotz des einmalig hohen Überschusses langfristig notwendig waren.

5. Bericht der Rechnungsprüfer

Bei der letzten Mitgliederversammlung wurden Thomas Geyer und Jens Prager als Rechnungsprüfer gewählt. Beide berichten, dass die Kasse der DEGA auch im Geschäftsjahr 2022 wieder ordnungsgemäß geführt wurde. Alle Belege der Einzelbuchungen und Rücklagen sind vollständig und transparent vorhanden; hierzu wurden wieder umfangreiche Stichproben durchgeführt. Da keine Unregelmäßigkeiten festgestellt wurden, empfehlen beide die Entlastung des Vorstands. Frau Langer dankt Herrn Geyer und Herrn Prager für den Bericht.

6. Entlastung des Vorstands

Auf Antrag von Herrn Balazs werden

Vorstand und Geschäftsführer einstimmig entlastet, wobei sich die Vorstandsmitglieder und der Geschäftsführer bei dieser Abstimmung nicht beteiligen.

7. Wahl der Rechnungsprüfer

Da Herr Geyer sein Amt als Rechnungsprüfer nach fünf Jahren abgeben möchte, dankt ihm Frau Langer für seinen Einsatz in diesem wichtigen Ehrenamt. Herr Prager hat sich bereit erklärt, als Rechnungsprüfer weiterhin zur Verfügung zu stehen. Frau Heinecke-Schmitt ist ebenso bereit, dieses Amt neu anzunehmen. Beide (Jens Prager und Regina Heinecke-Schmitt) werden ohne Gegenstimmen in dieses Amt gewählt, und Frau Langer dankt ihnen für ihre Bereitschaft.

8. Fortschreibung der DEGA-Satzung

Frau Langer erläutert, dass die anstehenden Änderungen bei der Satzung auf dem Wunsch basieren, dass Wahlen bei der DEGA künftig auch online durchgeführt werden können. So ist bei der Wahl der derzeit 14 gewählten Mitglieder des Vorstandsrats der Versand von ca. 2 000 Briefen und die Auszählung von ca. 700 zurückgesandten Wahlzetteln sehr aufwändig und kostspielig. Derzeit sieht die Satzung der DEGA nur Briefwahlen vor. Ebenfalls macht es in diesem Zusammenhang Sinn, die Satzung auf eine gender-gerechter Sprache umzustellen. Daneben gibt es noch weitere Passagen, die im Zuge der Fortschreibung angepasst werden könnten. Herr Klemenz stellt den Entwurf für die neue Satzung im Detail vor (bei dem auf Wunsch des Vorstandsrats der Absatz § 21(12) unverändert bleibt).

Aus den Reihen der Mitglieder wird allerdings die vorgeschlagene Gender-Schreibweise „Präsident oder Präsidentin“ bemängelt. Stattdessen sollte eine inklusive Form verwendet werden, beispielsweise „Präsident*in“ oder „Präsident:in“. Nach einer kurzen Diskussion bittet Frau Langer um ein Stimmungsbild, bei dem auch mehrfache Antworten möglich sind. Das Ergebnis zeigte allerdings keine eindeutige Priorität, da der derzeitige Vorschlag („Präsident oder Präsidentin“) sowie die beiden o. g. inklu-

siven Formen etwa gleich viele Stimmen bekommen haben (ca. 40-50 %). Nur das bisher verwendete generische Maskulinum („Präsident“) hat deutlich weniger Stimmen erhalten (ca. 5 %).

Zu weiteren Passagen der Satzung werden keine Änderungswünsche genannt. Als nächste Schritte wird der Vorstand entscheiden, welche Gender-Formulierung übernommen wird, und den Vorstandsrat hierzu um ein abschließendes Votum bitten. Danach wird die Satzung an alle DEGA-Mitglieder zur brieflichen Abstimmung versandt. Für die Auszählung der Briefe haben sich Thomas Fedtke (PTB, Braunschweig), Tobias Ring (TU Braunschweig) und Martin Klemenz (DEGA) bereit gefunden, dies zu übernehmen. Die Mitgliederversammlung bestätigt dies einstimmig.

9. Berichte aus den Fachausschüssen und Fachgruppen

Die anwesenden DEGA-Fachausschüsse (FA) und Fachgruppen (FG) berichten über ihre zurückliegenden Aktivitäten sowie über aktuelle Planungen und verweisen auf die kommenden Sitzungen bzw. Versammlungen. Im Folgenden werden die wichtigsten Ereignisse in Stichpunkten aufgezählt.

- FG ALD – Arbeitsring Lärm der DEGA (Christian Beckert): drittes ALD-Panel zum Windradlärm online erschienen, Mitwirkung beim 15. DEGA-Symposium und beim Tag gegen Lärm, derzeit Online-Fragebogen-Aktion zu Lärmthemen, leider keine staatliche Förderung des ALD ab April 2023
- FA Bau- und Raumakustik (Christian Nocke): Rückblick auf hybride Herbstsitzung 2022 und auf Exkursion zu Firmen am Oberrhein und im Elsass, zwei neue Dokumente derzeit in Arbeit (Richtlinie zu Schallschutzklassen und überarbeitete Empfehlung zum Schallschutzausweis), Planungen für das 16. DEGA-Symposium im Herbst 2023 zum Thema Büroakustik und Arbeitsschutz
- FA Elektroakustik (Daniel Beer): Rückblick auf Herbsttreffen 2022 bei Firma BMW, in 2023 weiteres Herbsttreffen geplant

- FA Fahrzeugakustik (Ercan Altinsoy): Rückblick auf Online-Workshop im Januar 2023, weiterer Workshop für Herbst 2023 geplant, bald wieder Seminar der Arbeitsgruppe Messtechnik
- FA Hörakustik (Janina Fels): Beteiligung von FA-Mitgliedern bei internationalen Veranstaltungen und in Dachverbänden
- FG „junge DEGA“ (Lucas Heide mann): Rückblick auf Herbstworkshop 2022 in Stuttgart, derzeit neue Runde des Mentoring-Programms mit Dank an Mentorinnen und Mentoren, mehrere Veranstaltungen zur laufenden DAGA-Tagung, Vernetzung mit dem Young Acousticians Network der EAA, Projekt „Interaktive Apps“, Planungen für Herbstworkshop 2023
- FA Lärm – Wirkungen und Schutz (Sandra Dantscher, stellv.): Leitung neu gewählt, Mitwirkung u. a. beim Tag gegen Lärm 2022/2023 und
- beim gemeinsamen Herbstworkshop 2022 mit dem FA Physikalische Akustik, Planung des 16. DEGA-Symposiums gemeinsam mit dem FA Bau- und Raumakustik
- FA Lehre der Akustik (Malte Kob, stellv.): Rückblick auf Herbst-Treffen 2022 in Detmold, Projekt „Überarbeitung des DEGA-Mindestkanons“ wird fortgeführt, neue Projekte „Interaktive Apps“ und „Audio-Wiki“
- FA Musikalische Akustik (Christoph Reuter): Rückblick auf Herbsttreffen 2022 in Wien, Planung des kommenden Herbsttreffens vsl. in Düsseldorf
- FA Physikalische Akustik (Joachim Bös): Rückblick auf Herbstworkshop 2022 in Bad Honnef mit dem Thema „Infraschall / tieffrequenter Schall“ gemeinsam mit dem FA Lärm, Planungen für den Herbstworkshop 2023
- FA Sprachakustik (schriftl. Kurzbe-

richt): Engagement von FA-Mitgliedern in Partnerverbänden

- FA Strömungsakustik (Lars Enghardt): Leitung neu gewählt, Rückblick auf Herbstworkshop „Strömungsschall“ in Braunschweig, Akademie-Kurse „Strömungsakustik“ in 2022 und 2023
 - FA Ultraschall (Christian Koch, stellv.): Rückblick auf Workshop „Ultraschall-Messtechnik“ in Drübeck, nächster Workshop „Kavitation“ in Drübeck im Herbst 2023
 - FA Virtuelle Akustik (Annika Neidhardt): Ideen zu einer Open-Source-Tool-Sammlung, Rückblick auf 3D-Audio-Competition für Studierende
- Frau Langer dankt allen Vertreterinnen und Vertretern für ihre Berichte und das darin sichtbar gewordene Engagement ihrer Fachausschüsse/-gruppen.

10. Verschiedenes

Frau Linow regt an, bei der nächsten DAGA-Tagung einen zusätzlichen gesel-



SONATECH® Industrielösungen

Für die schallabsorbierende Auskleidung von Industriehallen gibt es bei uns ein Rundum-Sorglos-Paket, bestehend aus Messung, Auslegung und Montage. Darüber hinaus bieten wir mit dem Akustik-Check die raumakustische Überprüfung für Industriehallen mit Messberichten und Maßnahmenkatalog an.

Tel. +49/(0)83 93/9 22 12-0
www.sonatech.de



HEAD-Genuit-Stiftung

VERBESSERTE AKUSTISCHE UMWELT – VERBESSERTE LEBENSQUALITÄT

Die HEAD-Genuit-Stiftung fördert zeitgemäße technische Verfahren, Personen und Einrichtungen aus Wissenschaft und Forschung, die sich für die Optimierung der akustischen Umwelt einsetzen.

- Gast- und Stiftungsprofessuren
- Doktoranden
- wissenschaftliche Mitarbeiter

Forschungsprojekte wie:

- Acoustic Environment on People's Emotions
- Gehörliche Bewertung der Lärmexposition in Kindertagesstätten
- Real-time building acoustics simulator
- Sound Quality Label für E-Bikes
- Urban Soundscape of the World

ligen Abend speziell für die ältere Generation anzubieten.

11. Termin der nächsten Mitgliederversammlung

Die nächste Mitgliederversammlung wird voraussichtlich am Montag, den 18.03.2024 während der DAGA 2024 in Hannover stattfinden. Termin und Ort werden vier Wochen vorher im Akustik Journal bekannt gegeben.

Frau Langer dankt allen Anwesenden und schließt gegen 18:30 Uhr die Mitgliederversammlung.

Berlin, den 01.06.2023 ■

Martin Klemenz
(Geschäftsführer der DEGA),
Sabine C. Langer
(Präsidentin der DEGA)

■ Fachausschüsse und Fachgruppen der DEGA stellen sich vor (Teil 10)

Fachausschuss Ultraschall

Ultraschall bezeichnet den Frequenzbereich oberhalb der hörbaren Schwelle von ca. 20 000 Hz, die obere Grenze verschiebt sich mit der Entwicklung von neuen Sendern und Empfängern, aktuell bis in den Gigahertzbereich. Der Fachausschuss Ultraschall ist mit seinen Mitgliedern sehr breit in den Bereichen Messtechnik, industrielle und medizinische Anwendung vertreten. Seit Mitte des letzten Jahrhunderts werden mittels Ultraschall zerstörungsfrei die Verbindungen von metallischen Werkstoffen geprüft. Ähnlich renommiert ist auch die Anwendung von Ultraschall in der medizinischen Diagnostik.

Der Fachausschuss organisiert jedes Jahr einen 2-tägigen Workshop mit abwechselnder Thematik, nämlich zu ultraschallbasierten Messmethoden und zur Kavitation. Hier werden Grundlagen und Anwendungen gleichberechtigt in kurzen Vorträgen vorgestellt und diskutiert, mit dem wichtigen Ziel, Kontakte zwischen den Teilnehmenden zu knüpfen und zu vertiefen. Diese erfolgreiche Serie an Workshops hat durch ihre kollegiale Atmosphäre immer ca. 50 Teilnehmer.

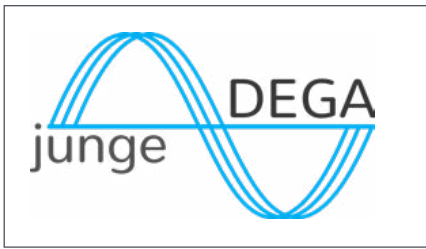
Mitglieder im Fachausschuss arbeiten aktiv am Thema Luftultraschall und an der Möglichkeit, diesen für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung zu nutzen. Hier ist auch die Mitarbeit bei der Entwicklung von Richtlinien zum sicheren Einsatz von Luftultraschall erwähnenswert. Weiterhin hat der FA Ultraschall eine starke Präsenz durch Vertreter von Industrie und Forschung bei der Nutzung von Ultraschall für die Reinigung von Oberflächen. Bei sehr hohen Schalldrücken wachsen mikroskopische Gasbläschen zu einer resonanten Größe an und verändern drastisch ihr Verhalten. Sie erzeugen lokal sehr schnelle Strömungen, hohe Temperaturen und Drücke. Dieses Gebiet der Kavitation wird in dieser Ausgabe des Akustik Journals im Detail erläutert (siehe Seite 7ff). Interessant ist hier die Verminderung des Einsatzes von Chemikalien für nachhaltige Produktionsprozesse, die bis zur Herstellung von Computerchips reichen. Weiterhin wird im Fachausschuss sehr aktuell an haptischen Displays, z. B. in der Fahrzeugindustrie, gearbeitet. Hier werden unter anderem die Linearität der Wellengleichung für zeitinvertierte Verfahren oder die Ausbreitung von Oberflächenwellen zur Stimulation des Tastsinns genutzt. Sehr aktiv sind unsere Mitglieder auch in der Entwicklung von Ultraschallwandlern für biomedizinische Anwendungen, insbesondere Phased-Arrays für die hochfrequente und 3-dimensionale Bildgebung. Dass Ultraschall sich auch für modernste Messmethoden eignet, beweist der diesjährige Lothar-Cremer-Preis. Dieser wurde für die Bestimmung der Volumenviskosität mittels ultraschall-basierter Absorptionsmessung vergeben. Weiterhin gibt es interessante Impulse zur akustischen Holografie mittels derer sich Objekte in 3 Dimensionen kontaktfrei manipulieren lassen.

Die Themen im Fachausschuss Ultraschall passen sich an die Forschungslandschaft an. Wir freuen uns über jedes neue Mitglied, das gerne auch den Themenkatalog erweitern mag.

Claus-Dieter Ohl

■ Fachausschüsse / Fachgruppen

Fachgruppe „junge DEGA“



Vorsitzender:

Simon Kersten, RWTH Aachen
junge-dega@dega-akustik.de

Research in Short(s)

Im Rahmen der DAGA-Tagungen veranstaltet die junge DEGA den gleichmaßen unterhaltsamen wie auch wissenschaftlichen Wettbewerb „Research in Short(s)“. Alle DAGA-Autor:innen sind hierbei eingeladen, ihre Forschung in einem fünf-minütigen Vortrag vorzustellen. Das Ziel ist eine Kombination aus leicht verständlich, unterhaltsam sowie mitreißend dargestelltem wissenschaftlichen Inhalt.

Die Gewinner:innen bei der DAGA 2023 in Hamburg sind:

1. Naomi Nordblom
2. Katharina Pollack
3. Maximilian Scharf
4. Braj B. Prasad

Herbstworkshop 2023 vom 17. bis 19. November in Aachen

Herzliche Einladung an alle Studierenden, Promovierenden und Young Professionals zum Herbstworkshop 2023 vom 17. bis 19. November in Aachen! Auf dem Programm steht das Kennenlernen der akustischen Landschaft in und um Aachen mit spannenden Besuchen verschiedener Partner aus Academia und Industrie. Natürlich kommen auch das Networking und der fachliche Austausch zwischen den Teilnehmenden nicht zu kurz.

Um allen Interessierten eine Teilnahme zu ermöglichen, wird die Anreise und die Übernachtung im Hotel voraussichtlich finanziell gefördert. Die Anzahl der Plätze ist begrenzt, daher lieber schnell anmelden!

Die Anmeldung ist ab sofort bis zum 15. Oktober 2023 unter der Adresse

<https://www.t1p.de/jdega> oder per E-Mail an junge-dega@dega-akustik.de möglich. ■

Simon Kersten

Arbeitsring Lärm der DEGA (ALD)



Vorsitzender:

Dr. Christian Beckert, Magdeburg,
c.beckert@ald-laerm.de

ALD-Panel „Windradlärm“

Das Thema „Energiewende und Lärmschutz“ besitzt eine hohe Aktualität. Die Politik setzt einen wichtigen Schwerpunkt auf einen forcierten Ausbau der Energiegewinnung durch Windenergieanlagen. Zugleich sind diese Anlagen auch Quellen von Umgebungslärm, die ein hohes Konfliktpotenzial in der betroffenen Bevölkerung erreichen können. Dieses Panel zeigt beispielhaft, welche Strategien die Behörden und die Betreiber verfolgen, Konflikte zu vermindern, wo die Grenzen ihrer Möglichkeiten liegen und wie die Nachbarschaft ihre Interessen in den Planungs- und Genehmigungsverfahren einbringen kann.

Auf dem Podium diskutierten im Dezember 2022 in der Patriotischen Gesellschaft in Hamburg unter der Moderation von Margit Bonacker (konsalt GmbH) Dr. Christian Beckert (Vorsitzender des ALD), Christian Hoffmann (WIND-consult GmbH), Johann-Georg Jaeger (Vorsitzender des Landesverbandes Erneuerbare Energien Mecklenburg-Vorpommern e.V.) und Prof. Dr. Susanne Moebus (Universitätsklinikum Essen, Direktorin des Instituts für Urban Public Health).

Den Mitschnitt des Panels finden Sie unter <https://www.ald-laerm.de/ald/projekte-des-ald/2022/ald-panel-windradlaerm>.

Strukturierte Sitzung des ALD auf der DAGA 2023 in Hamburg

Der ALD hat in Zusammenarbeit mit dem Clubcombinat Hamburg e.V. eine bisher eher DAGA-untypische Strukturierte Sitzung zum Thema „Schallschutz im Umfeld von Musikclubs“ organisiert. Der große Zuspruch der etwa 120 bis 150 Teilnehmenden – der Sitzungssaal erwies sich als deutlich zu klein – zeigte aber das große Interesse an dieser Thematik.

Die Neue Leipzig-Charta propagiert die lebendige Stadt mit nutzungsgemischten Stadtquartieren in der u. a. auch die Kulturwirtschaft ihre Räume finden und nutzen soll. Musikclubs tragen für Städte und Kommunen einen bedeutenden Anteil zur Lebensqualität und Attraktivität – insbesondere für junge Menschen – bei. Doch wie lassen sich künftig noch schallintensive Nutzungen realisieren, wenn das Ruhebedürfnis in der Nachbarschaft und deren Klagen ausgeprägter und die musikalischen Orte für Begegnungen dadurch verdrängt werden?

In der strukturierten Sitzung wurde versucht, die Problematik transparent zu machen, es wurden Forschungsergebnisse zum Thema vorgestellt und Ansätze für Lösungsmöglichkeiten präsentiert.

Eine Zusammenfassung der Strukturierten Sitzung ist im ALD-Newsletter 1/2023 zu finden:

https://www.ald-laerm.de/fileadmin/ald-laerm.de/Newsletter/Newsletter-Archiv/ALD-Newsletter_1_2023.pdf

Nähere Informationen zu den Vorträgen können im Tagungsband der DAGA 2023 nachgelesen werden:

https://pub.dega-akustik.de/DAGA_2023/data/index.html

ALD-Lärmumfrage 2023

In diesem Frühjahr hat der ALD eine Onlinebefragung zum Thema „Schutz vor Lärm“ durchgeführt.

Alle interessierten Menschen aus der Bevölkerung konnten an der Befragung teilnehmen und ihre Meinung zu den folgenden Fragestellungen äußern:

- Wie zufrieden sind Sie mit Ihrer Wohnumgebung,
- welche Lärmquellen stören und belastigen Sie,

- was sollte Ihrer Meinung nach zum Schutz vor Lärm getan werden,
- wie beurteilen Sie die bestehenden Bemühungen und
- inwieweit ist der Lärm für Sie beim Kauf oder der Nutzung von Geräten wichtig?

Die Antworten werden aktuell ausgewertet. Die ausführlichen, statistisch zusammengefassten Befragungsergebnisse werden dann im Akustik Journal 3/2023 veröffentlicht. ■

*Christian Beckert,
Christian Popp,
Dirk Schreckenberg*

Fachausschuss Bau- und Raumakustik



Vorsitzender:

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

Bericht FA-Treffen Hamburg

Während der DAGA in Hamburg wurde am Donnerstag 09.03.2023 die 62. Sitzung des Fachausschusses hybrid durchgeführt. Neben diversen Standard-Themen wie den Berichten aus der Normung und von der Fachkommission Schallschutz (FKS) im VMPA e.V. wurde der aktuelle Entwurfsstand zur Fortschreibung der DEGA-Empfehlung 103 vorgestellt und diskutiert. Der Beschluss zur Veröffentlichung des Entwurfs des nun „DEGA-Richtlinie“ genannten Dokuments wurde inzwischen im E-Mail-Verfahren gefasst. Zu berichten ist ebenfalls, dass auf Antrag des Fachausschusses der DEGA-Vorstandsrat beschlossen hat, dass künftig DEGA-Richtlinien veröffentlicht werden können. Insofern wurde beim Treffen des Fachausschusses diskutiert, inwieweit und in welcher Form die DEGA bzw. die Fachausschüsse der DEGA durch Experten in den einschlägi-

gen Normungsgremien präsent sein können. Weiterhin wurde auf die 2. Exkursion nach Dänemark hingewiesen, Bericht nachfolgend. Neben einem Bericht aus der AG „Ermittlung maßgeblicher Außenlärmpegel“ konnten noch auf zwei beantragte DEGA-Projekte, beide im Zusammenhang mit der Fortschreibung der DEGA-Empfehlung 103, hingewiesen werden. Die Wahl zur FA-Leitung war angekündigt, wurde dann aber in der Sitzung verschoben, da pandemiebedingt die letzte Wahl im September 2020 durchgeführt wurde. Hierdurch war die dreijährige Amtsdauer noch nicht erreicht und nach Vorgabe der Geschäftsordnung des Fachausschusses sollte während einer DAGA-Tagung gewählt werden. Dieses Thema ist beim nächsten Treffen des Fachausschusses noch einmal zu besprechen.

Als Neuerung ist zu erwähnen, dass Abstimmungen und Hinweise während der Sitzung in Hamburg per QR-Code durchgeführt wurden. Diese ersten Erfahrungen mit diesem Vorgehen sind positiv, sodass auch künftig auf dieses Werkzeug zurückgegriffen werden kann. Der Fachausschuss hat sich mit zwei strukturierten Sitzungen zur neuen DEGA-Richtlinie 103-1 (siehe Ankündigung in diesem Akustik Journal auf Seite 51) und zur Akustik in Schulen an der DAGA-Tagung beteiligt.

Exkursion des FA Bau- und Raumakustik nach Dänemark (11.–13.05.2023)

Am Donnerstag, den 11. Mai traf sich eine kleine Gruppe Akustiker*innen zur Exkursion am hochmodernen Produktionsstandort für Holzwolles-Akustikplatten bei der Firma Trolldtekt im dänischen Trolldhede. Nach einer Stärkung mit landestypischem „Smørrebrød“ stellte Projektberater Lars-Eric Reimer in einer kurzen Präsentation konstruktive Lösungen, Eigenschaften und Gestaltungsmöglichkeiten des Materials Holzwolles vor. Hierbei entstand ein intensiver Dialog zum Thema reduzierter CO₂-Ausstoß, Materialgesundheit und insbesondere zur Cradle2Cradle Zertifizierung, welcher sich Trolldtekt seit dem Jahr 2012 unterzieht. Glücklicherweise war die Leiterin für Nachhaltigkeit und Kommunikation,

Frau Tina Snedker Kristensen zugegen, welche sämtliche Fragen der interessierten Gäste fundiert beantworten konnte. Anschließend wurden die Teilnehmer*innen durch die hochautomatisierte Produktion für Holzwolles-Akustikplatten geführt. Leider war das Timing für die Führung nicht optimal, da einige Anlagen gerade stillstanden. Man einigte sich augenzwinkernd auf eine erneute Exkursion in ca. 5 Wochen. Umso interessanter wurde ein gemeinsamer Gang zwischen den Rohplattenstapeln hindurch, wo eine nahezu schalltote Umgebung eindrucksvoll erlebbar ist. Danach reiste die Gruppe in das ca. 1 Stunde entfernte Aarhus. Am Abend wuchs die Gruppe bei einem hochklassigen, saisonalen Menü mit reichlich guten Weinen und bei guten Gesprächen so richtig zusammen.

Am nächsten Morgen standen insgesamt 4 geführte Besichtigungen an. Zuerst wurde das neue, internationale Segelsportzentrum direkt an der Aarhus-Bucht besichtigt. Es folgte eine interessante Führung durch die neue Hafencity mit anschließender Mittagspause in einem sehr traditionellen, dänischen Frokost-Restaurant. Im Anschluss wartete im Rathaus von Aarhus eine sehr engagierte und kompetente Führerin auf die Gruppe. Das Rathaus wurde Ende der 1930er Jahre vom weltberühmten Baumeister und Designer Arne Jacobsen mit Unterstützung von Erik Møller gebaut und 1941 unter deutscher Besatzung in Betrieb genommen. Erwähnenswert ist, neben einem Fußboden aus 7000 Jahre alter Mooreiche, dass Arne Jacobsen nicht nur das Gebäude, sondern auch sämtliche Inneneinrichtung, wie Lampen, Möbel, Vorhänge, Teppiche und die raumakustischen Lösungen entwarf.



Zu guter Letzt wurde die Gruppe durch die neue Architekturhochschule in Aarhus geführt. Hier waren verschiedenste raumakustische Lösungen in einer Ar-

chitektur, welche Kreativität, Erfindergeist und Materialverständnis fördert, allgegenwärtig.



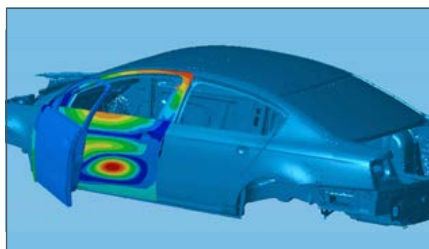
Nächste Treffen – SAVE-THE-DATEs

Zu der nächsten Sitzung am 23.11.2023 in Berlin wird rechtzeitig eine separate Einladung mit der finalen Tagesordnung verschickt. Neben der Besichtigung der Staatsoper unter fachkundiger Erläuterung am Vormittag wird am Nachmittag die offizielle Sitzung des Fachausschusses stattfinden. Nach dem Ende der Einspruchsfrist zur neuen DEGA-Richtlinie 103-1 Anfang Oktober wird dieses Thema dort ausführlich zu besprechen sein. Weitere Themen aus dem Fachausschuss sind jederzeit willkommen. Geplant ist, die Sitzung des Fachausschusses wiederum hybrid durchzuführen. Am Vorabend 22.11.2023 besteht die Möglichkeit zu einem realen gemeinsamen Event – dazu weiteres mit der Einladung.

Weiterhin ist auf die 23. Informationsveranstaltung für Schallschutzprüfstellen am 20.09.2023 in der PTB Braunschweig hinzuweisen. Schließlich findet am 14./15.11.2023 in Ilmenau das diesjährige DEGA-Symposium statt, siehe Ankündigung auf Seite 46 dieser Ausgabe des Akustik Journals. ■

*Christian Nocke,
Henning Alpei,
Tobias Kirchner*

Fachausschuss Fahrzeugakustik



Vorsitzender:

Prof. Dr. M. Ercan Altinsoy, Technische Universität Dresden

ercan.altinsoy@tu-dresden.de

Der diesjährige Herbstworkshop des Fachausschusses findet am 19.–20.09.23 an der FH Dortmund in Dortmund statt. Alle Mitglieder sind herzlich eingeladen. Es sind noch einige Vortragsslots frei. Die Mitglieder können uns (E-Mail: s. o.) ihre Themenvorschläge und Vortragsangebote übermitteln. Die Mitglieder erhalten zu einem späteren Zeitpunkt eine Einladung per E-Mail und die Agenda. ■

Ercan Altinsoy

Fachausschuss Hörakustik



Vorsitzender:

Prof. Dr. Bastian Epp, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby
bepp@elektro.dtu.dk

Der Fachausschuss „Hörakustik“ hat auf der vergangenen Sitzung eine neue Leitung gewählt. Wir freuen uns über das entgegengebrachte Vertrauen und freuen uns darauf, den Fachausschuss und die DEGA weiterzuentwickeln. Wir danken Janina Fels für ihren langjährigen Einsatz als Leitung des Fachausschusses und dass Sie uns erfolgreich durch die Schwierigkeiten der Pandemie geführt hat!

Wir freuen uns über die vielen neuen Mitglieder. Zusammen wollen wir die Rolle der Hörakustik hervorheben. Neben einem Projekt zur Hantierung interdisziplinärer Forschungsdaten gibt es weitreichende Ideen, die Hörakustik innerhalb und außerhalb des Faches sichtbar zu machen. Nicht nur Fragestellungen zur E-Mobility und zur Energiewende, sondern auch technologische und physiologische Fragestellungen sind von wachsender Relevanz. Gemeinsam können und wollen wir einen entscheidenden Beitrag zur Beantwortung dieser Fragen und zur gesellschaftlichen Entwicklung leisten.

Bis zur nächsten DAGA arbeiten wir darauf hin, den Fachausschuss innerhalb der DEGA zu positionieren und im Programm der DAGA sichtbar zu machen. Wir freuen uns darauf, zusammen mit Ihnen zusammen, unser Fach zu promovieren und weiterzuentwickeln.

Wir stehen jederzeit für Fragen und Anregungen zur Verfügung! ■

*Bastian Epp,
Robert Baumgartner*

Fachausschuss Lärm: Wirkungen und Schutz



Vorsitzender:

Dr. Florian Schelle, Institut für Arbeitsschutz der DGUV, St. Augustin,
fa-laerm@dega-akustik.de

Am 08. März 2023 fand im Rahmen der DAGA in Hamburg die jährliche Sitzung des Fachausschusses „Lärm: Wirkungen und Schutz“ mit 32 Teilnehmenden vor Ort statt. Neben Berichten über die Aktivitäten des vergangenen Jahres sowie aus der Geschäftsstelle wurden unter anderem kommende Veranstaltungen, Termine und Aktivitäten besprochen. Für das Februar-Heft 2024 des Akustik Journals ist ein ausführlicher Beitrag

seitens des Fachausschusses vorgesehen. Themenvorschläge und Rückfragen können gerne bis Ende August an die Fachausschuss-Leitung gerichtet werden. Weiterhin wurde angeregt, eine Übersichtsseite zu bestehenden Regelwerken zum Thema „Lärm“ zu erstellen. Anhand des Themas „Lärm am Arbeitsplatz“ wird ein erster Entwurf erstellt. Weitere Übersichten zu fachlichen Schwerpunkten des Fachausschusses sollen folgen, beispielsweise wurde bereits im Rahmen der Mitgliederversammlung eine entsprechende Übersicht zum Thema „Soundscapes“ vorgeschlagen. Hier freuen wir uns über aktive Mitgestaltung, weitere Ideen und Anregungen.

An der DAGA 2023 in Hamburg war der Fachausschuss unter anderem mit den strukturierten Sitzungen „Lärm am Arbeitsplatz“ sowie „Wirkungsbezogene Lärmbewertungsmaße“ beteiligt. Auch im Rahmen der bevorstehenden DAGA (18.–21. März 2024 in Hannover) sollen wieder strukturierte Sitzungen veranstaltet werden, wobei aktuell neben

„Lärm am Arbeitsplatz“ auch die Themen „Soundscapes“ und „Schienenverkehrslärm“ angedacht sind.

Für den November dieses Jahres (14./15.11.2023) ist außerdem die Durchführung eines DEGA-Symposiums zum Thema „Akustik und Lärm in Büros und Schulen“ geplant. Eine ausführliche Ankündigung findet sich in der Rubrik „Veranstaltungen“ in der vorliegenden Ausgabe des Akustik Journals (siehe S. 46).

Die nächste Sitzung des FA „Lärm: Wirkungen und Schutz“ findet im Rahmen der DAGA 2024 in Hannover statt. ■

Florian Schelle

SOUND CAM Ultra

ab 8.799€

Neu!
SoundCam Ultra mit optionaler IR Kamera

Zeitgleiche Erfassung vom Wärmebild und dem akustischen Bild
Inkl. Analysesoftware für Akustik, Leckagen und Teilentladungen
Analyse mit Echtzeitbildgebung bis zu 100 kHz

IR Modus **Akustik Modus**

CAE Software und Systems GmbH
Tel.: +49 5241/21142-0 | Fax: +49 5241/21142-29
info@cae-systems.de | www.cae-systems.de

Qsources

**LEADING IN
NOISE & VIBRATION
EXCITATION TECHNOLOGY**

www.Qsources.be

■ Mitglieder / Fördermitglieder

Derzeit hat die Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.

- 2 005 persönliche Mitglieder
- und 77 Fördermitglieder (Stand Mai 2023).

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

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

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

Anzeigenmöglichkeiten im Akustik Journal

Informationen zu Einreichung und Formatierung:
<https://www.dega-akustik.de/publikationen/akustik-journal>

Kontakt: akustikjournal@dega-akustik.de



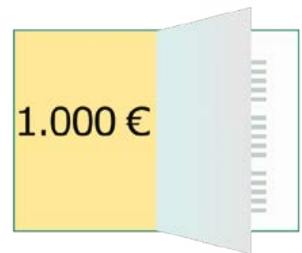
Viertelseite



Halbe Seite



Ganze Seite



U2 / U3 – Innenumschlag



U4 – Außenumschlag



Das DEGA Akustik Journal erscheint dreimal jährlich: Mitte Februar, Mitte Juni und Mitte Oktober. Die online-Version steht auf der DEGA-Webseite frei zur Verfügung. Neue Ausgaben werden allen DEGA-Mitgliedern mit einer Rundmail angekündigt. Die Druckversion erhalten rund 1900 DEGA-Mitglieder und -Fördermitglieder per Post.

Die Anzeigenpreise gelten zzgl. MwSt. Fördermitglieder der DEGA e.V. erhalten jährlich eine kostenfreie Anzeige im Format einer Viertelseite. Dieser Rabatt ist auch auf größere Formate übertragbar. Informationen zu den Vorteilen einer DEGA-Fördermitgliedschaft: <https://www.dega-akustik.de/beitritt-foerdermitglied>

Normen/Richtlinien

Neue Regelwerke zu den Themen Akustik und Lärminderung (Feb. 2023 – Juni 2023)

Bezeichnung	Titel	Preis*
Fachgebiet Audiologie / Medizintechnik		
DIN EN IEC 60118-16	Elektroakustik – Hörgeräte – Teil 16: Begriffe und Verifikation von Hörgeräteeigenschaften (IEC 60118-16:2022); Deutsche Fassung EN IEC 60118-16:2022	113,20 €
Fachgebiet Bau- und Raumakustik		
DIN EN 17823	Akustische Eigenschaften von Bauteilen und von Gebäuden – Prüfstandsmessungen der Trittschalldämmung von Treppen und Treppen-Entkopplungselementen; Deutsche und Englische Fassung prEN 17823:2022	102,20 €
DIN EN ISO 16032	Akustik - Messung des Schalldruckpegels von haustechnischen Anlagen oder Aktivitäten in Gebäuden – Standardverfahren (ISO/DIS 16032:2023); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 16032:2023 (Einspruchsfrist: 14.06.2023)	102,20 €
Fachgebiet Elektroakustik / Messtechnik		
DIN 15589-2	Tonwiedergabe im digitalen Kino – Teil 2: Elektroakustische Ausstattung eines Kinos	102,20 €
DIN EN 61094-2/A1	Elektroakustik – Messmikrofone – Teil 2: Primärverfahren zur Druckkammer-Kalibrierung von Laboratoriums-Normalmikrofonen nach der Reziprozitätsmethode (IEC 61094-2:2009/AMD1:2022); Deutsche und Englische Fassung EN 61094-2:2009/A1:2022	54,40 €
DIN EN ISO 26101-1	Akustik – Verfahren für die Qualifizierung von Freifeld-Prüfumgebungen – Teil 1: Qualifizierung von Freifeldumgebungen (ISO 26101-1:2021); Deutsche Fassung EN ISO 26101-1:2022	95,30 €
DIN EN ISO 26101-2	Akustik – Prüfverfahren zur Qualifizierung der akustischen Umgebung – Teil 2: Bestimmung der Umgebungskorrektur (ISO/DIS 26101-2:2023); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 26101-2:2023	95,30 €
DIN EN ISO 3744	Akustik – Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene (ISO/DIS 3744:2023); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 3744:2023	162,60 €
DIN EN ISO 5114-1	Akustik – Bestimmung der Unsicherheiten von Schallemissionsmessgrößen – Teil 1: Bestimmung von Schallleistungspegeln aus Schalldruckmessungen (ISO/DIS 5114-1:2023); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 5114-1:2023	108,00 €
Fachgebiet Lärmschutz		
DIN EN 13819-1/A1	Gehörschützer - Prüfung – Teil 1: Physikalische Prüfverfahren; Deutsche und Englische Fassung EN 13819-1:2020/prA1:2023 (Einspruchsfrist: 21.06.2023)	47,30 €
DIN EN 352-2/A1	Gehörschützer – Allgemeine Anforderungen – Teil 2: Gehörschutzstöpsel; Deutsche und Englische Fassung EN 352-2:2020/prA1:2023 (Einspruchsfrist: 21.06.2023)	40,50 €

Bezeichnung	Titel	Preis*
DIN EN ISO 9612	Akustik – Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 (Ingenieurverfahren) (ISO/DIS 9612:2023); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 9612:2023	140,80 €
DIN ISO 13472-1	Akustik – Messung der Schallabsorptionseigenschaften von Straßenoberflächen vor Ort – Teil 1: Freifeldverfahren (ISO 13472-1:2022); Text Deutsch und Englisch	108,00 €
Fachgebiet Maschinen- und Fahrzeugakustik		
DIN 45672-3	Schwingungsmessung an Schienenverkehrswegen – Teil 3: Prognoseverfahren auf Basis von Terzspektren	108,00 €
DIN EN 17682	Bahnanwendungen – Infrastruktur – Elastisches Element für Masse-Feder-Systeme; Deutsche Fassung EN 17682:2022	118,70 €
DIN EN IEC 61400-50-3*VDE 0127-50-3	Windenergieanlagen – Teil 50-3: Verwendung von auf der Gondel montierten LiDARs für Windmessungen (IEC 61400-50-3:2022); Deutsche Fassung EN IEC 61400-50-3:2022	128,69 €
DIN EN ISO 11202	Akustik – Geräuschabstrahlung von Maschinen und Geräten – Bestimmung von Emissions-Schalldruckpegeln am Arbeitsplatz und an anderen festgelegten Orten unter Anwendung angenäherter Umgebungskorrekturen (ISO 11202:2010 + Amd.1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 11202:2010 + A1:2021	140,80 €
DIN ISO 10844	Akustik – Anforderungen an Prüfstrecken zur Messung der Geräuschemission von Straßenfahrzeugen und ihren Reifen (ISO 10844:2021); Text Deutsch und Englisch	102,20 €
DIN ISO 20816-3	Mechanische Schwingungen – Messung und Bewertung der Schwingungen von Maschinen – Teil 3: Industriemaschinen mit einer Leistung über 15 kW und Betriebsdrehzahlen zwischen 120 min ⁻¹ und 30000 min ⁻¹ (ISO 20816-3:2022)	102,20 €
Fachgebiet Ultraschall / Hydroakustik		
DIN EN ISO 18563-3	Zerstörungsfreie Prüfung – Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschall-Prüfausrüstung mit phasengesteuerten Arrays – Teil 3: Vollständige Prüfsysteme (ISO/DIS 18563-3:2023); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 18563-3:2023	118,70 €

*) Download

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

Publikationen

Übersicht

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

	Name	gedruckt	online
Zeitschrift	Akustik Journal (drei Ausgaben pro Jahr)	0 € ¹⁾	X
	Acta Acustica®		X
Tagungsbände	DAGA-Tagungsbände „Fortschritte der Akustik“ (1970–2021)		X ²⁾
	Proceedings ICA / INTER-NOISE		X ³⁾
Empfehlungen und Memoranden	DEGA-Empfehlung 101: Akustische Wellen und Felder		X
	DEGA-Empfehlung 102: Mindestkanon Akustik in der Bachelor-Ausbildung		X
	DEGA-Empfehlung 103: Schallschutz im Wohnungsbau – Schallschutzausweis ⁴⁾		X
	Memorandum „Die allgemein anerkannten Regeln der Technik in der Bauakustik“ (DEGA BR 0101)		X
	Memorandum „Schallschutz im eigenen Wohnbereich“ (DEGA BR 0104)		X
	Memorandum zur Durchführung und Dokumentation von Audio-Produktionen für wissenschaftliche Anwendungen in der Akustik (DEGA VA 1201)		X
	Memorandum „Beurteilung der Geräusche gebäudetechnischer Anlagen“ (DEGA BR 0105)		X
	Memorandum „Tieffrequente Schallübertragung von schwimmenden Estrichen“ (DEGA BR 0106)		X
Schriftenreihe „Geschichte der Akustik“	Heft 1: Von der Antike bis in das 20. Jahrhundert	10,00 €	
	Heft 2: Akustisches Wissen auf den Transferwegen	10,00 €	
	Heft 3: Preisträger europäischer Wissenschaftsakademien	10,00 €	
	Heft 4: Sondhauß-Röhre, Seebeck-Sirene	15,00 €	
	Heft 5: Von den Äolstönen bis zur Strouhal-Zahl	32,95 € ⁵⁾	
	Heft 6: Von der Luftsirene bis zur russischen Aeroakustik	29,95 € ⁵⁾	
	Heft 7: Lord Rayleigh, Sir Horace Lamb, Sir James Lighthill	22,95 € ⁵⁾	

	Name	gedruckt	online
	Heft 8: Große Wissenschaftler mit Beiträgen zur Akustik	32,95 € ⁵⁾	
	Heft 9: Kundt, Waetzmann, Schuster	26,95 € ⁵⁾	
	Heft 10: Eberhard Zwicker, Lothar Cremer und Manfred Heckl	32,95 € ⁵⁾	
	Heft 11: Erwin Meyer, Heinrich Barkhausen und Walter Reichardt	44,00 € ⁵⁾	
Fachgebiet Lärm	YouTube-Video „So klingt meine Welt“		X
	YouTube-Videos „Noisella lehrt Akustik“		X
	Video zum Thema „Partizipation“ (Tag gegen Lärm)		X
	Hörbeispiele und Geräuschsituationen		X
	Mitschnitt (Video) des ALD-Panels „Fluglärm“ vom 03.12.2021		X
	Mitschnitt (Video) des ALD-Panels „Gesamtlärm“ vom 01.04.2022		X
	Mitschnitt (Video) des ALD-Panels „Windradlärm“ vom 02.12.2022		X
	Broschüre „Lärm im Alltag“		X
	ALD-Broschüre „Energiewende und Lärmschutz“ (2016)	2,00 €	X
	ALD-Broschüre „Schienenverkehrslärm – Ursachen, Wirkungen, Schutz“ (2018)	2,00 €	X
	ALD-Broschüre „Straßenverkehrslärm“ (2021)		X
	ALD-Broschüre „TEchnologies of NOise Reduction (TENOR)“		X
Fachgebiet Musikalische Akustik	Tagungsband (2015) „Musikalische Akustik zwischen Empirie und Theorie“		X
	Tagungsband (2013) „Nuancen in der musikalischen Akustik“		X
	Tagungsband „International Symposium on Music Acoustics“ (ISMA 2019)		X
	Literaturdatensammlung Musikalische Akustik		X
Fachgebiet Lehre der Akustik	Dissertationsregister Akustik		X
	Studienführer „EAA Schola“		X
	YouTube-Video „Faszination Akustik – Eine Reise durch die Welt des Schalls“		X
Fachgebiet Hörakustik	Kompodium zur Durchführung von Hörversuchen in Wissenschaft und industrieller Praxis (Entwurf)		X

¹⁾ für Mitglieder

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

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

⁴⁾ hierzu neue Richtlinie im Mai 2023 als Entwurf veröffentlicht, siehe Seite 51

⁵⁾ Preise ohne Gewähr; Bestellungen ausschließlich über <https://westarp-bs.de>

Impressum

Akustik Journal Nr. 02 / Juni 2023

Herausgeber

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

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

Geschäftsstelle:

Alte Jakobstraße 88

10179 Berlin

E-Mail: dega@dega-akustik.de

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

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

Web: www.dega-akustik.de

ISSN

2569-1597 (Print)

2569-1600 (Online)

Chefredaktion

Prof. Dr.-Ing. Detlef Krahé

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

Stv. Chefredaktion

Dr. rer. nat. Christian Koch

Redaktionsbeirat

Prof. Dr.-Ing. habil. Ercan Altinsoy

Prof. Dr. rer. nat. Bastian Epp

Prof. Dr. phil. André Fiebig

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

Prof. Dr.-Ing. Malte Kob

Prof. Dr.-Ing. Ennes Sarradj

Prof. Dr.-Ing. Schew-Ram Mehra

Redaktionsassistentz

Dipl.-Ing. Evelin Baumer

Dr.-Ing. Martin Klemen

Anzeigen

Runhild Arnold-Schwandt (M. A.)

E-Mail: ras@dega-akustik.de

Julia Zech (M. A.)

E-Mail: julia.zech@dega-akustik.de

Layout und Satz

Dipl.-Ing. Evelin Baumer

E-Mail: ebaumer@dega-akustik.de

Gestaltungskonzept

Heilmeyer und Sernau Gestaltung

Web: www.heilmeyerundserna.com/

Druck

Königsdruck Printmedien und digitale
Dienste GmbH

Web: www.koenigsdruck.de

Bildnachweise

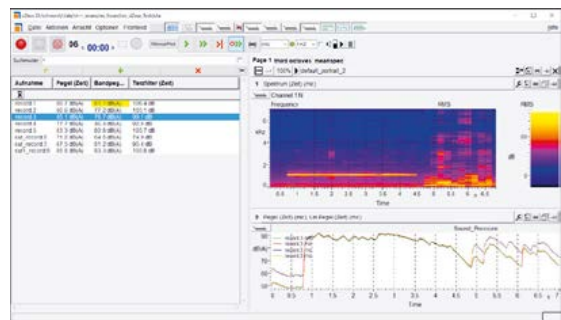
S. 1 – Titelseite © Claudia Lenk, Ilmenau; S. 3 – Editorial © HEAD acoustics GmbH, Herzogenrath; S. 5 – Aktuelles: Tag gegen Lärm 2023, Logo © Viktoria Vorländer, Aachen; Ursprungsbilder: Morenovel, Shutter2U, Marc Xavier, Ralf Gosch, filmbildfabrik, IckeT / stock.adobe.com; S. 39 – Ehrungen der DEGA: Preisträger:innen (B. Schulte-Fortkamp, L. Claes, P. A. Bereuter, J. Seitz) © Gilbert Studios, Jesteburg; S. 43 – Veranstaltungen: EAA-Logo © mit freundlicher Genehmigung der EAA; S. 43 – Veranstaltungen: Forum Acusticum 2023, Logo © mit freundlicher Genehmigung der EAA; S. 45 – Veranstaltungen: DEGA-Akademie „Grundlagen der Technischen Akustik“, Logo © Ennes Sarradj, Berlin; S. 47 – Veranstaltungen: DAGA 2024, Logo © Ina Platte, inani-design.de; S. 47 – Veranstaltungen: DAGA 2024, Neues Rathaus und Tramplatz © Lars Gerhards; S. 48 – Veranstaltungen: DAGA 2024, Tagungszentrum: Luftaufnahme HCC © Hannover Tourismus; S. 48 – Veranstaltungen: DAGA 2024, Schloss Herrenhausen © Nik Barlo jr.; mit freundlicher Genehmigung der Hannover Marketing & Tourismus GmbH; S. 49 – Veranstaltungen: Tag gegen Lärm 2023, Logo © Viktoria Vorländer, Aachen; Ursprungsbilder: Morenovel, Shutter2U, Marc Xavier, Ralf Gosch, filmbildfabrik, IckeT / stock.adobe.com; S. 44 – DEGA: Fachausschuss Bau- und Raumakustik © Silvia Crisman / fotolia.com; S. 57/58 – DEGA: Fachausschuss Bau- und Raumakustik, Teilnehmer:innen der Exkursion © Lars-Eric Reimer; S. 58 – DEGA: Fachausschuss Fahrzeugakustik © Novicos GmbH, Hamburg; S. 58 – DEGA: Fachausschuss Hörakustik © psdesign1 / fotolia.com; S. 59 – DEGA: Fachausschuss Lärm: Wirkungen und Schutz © A.F.X. Süß, Berlin, Copyright DEGA e. V.



LivePad-X



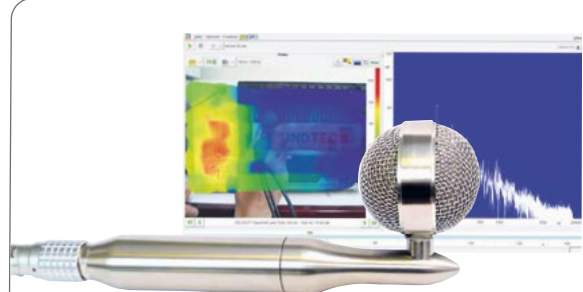
LiveRec24+



siZeus



siTracer



SoundFlow Sensor



15 % Sommer -
Sonderrabatt
bis 31.08.2023

SINUS
Messtechnik GmbH



NoisePAD als Human Vibration Analyzer

NoisePAD ist das ideale 4-Kanal Messgerät zur simultanen Messung von Lärm- und Vibration am Arbeitsplatz. Es entspricht den Arbeitsschutzverordnungen für Lärm- und Vibrationsbelastungen. NoisePAD erlaubt in Kombination mit den zugehörigen Sensoren die Vibrationsmessungen für Ganzkörper- und Hand-Arm-Vibrationen nach ISO 8041, ISO 5349, ISO 2631 und normgerechte Schallpegelmessungen nach IEC 61672 sowie Messung der Nachhallzeit.

NoisePAD hat einen integrierten Windows PC mit Touchscreen, 128 GB SSD, 4G Modem, USB und GPS. Die integrierten Kameras ermöglichen eine Videodokumentation und das WLAN Interface gestattet die Fernbedienung der Messung.



- **HVMA-Messgrößen:**
Momentan, Exposition, Spitze, Max, Min, CF, Peak, VDV, MTVV, A(8), ahv, ahw, awd, awk, RMS
- **Frequenzbewertung:**
W none, W c, W d, W g, W j, W k, W b, W b_comb, W m, W db, W h, W a, W v,
- **Vektorbildung in Echtzeit mit Achsenwichtung**
- **Schallpegelmesser Klasse 1 IEC 61672 LAeq, LCpeak, LCeq zur Auswahl von Gehörschutz, impulsbewertete Schalldruckpegel LAeq, Nachhallzeit**
- **Parallele Aufzeichnen von Zeitsignalen, FFT- Oktav- u. Terzanalyse, Schwingungszeitverlauf, Multispektren, Videodokumentation**

Kontakt

SINUS Messtechnik GmbH

Föppelstrasse 13
04347 Leipzig

• Tel.: +49 341 24429-0
• Fax.: +49 341 24429-99

• www.soundbook.de
• info@soundbook.de