

Entwicklung interaktiver Akustik-Apps für die Lehre in der Akustik

Kooperationsprojekt der jungen DEGA

Mert Dogu, Mihaly Barany, Tabea Breitkreutz, Yvonne Heggemann, Luis Enrique Roca Paz

Editoren: Michael Buba, Simon Kersten, Johannes Schmid

Studierende verschiedener deutscher Universitäten und Hochschulen haben im Rahmen eines einjährigen Kooperationsprojekts unter der Schirmherrschaft der jungen DEGA akustische Simulationsapps mit Hilfe der Multiphysics Software COMSOL entwickelt. Die entwickelten Apps bieten eine intuitive und spielerische Möglichkeit, Schüler:innen und Studierenden die teils sehr komplexen Phänomene der Akustik näherzubringen und zu visualisieren. Die teilnehmenden Institute brachten hierbei ihr Fachwissen ein, so dass Apps zu Bereichen der Vibroakustik, Höraustik und der musikalischen Akustik entstanden sind. Benutzer:innen können bei der Nutzung der Apps die Randbedingungen und Geometrien verändern, so dass die Apps nutzerspezifisch angepasst werden können. Die Apps können über die Webseite des Lehrstuhls für Akustik mobiler Systeme der Technischen Universität München unter <https://www.epc.ed.tum.de/vib/news-single-view/article/dega-simulations-apps> abgerufen werden und sind ohne Lizenz frei verfügbar.

Ausgangspunkt und Ablauf des Projekts

Die Fachgruppe junge DEGA vereint junge Akustiker:innen im Studium oder in den ersten Berufsjahren innerhalb der DEGA mit dem Ziel, ein Netzwerk aufzubauen und den fachlichen Austausch zu fördern. Vor diesem Hintergrund wurde gemeinsam mit dem Fachausschuss Lehre ein DEGA-Projekt für eine hochschulübergreifende Entwicklung interaktiver Akustik-Apps beantragt und im vergangenen Jahr gefördert. Unter der Federführung des Lehrstuhls für Akustik mobiler Systeme der Technischen Universität München beteiligten sich Studierende des Instituts für Hörtechnik und Akustik der RWTH Aachen, der Hochschule Mittweida sowie des Erich-Thienhaus-Instituts der Hochschule für Musik Detmold, die die Apps als studentische Hilfskräfte oder im Rahmen von praktischen Projekten entwickelten. Begleitet wurde das Projekt von wissenschaftlichen Mitarbeitern der TU München und der RWTH Aachen. Des Weiteren wurde das Projekt von den Professor:innen der jeweiligen Institute unterstützt. Die Koordination des Projekts übernahmen die Studierenden untereinander. Ab Januar 2023 wurden

Development of interactive acoustics apps – Cooperation project of the junge DEGA

In a one-year cooperation project under the guidance of the junge DEGA, students from various German universities have developed acoustic simulation apps using the multiphysics software COMSOL. The apps offer an intuitive and hands-on opportunity to familiarize pupils and students with the often complex phenomena of acoustics. The participating institutes contributed their expertise, resulting in apps in the fields of vibro-acoustics, hearing acoustics, and musical acoustics. Users can change the boundary conditions and geometries to allow user-defined usage of the apps. The apps can be accessed via the website of the Chair of Vibroacoustics of Vehicles and Machines at the Technical University of Munich at <https://www.epc.ed.tum.de/vib/news-single-view/article/dega-simulations-apps> and are freely available without any license.

gemeinsame Online-Treffen initiiert, um organisatorische Abläufe und die Erwartungen an das Projekt zu klären. Anschließend wurden die Themen für mögliche Apps festgelegt und mit der Einarbeitung in die Simulationssoftware angefangen. In monatlichen Treffen wurde der Fortschritt in der Entwicklung der Simulationen besprochen und gemeinsam unter dem Aspekt des fachlichen Austausches diskutiert. Zum Ende des Projekts wurden die Apps im gegenseitigen Review besprochen und Dokumentationen angefertigt.

Entwicklung der Apps

Aufbauend auf bereits bestehenden Akustik-Apps, welche vom Lehrstuhl für Akustik mobiler Systeme auf Basis von COMSOL Multiphysics [1–3] entwickelt wurden (siehe auch Akustik Journal 03/2018), entstanden insgesamt vier neue Apps, bei denen die Studierenden die verschiedenen Expertisen ihrer Institute und Hochschulen einbringen konnten. Die Apps sind auf der Webseite des Lehrstuhls für Akustik mobiler Systeme (siehe <https://www.epc.ed.tum.de/vib/news-single-view/article/dega-simulations-apps>) kosten-

frei für die Öffentlichkeit zugänglich und können frei in der Lehre sowie für akademische Zwecke genutzt werden. Im Allgemeinen können Benutzer:innen beim Öffnen der Applikationen zunächst die geometrischen und parametrischen Randbedingungen definieren. Anschließend können über verschiedene Funktionen im Menüband die Berechnungsdetails angezeigt, sowie die Simulation gestartet werden. Die Ergebnisse werden dann auf einem Web-Server, unabhängig vom Endgerät, auf dem die App geöffnet wurde, berechnet und im Anschluss lassen sich die Berechnungsergebnisse visuell und interaktiv in der App darstellen. Zudem lassen sich die Visualisierungen in einigen Fällen herunterladen und lokal speichern. Im Folgenden werden die an den beteiligten Instituten entwickelten Apps vorgestellt und deren Verwendung im Hinblick auf die Lehre in der Akustik erläutert.

Akustische Diffusoren: Schroeder-Diffusor und Metooberflächen

Mert Dogu

Lehrstuhl für Akustik mobiler Systeme, TU München

Funktion

Ziel der vorgestellten App ist es, den Schroeder-Dif-

fusor und den metooberflächen-basierten Schroeder-Diffusor (siehe Abbildung 1 auf der folgenden Seite) zu vergleichen und zu veranschaulichen, wie der Streukoeffizient im Frequenzbereich in Bezug auf die akustische Druckschnittstelle berechnet wird. Der für die App ausgewählte Schroeder-Diffusor basiert auf der primitiven Wurzelfolge mit sieben als ungerader Primzahl, was einen Diffusor mit sechs Vertiefungen ergibt. Die Studie wird in 2D durchgeführt, um die Anzahl der Freiheitsgrade in der Simulation zu reduzieren. Im Fall des Schroeder-Diffusors werden zwei Fälle in Betracht gezogen: (1) Ein einzelner Diffusor, der in einer unendlichen Schallwand versenkt ist; (2) Eine Anordnung von drei nebeneinander liegenden Diffusoren mit insgesamt 18 Vertiefungen, die in einer unendlichen Schallwand versenkt sind. Im Falle des metooberflächen-basierten Diffusors wird als Vergleichsbeispiel nur der Fall des einzelnen Diffusors, der in einer unendlichen Schallwand versenkt ist, betrachtet. Mit Hilfe verschiedener Anordnungen kann für beide Diffusortypen der Effekt der Periodizität untersucht werden. Dabei können in den Schroeder-Diffusoren sowie der metooberflächen-basierte Schröder-Diffusor die Tiefen und die Breiten der Einbuchtungen variiert werden, um die unterschiedlichen Einflusseffekte der Geometrie darzustellen.

Hintergrund

In den 1970er Jahren verfasste Manfred Schroeder zwei wegweisende Artikel, die sich auf die Prinzipien der Schallstreuung mithilfe von Diffusoren mit maximaler Längenfolge und quadratischen Restfolgen konzentrierten [4; 5]. Diese Arbeiten ebneten den Weg für das Feld der Schalldiffusoren und boten Anwendungsmöglichkeiten in der Architekturakustik, der Lärmbekämpfung, der Ultraschallbildgebung und inspirierten Fortschritte bei photovoltaischen Zellen zur Energiegewinnung [6–8]. In der Raumakustik werden diese Diffusoren eingesetzt, um Reflexionen in alle Richtungen zu verteilen, unerwünschte Spiegelungen und Echos zu mindern und gleichzeitig die Schallenergie in einem Raum effektiv zu erhalten [6]. Im Gegensatz zu Schallabsorbern, die die Energie in einem Raum reduzieren, finden Diffusoren Anwendung in Räumen, in denen beispielsweise unverstärkte Aufführungen stattfinden. Sie verbessern die Raumakustik, die Sprachverständlichkeit und reduzieren den Straßenlärm in städtischen Umgebungen [9; 10; 11]. Schroeders Innovation liegt in der Gestaltung von Diffusoren auf der Grundlage von Zahlentheoriefolgen, um eine vorhersehbare und optimale Streuung zu erreichen. Das Prinzip dieses Diffusortyps besteht darin, dass jede Vertiefung die einfallende Welle mit einer anderen Phasenverschiebung wieder abstrahlt, was zu Interferenzen zwischen den von den verschiedenen Vertiefungen abgestrahlten Wellen führt. Dies bedeutet, den Schall gleichmäßig in alle Richtungen zu streuen, unabhängig vom Einfallswinkel.

Trotz des bemerkenswerten Erfolgs von Schroeders Diffusoren weisen diese eine gitterartige Struktur mit erheblicher Dicke auf, die oft die Hälfte der Wellenlänge bei der Designfrequenz erreicht. Die sperrigen Abmessungen von Schroeder-Diffusoren begrenzen zwangsläufig ihre Anwendung auf mittlere und hohe Frequenzen, und sind unpraktisch für niedrige Frequenzen. Zusätzlich fügen sich herkömmliche Schroeder-Diffusoren oft nicht in die visuelle Ästhetik eines Raums ein.

Alternativ können neue Ansätze von ultradünnen und planaren Schroeder-Diffusoren, die auf dem Konzept der akustischen Metooberfläche basieren, für tieffrequente Probleme in Betracht gezogen werden [12; 13]. Die Forschung zu akustischen Metamaterialien und Metooberflächen zeigt, dass diese Eigenschaften aufweisen, die in natürlichen Materialien nicht vorhanden sind, wie einen negativen Brechungsindex, negative effektive Masse sowie ein Kompressionsmodul. Noch wichtiger ist, dass der metooberflächen-basierte Schroeder-Diffusor wesentlich dünner ist und über eine planare Konfiguration verfügt, wodurch er sich besser für Anwendungen im Bereich der niedrigen Frequenzen in der Raumakustik oder anderen verwandten Bereichen eignet. Die Einheit des metooberflächen-basierten Schroeder-Diffusors ist ein lokal resonantes Element mit einer einfachen Geometrie, die in den meisten Fällen auf einem Resonator-Hohlraum basiert. Seine akustische Reaktion kann flexibel und präzise durch Anpassung eines einzelnen geometrischen Parameters gestaltet werden, was eine bequeme analytische Vorhersage seiner akustischen Phasenreaktion ermöglicht.

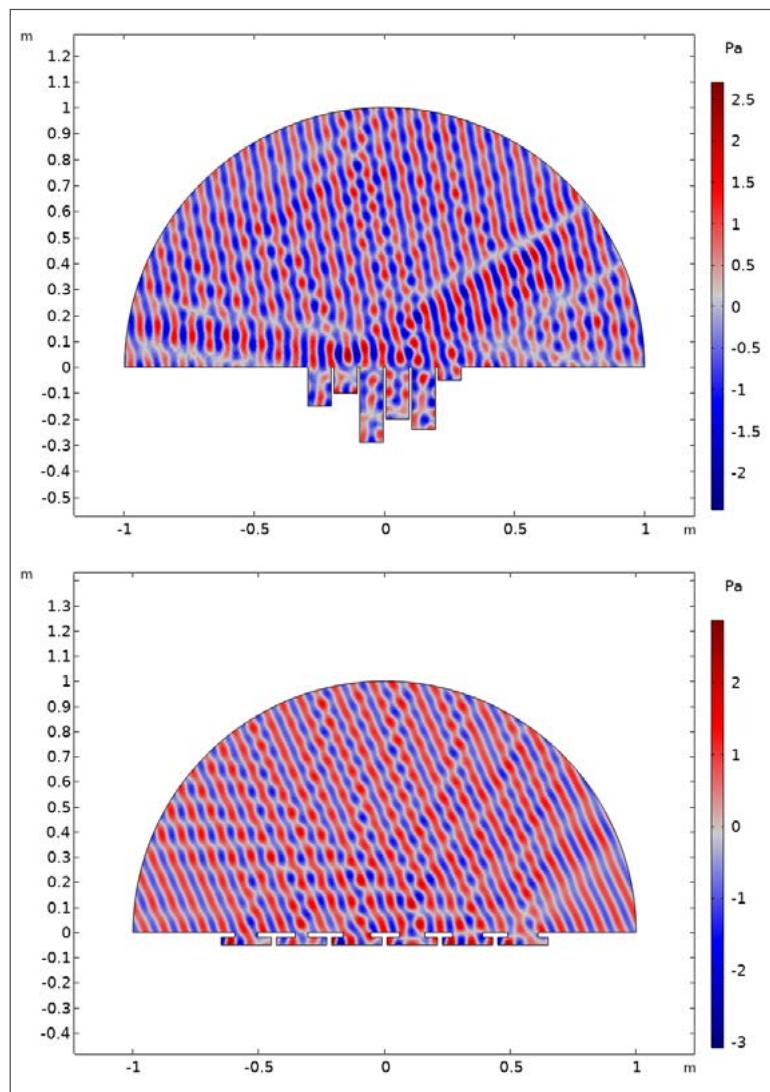


Abb. 1: Visualisierung des Schalldruckfelds eines Schröder-Diffusors (oben), sowie des metaoberflächenbasierten Schröder-Diffusors (unten).

Die App ermöglicht die visuelle Darstellung des Schalldruckpegels und der Schalldruckverteilung im Raum. Dies erfolgt basierend auf verschiedenen Einfallswinkeln, die von -80° bis 80° in 10° -Schritten variiert werden können, was zu insgesamt 17 Einfallswinkeln pro Oktavband führt. Eine ebene Welle mit Einfallswinkel von der y-Achse wird als auf die Diffusoranordnung eintreffend definiert. Es werden Oktavbänder von 125 Hz bis 4 000 Hz mit 6 Frequenzen pro Band berücksichtigt. Ein visuelles Strahlungsmuster des Schalldruckpegels und des Drucks in der Polarplot-Darstellung wird bereitgestellt, um den Effekt der Abstrahlung je nach Einfallswinkel darzustellen. Zudem wird ermöglicht, für jede Konfiguration den Streukoeffizienten (“Scattering coefficient”) der gewählten Oberflächengeometrie zu berechnen. Der Streuungskoeffizient ist definiert als das Leistungsverhältnis

$$s = 1 - \frac{P_{\text{spec}}}{P_{\text{tot}}}$$

wobei P_{spec} die in Spiegelungsrichtung reflektierte Leistung und P_{tot} die gesamte reflektierte Leistung ist. Sie werden basierend auf der Auswertung der Schallintensität auf einem Halbkreis mit einem Radius von zehn Metern mit einer Außenfeldberechnung evaluiert.

Simulation der ‚Head related transfer function‘

Mihaly Barany

Institut für Hörentechnik und Akustik, RWTH Aachen

Funktion

Die Head-Related Transfer-Function (HRTF) wurde für eine 3D-gescannte Geometrie eines menschlichen Kopfes und Rumpfes berechnet (siehe Abbildung 2). Das Grundmodell wurde bereits in der COMSOL-Applikationsgalerie zur Verfügung gestellt und für die App erweitert. Es wurden zwei verschiedene Simulationen mittels der Boundary Element Method (BEM) durchgeführt, eine für das linke und eine für das rechte Ohr, so dass die Unterschiede in der Schallwahrnehmung zwischen den beiden Ohren in der App verdeutlicht werden können. Anstatt die HRTF zu bestimmen, indem der Schalldruck an den Eingängen der Gehörgänge jeweils für Schallquellen an bestimmten Positionen um den Kopf herum berechnet wird, was einem Messaufbau entsprechen würde, wurde das Reziprozitätsprinzip angewandt. Hierbei wurden die Eingänge der Gehörgänge jeweils mit einer Schallschnelle in Normalenrichtung belegt und anschließend der Schalldruck an Positionen um den Kopf herum ausgewertet. Dieser reziproke Ansatz führt zu den gleichen Übertragungsfunktionen wie bei Quellen rund um den Kopf, reduziert jedoch die Anzahl der Simulationen auf nur zwei pro Frequenz. Die in der App angezeigten HRTFs sind auf den im Mittelpunkt des Kopfes gemessenen Schalldruck bezogen, als wenn der Kopf nicht vorhanden wäre. Dementsprechend bedeutet ein Wert von 0 dB, dass der Körper bei einer bestimmten Frequenz keinen Einfluss auf den Schalldruck an den Ohren hat, während negative dB-Werte auf Abschattungen und positive dB-Werte auf Verstärkungseffekte, z. B. aufgrund von Ohrmuschelresonanzen, hinweisen. Nach dem Reziprozitätsprinzip werden die Schalldruckwerte der BEM-Simulation durch den analytisch berechneten Schalldruck einer Punktquelle normalisiert, die sich in der Mitte des Kopfes befindet und deren Schallfluss dem Schallfluss an den Gehörgangseingängen entspricht [14].

Da die BEM-Simulationen viel Rechenzeit in Anspruch nehmen, ist die Anwendung mit einer vorberechneten Lösung für einen Frequenzbereich

Hintergrund

Wenn Schallsignale den Kopf erreichen, wirken sich die geometrischen Merkmale des menschlichen Körpers (der Abstand der Ohren, die Form der Ohrmuschel, des Außenohrs, des Kopfes und des Rumpfes usw.) auf das Signal an beiden Ohren aus.

Diese Informationen variieren in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung und werden daher vom Gehirn zur Lokalisierung von Schallquellen herangezogen. Eine Head-Related Transfer Function (HRTF) ist die Übertragungsfunktion, die den Einfluss des menschlichen Kopfes, des Rumpfes und des Ohres auf den Schalldruck an den Ohren beschreibt. Da sich diese Merkmale von Person zu Person unterscheiden, hat jede Person eine einzigartige HRTF. Übliche Techniken zu ihrer Bestimmung sind Messungen und numerische Simulationen. HRTFs werden in einem breiten Spektrum von akustischen Themen angewandt, von der Audiologie bis zur Synthese und Wiedergabe virtueller akustischer Szenen. Daher ist es für Studierende unerlässlich, die HRTF-Eigenschaften in entsprechenden Kursen an Universitäten zu erlernen.

Das Verständnis der HRTF als dreidimensionaler Filter ist für die Studierenden jedoch oft eine Herausforderung. Das Ziel der COMSOL-Anwendung ist es, als hilfreiches Werkzeug zu dienen, indem eine HRTF in verschiedenen Darstellungen gezeigt und ein numerischer Ansatz zu ihrer Berechnung veranschaulicht wird.

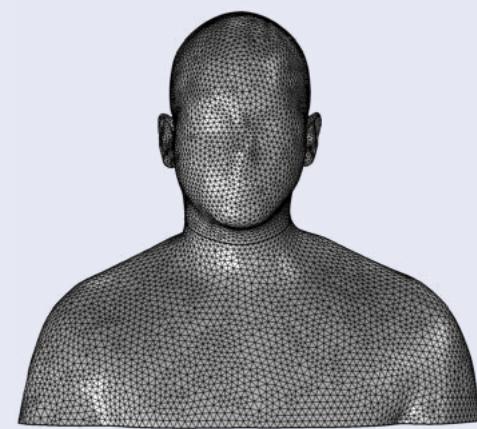


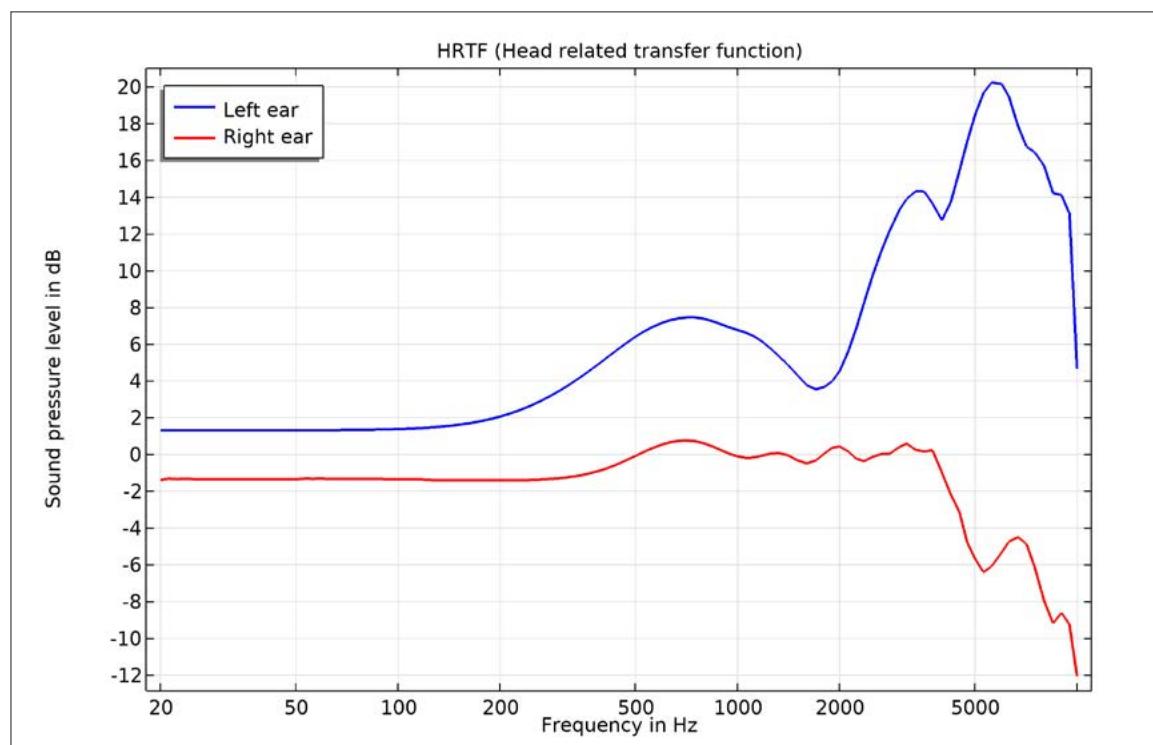
Abb. 2: Mesh des Kopf-Rumpf-Modells

von 20 Hz bis 10 kHz mit einer Frequenzauflösung von drei Frequenzen pro Oktave verfügbar. Die Benutzer:innen können zwischen verschiedenen grafischen Darstellungen wechseln, die ein tieferes Verständnis der HRTF-Eigenschaften ermöglichen. Die erste HRTF-Darstellung in der App ist die Übertragungsfunktion selbst (siehe Abbildung 3). In dieser Darstellung können die Benutzer:innen die Frequenzgänge für beide Ohren für eine bestimmte Quellposition einsehen, deren Koordinaten variiert werden können. Wie für HRTFs üblich, wird hier ein sphärisches

Koordinatensystem verwendet, dessen Mittelpunkt der Mitte des Kopfes entspricht. Die App enthält drei Regler, mit denen die Azimuth- und Elevationswinkel sowie die Entfernung eingestellt werden können. Die gewählte Position wird zusätzlich zusammen mit der Modellgeometrie in einem separaten Fenster veranschaulicht.

Neben dem Frequenzgang helfen ein Polardiagramm, Richtwirkungsdiagramme und Ballondiagramme bei der Visualisierung der räumlichen Eigenschaften der HRTF. Die Polardiagramme zeigen die Richtwirkung

Abb. 3: Frequenzgang für eine Schallquelle auf der linken Seite des Kopfs im linken Ohrkanaleingang.



in der horizontalen Ebene für eine gegebene Frequenz entlang eines Kreises, der in der Kopfmitte mit einem Radius von einem Meter zentriert ist. Weitere Plots zeigen den HRTF-Betrag farbcodiert über der Frequenz und dem Winkel entweder in der horizontalen, der mittleren oder der frontalen Ebene an. Ähnlich wie das Polardiagramm zeigt das Ballondiagramm die HRTF für eine einzelne ausgewählte Frequenz, aber in diesem Fall erfolgt die Auswertung der HRTF-Größe nicht entlang eines einzelnen Kreises, sondern entlang einer ganzen Kugel (wiederum mit einem Radius von einem Meter konzentrisch zum Kopfmittelpunkt). Zusätzlich können in der App die numerischen Ergebnisse der BEM-Simulation aufgerufen werden. Benutzer:innen haben die Möglichkeit, die spezifischen Druck- und Schalldruckpegelwerte im freien Feld und auf den Oberflächen für die Anregung an den beiden Ohren einzusehen. Dementsprechend enthalten die in diesem Abschnitt der App dargestellten Ergebnisse nicht die Normierung auf den Schalldruck einer äquivalenten Punktquelle in der Kopfmitte.

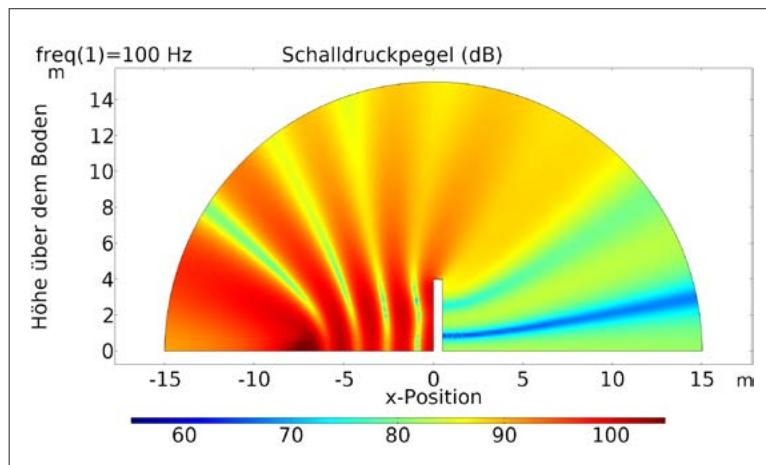
Simulation eines Schallschirms

Tabea Breitkreutz, Yvonne Heggemann
Hochschule Mittweida

Funktion

Die über die FEM berechnete Schalldrucklösung veranschaulicht, wie Schallschutzbarrieren den Schall beeinflussen. Sie zeigt, wie Schallwellen an der Barriere gebrochen, absorbiert oder reflektiert werden. Realisiert wird dies mithilfe des COMSOL Acoustics Module, von dem nur der Teilbereich Druckakustik zum Einsatz kommt. Physikalische Eigenschaften verschiedener Ausbreitungsmedien sind bereits in der App hinterlegt, weshalb hier gezielt die einzelnen Parameter Temperatur und Dichte beeinflusst werden können. Der Schallabsorptionsgrad kann in der Nutzeroberfläche

Abb. 4: Darstellung des Schalldruckpegels bei einer Frequenz von 100 Hz, unter der Bedingung, dass alle Schallabsorptionsgrade null gesetzt sind.



Hintergrund

Die Berechnung von Lärmschutzwänden nach Maekawa [15] und Kurze [16] sowie die Anwendung von RLS-19 [17], VDI 2720 [18] und DIN ISO 9613-2 [19] werden thematisiert. Ziel der Applikation ist, einen vereinfachten Schallschirm darzustellen, der in diesen Szenarien zum Einsatz kommen könnte. Als Simulationsmethode wurde die Finite-Elemente-Methode (FEM) gewählt.

Die abschirmende Wirkung eines Schallschirms ist frequenzabhängig und kann mithilfe des Abschirm- und des Einfügungsdämpfungsmaßes beschrieben werden. Das Abschirmmaß D_z beschreibt die Dämpfung, die ein unendlich langer Schallschirm der gegebenen Maße bewirken würde. Mit diesem Wert lässt sich der Immissionswert am Messpunkt gegenüber dem Schalldruckpegel, der ohne Schallschirm gemessen werden würde, abschätzen. Berechnet wird D_z nach Kurze [16, S. 42] über

$$D_z = 20 \lg \left(\frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh(\sqrt{2\pi N})} \right) \text{dB} + 5 \text{ dB}$$

mit der Fresnel-Zahl $N = 2\delta/\lambda$, die das Verhältnis zwischen der Wellenlänge λ und dem Weglängenunterschied δ , der durch den Schallschirm verursacht wird, darstellt. So bildet sie das Bindeglied zwischen den Frequenzabhängigkeiten und den daraus zu ermittelnden Abschirm- und Dämpfungsmaßen.

che eingegeben werden und fließt über die Gleichungen über die Wandimpedanz in das Modell ein. Die entsprechenden Formeln und Berechnungsergebnisse werden zur Referenz in der Seitenleiste angezeigt.

Die App zeigt den Querschnitt durch einen Schallschirm (siehe Abb. 4), der über die Schieberegler in einer Seitenleiste genauer in Höhe und Dicke angepasst werden kann. Als Darstellung wurde eine zweidimensionale Simulationsumgebung gewählt. Hier sind die akustischen Phänomene der Beugung, Brechung und Reflexion hinreichend gut erkenn- und erklärbar. Zudem wird die Rechenzeit der FEM-Berechnung im Vergleich zu einer dreidimensionalen Simulation kurzgehalten.

In der Mitte befindet sich der Schallschirm. Auf der linken Seite ist eine Punktschallquelle mit veränderbarer Quellstärke in 0,5 m Höhe platziert und stellt z. B. ein Fahrzeug auf der Fahrbahn dar. Auf der rechten Seite ist ein Messpunkt frei verschiebbar. Der Halbkreis ist mit Luft gefüllt, deren Parameter, wie z. B. Dichte und Schallgeschwindigkeit für individuelle Zwecke angepasst werden können. Um keine ungewollten Reflexionen an den Außenkanten zu

erhalten, umgibt die Rundung des Halbkreises eine Perfectly Matched Layer (PML), die in der Darstellung jedoch ausgeblendet wird. Die drei Oberflächen der Straße links, des Bodens rechts des Schallschirms und der der Straße zugewandten Seite des Schallschirms können mithilfe des Schallabsorptionsgrades α weiter beeinflusst werden.

Die Ergebnisse der Simulation werden auf zwei Arten dargestellt: im links dargestellten Plot (Abb. 4), der den Schalldruckpegel ortsabhängig für einzelne Frequenzen zeigt, und als Punktplot (Abb. 5), der den Schalldruckpegel am angegebenen Messpunkt frequenzabhängig auswertet.

Weitere Informationen zur Nutzung und fachliche Hintergründe finden sich in der Dokumentation, die über die Menüleiste abgerufen werden kann.

Simulation des Kammfiltereffekts

Luis Enrique Roca Paz

Erich-Thienhaus-Institut, Hochschule für Musik Detmold

Funktion

Für die Simulation des Kammfiltereffekts wurden zwei der häufigsten Szenarien verwendet: Kammfilterung durch Schallreflexionen und Kammfilterung durch mehrere Schallquellen. Beim Öffnen der Anwendung können die Benutzer:innen zwischen diesen beiden Szenarien wählen. Nach der Auswahl wird die obere Zeile aktiviert, die es ermöglicht, die geometrischen Parameter der Umgebung zu steuern sowie den Frequenzbereich und Vernetzungsparameter zu ändern. Zudem gibt es die Möglichkeit, zwischen zwei Standardraumgrößen zu wählen. Die Benutzer:innen können zusätzlich die Position der Quellen und Empfänger definieren und die Anzahl der Empfänger durch das Hinzufügen eines zusätzlichen Mikrofons erhöhen. Dies ermöglicht es, die Ergebnisse für verschiedene Quellenpositionen zu vergleichen.

Die Simulation der Signalverzögerung, die durch die Reflexion des Signals am Boden verursacht wird, wird aus einer seitlichen Perspektive dargestellt (siehe Abbildung 7 (links) auf der folgenden Seite).

Wichtige Annahmen für diese Simulation sind, dass der Raum aus einer seitlichen Perspektive betrachtet wird und einen reflektierenden Boden aufweist. Die Wände und Decken sind vollständig absorbierend angenommen, die Raumhöhe und -länge können variabel verändert werden.

Die zweite Simulation stellt einen Kammfilter dar, der durch mehrere Schallquellen verursacht wird. Für diese Simulationen wird der Raum aus einer in einer ebenfalls zweidimensionalen Perspektive von oben herab betrachtet (siehe Abbildung 7 (rechts) auf der folgenden Seite).

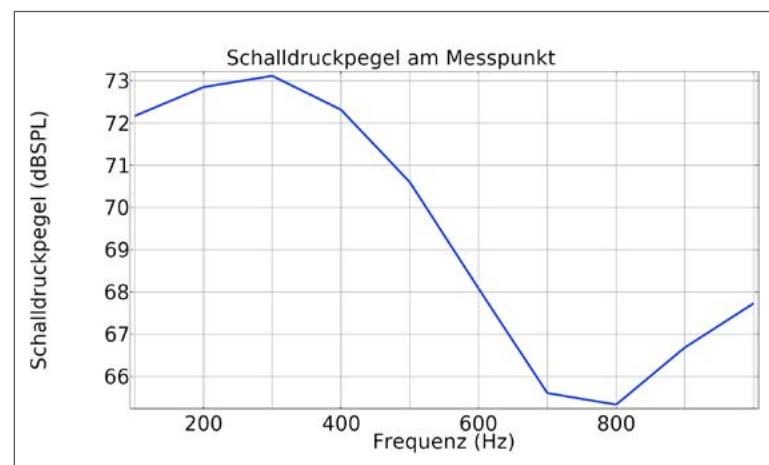


Abb. 5: Auswertung des frequenzabhängigen Schalldruckpegels am Messpunkt

Hintergrund

Der Kammfiltereffekt ist ein Phänomen, welches auftritt, wenn daselbe Signal zu unterschiedlichen Zeiten verzögert am Empfänger eintrifft. Sie kann akustisch durch Schallreflexionen an harten Oberflächen, durch mehrere Quellen, die den gleichen Ton erzeugen, oder elektronisch durch Verzögerungseffekte und Latenzzeiten entstehen. Die Überlagerung von verzögerten Signalen kann zu Interferenzeffekten führen, welche in einer Kammform des Magnitudoenspektrums resultieren (siehe Abbildung 6). [20]

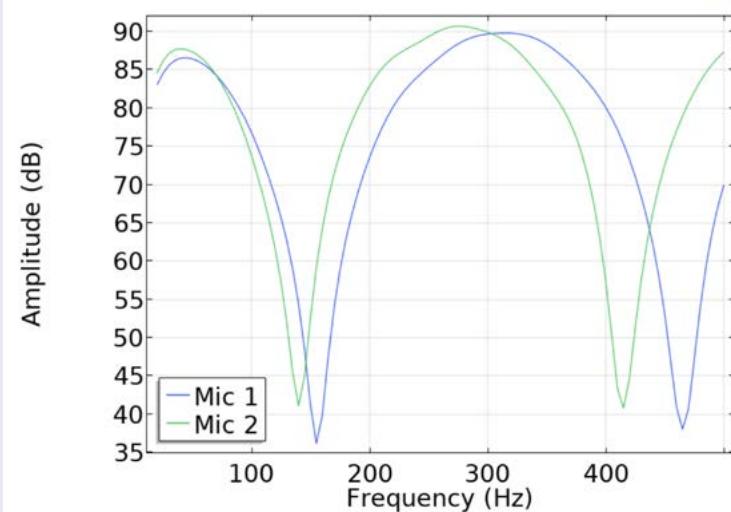


Abb. 6: Übertragungsfunktion von zwei Mikrofonen im Abstand von 0,5 m.

Kammfilter sind ein wesentlicher Bestandteil der Audiosignalverarbeitung und der Musikproduktion und daher ein wichtiges Phänomen, welches beispielsweise in der Tonmeisterausbildung vermittelt werden muss [21]. Mit Hilfe dieser Anwendung können die Benutzer:innen mit verschiedenen Parametern experimentieren, Änderungen im Frequenzgang in Echtzeit beobachten und so ihr Verständnis verbessern. Um das theoretische Wissen über den Kammfiltereffekt mit dessen Simulation zu verbinden, wurde die Anwendung ebenfalls in [wiki.audio](#) integriert [22]. [Wiki.audio](#) ist eine kostenlose Online-Enzyklopädie, die von Pädagog:innen und Audio-Enthusiast:innen genutzt werden kann, um verschiedene Themen der Audiotechnik einfach und intuitiv zu verstehen.

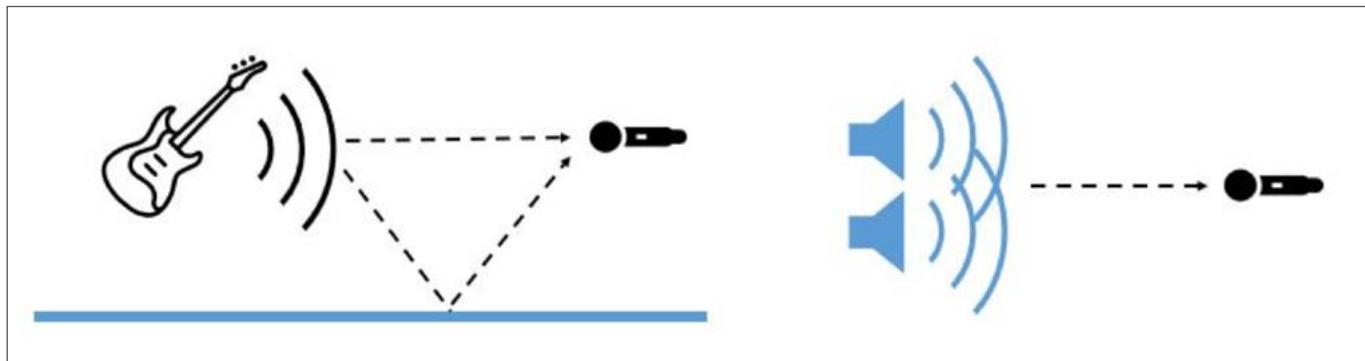


Abb. 7: Darstellung einer Kammfilterung, verursacht durch einen reflektierenden Boden (links), sowie bei Verwendung von mehreren Lautsprechern (rechts).

Die Berechnungszeit beträgt in der Regel etwa 10 bis 15 Sekunden für die standardmäßig zugewiesenen Werte, d. h. einen Frequenzbereich von 100 Hz bis 1 000 Hz, gleichmäßig verteilt in 20 Hertz-Schritten und eine Vernetzung von mindestens sechs Elementen pro Wellenlänge. Änderungen dieser Werte sowie der Geometrie des Raums können zu längeren Berechnungszeiten führen.

Aus den Berechnungen ergeben sich drei Visualisierungen der Kammfilterwirkung: der Schalldruck und der Schalldruckpegel werden aus einer zweidimensionalen Vorderansicht und Draufsicht visualisiert,

und die Übertragungsfunktion, erzeugt durch eine Lautsprecherquelle mit 60 Watt, wird dargestellt. Die resultierenden Diagramme werden auf der rechten und unteren Seite der Anwendung angezeigt. Der Schalldruck und der Schalldruckpegel können für verschiedene Frequenzen angezeigt werden, die über Pfeile oder ein Dropdown-Menü ausgewählt werden können, und die Übertragungsfunktion kann für alle Mikrofone auf einmal oder für jedes Mikrofon einzeln angezeigt werden. Die Übertragungsfunktion zwischen den Lautsprechern und den Mikrofonen stellt den Frequenzgang des Empfängers in einer be-

SOUNDTEC

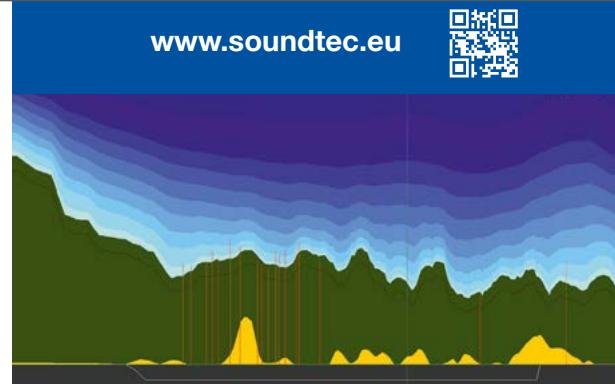
High-Precision Hard- und Software

für Entwicklung, Prüfstand und Produktionstest



LiveRec24+

T
E
A
M
P
L
A
Y
E
R



LiveHub4

stimmten Position dar und veranschaulicht den Effekt der Kammfilterung (siehe Abbildung 6).

Resümee

Während dieses einjährigen Kooperationsprojekts haben Studierende Akustik-Apps mittels der Multi-physics Software COMSOL entwickelt. Dabei wurden Apps zu den Forschungsgebieten der jeweiligen Institute entwickelt mit dem Ziel, diese in der Lehre anzuwenden. In Zeiten, in denen mehr praktische Anwendungsbezüge seitens der Studierenden gefordert werden, eignen sich die Akustik-Apps sehr gut, die theoretisch vermittelten Inhalte auf praktische Art und Weise zu vertiefen. Außerdem stellen die digitalen Apps eine gute Ergänzung zu praktisch durchgeführten Experimenten dar, um die Phänomene anschaulich zu visualisieren.

Für die am Projekt beteiligten Studierenden war die Entwicklung ihrer App zumeist der erste Berührungspunkt mit numerischer Berechnungssoftware, wodurch sie viele neue Erkenntnisse erlangten. Durch regelmäßige Treffen sowie gegenseitige Unterstützung bekamen sie zudem Einblicke in andere Bereiche der Akustik. Zum Abschluss des Projekts trafen sich alle Teilnehmenden persönlich auf der DAGA 2024 in Hannover.

Feedback

Die Autor:innen freuen sich über Anregungen und Feedback jeglicher Art unter der apps.vib@ed.tum.de und sind offen für neue Kooperationen und Anwendungen der Apps in neuen Fachbereichen.

Danksagung

Wir bedanken uns bei der DEGA für die finanzielle Unterstützung des Projekts. Herzlichen Dank an die Professor:innen der beteiligten Lehrstühle, namentlich Prof. Dr.-Ing. Steffen Marburg, Prof. Dr. rer. nat. Michael Vorländer, Prof. Dr.-Ing. Janina Fels, Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt und Prof. Dr.-Ing. Malte Kob sowie Prof. Stefan Sentpali vom Fachausschuss Lehre der Akustik. Ein herzlicher Dank gilt außerdem Herrn Lennart Moheit für die Initiierung des Projekts. Zudem bedanken sich die Studierenden bei den Betreuern des Projekts, Johannes Schmid und Simon Kersten, die bei der Durchführung mit ihrer fachlichen Expertise sowie beim Verfassen dieses Artikels unterstützend mitgewirkt haben.



Literatur

- [1] Moheit, L.; Schmid, J. D.; Schmid, J. M.; Eser, M.; Marburg, S.: Acoustics Apps: Interactive simulations for digital teaching and learning of acoustics. *J. Acoust. Soc.*, 149 (2), February 2021. <https://doi.org/10.1121/10.0003438>
- [2] Moheit, L.; Mäder, M.; Marburg, S.: Interaktive Akustik-Apps – Akustik 'klickbar' machen in Schule, Studium und Beruf. In: *Fortschritte der Akustik – DAGA 2018*, 44. Jahrestagung für Akustik, München, S. 834–835.
- [3] Schmid, J. M.; Schmid, J. D.; Moheit, L.; Marburg S.: Interaktive Akustik-App zur Visualisierung akustischer und strukturdynamischer Effekte an Musikinstrumenten. In: *Fortschritte der Akustik – DAGA 2019*, 45. Jahrestagung für Akustik, Rostock, S. 268–270.
- [4] Schroeder, M.: Diffuse Sound Reflection by Maximum-Length Sequences. *Journal of the Acoustical Society of America* 57, Nr. 149, 1975.
- [5] Schroeder, M.: Binaural Dissimilarity and Optimum Ceilings for Concert Halls: More Lateral Sound Diffusion. *Journal of the Acoustical Society of America* 65, Nr. 958, 1979.
- [6] D'Antonio, P.; Cox, T.: Diffusor Application in Rooms. *Applied Acoustics* 60, Nr. 113, 2000.
- [7] Hargreaves, T.; Cox, T.; Lam, Y.: Surface Diffusion Coefficients for Room Acoustics: Free-Field Measures. *Journal of the Acoustical Society of America* 108, Nr. 1 710, 2000.
- [8] Cox, T.; Lam, Y.: Prediction and Evaluation of the Scattering from Quadratic Residue Diffusers. *Journal of the Acoustical Society of America* 95, Nr. 297, 1994.
- [9] D'Antonio, P.; Konnert, J.: The Reflection Phase Grating Diffusor: Design Theory and Application. *Journal of the Audio Engineering Society* 32, Nr. 228, 1984.
- [10] Kang, J.: Experimental Approach to the Effect of Diffusers on the Sound Attenuation in Long Enclosures. *Building Acoustics* 2, Nr. 391, 1995.
- [11] Kang, J.: Sound Propagation in Street Canyons: Comparison between Diffusely and Geometrically Reflecting Boundaries. *Journal of the Acoustical Society of America* 107, Nr. 1 394, 2000.
- [12] Ma, G.; Yang, M.; Xiao, S.; Yang, Z.; Sheng, P.: Acoustic Metasurface with Hybrid Resonances. *Nature Materials* 13, Nr. 873, 2014.
- [13] Li, Y.; Assouar, B. M.: Acoustic Metasurface-Based Perfect Absorber with Deep Subwavelength Thickness. *Applied Physics Letters* 108, Nr. 063502, 2016.
- [14] Katz, Brian F. G.: Boundary element method calculation of individual head-related transfer function. I. Rigid model calculation. *Journal of the Acoustical Society of America* 110 (5), pp. 2440–2448, 2001. <https://doi.org/10.1121/1.1412440>
- [15] Maekawa, Z.: Noise reduction by screens. *Applied Acoustics*, Jg. 1, Nr. 3, S. 157–173, 1968. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(68\)90020-0](https://doi.org/10.1016/0003-682X(68)90020-0)
- [16] Kurze, U.J.; Anderson, G. S.: Sound attenuation by barriers. *Applied Acoustics*, Jg. 4, Nr. 1, S. 35–53, 1971. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(71\)90024-7](https://doi.org/10.1016/0003-682X(71)90024-7)
- [17] Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen: RLS-19, RLS-19, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, 2019.
- [18] Schallschutz durch Abschirmung im Freien, VDI 2720, VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., 1997.
- [19] Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien: Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren, DIN ISO 9613-2, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 1999.
- [20] Christensen, M. G.: Comb Filters and Periodic Signals. In: *Introduction to Audio Processing*. Springer, Cham. 2019.
- [21] Clifford, A.; Reiss, J.: Using Delay Estimation to Reduce Comb Filtering of Arbitrary Musical Sources. *AES: Journal of the Audio Engineering Society*, 61, 917–927, 2013.
- [22] Wiki.audio, Comb filter, <https://wiki.audio/En/0050> ■

Mihaly Barany

RWTH Aachen,
Institut für Hör-
technik und
Akustik

Tabea Breit- kreutz

Hochschule Mitt-
weida

Michael Buba

TU München,
Lehrstuhl für
Akustik mobiler
Systeme

Mert Dogu

TU München,
Lehrstuhl für
Akustik mobiler
Systeme

Yvonne Hegge- mann

Hochschule Mitt-
weida

Simon Kersten

RWTH Aachen,
Institut für Hör-
technik und
Akustik

Luis Enrique Roca Paz

Hochschule für
Musik Detmold,
Erich-Thienhaus-
Institut

Johannes Schmid

TU München,
Lehrstuhl für
Akustik mobiler
Systeme