

# Anwendungen der Virtuellen Akustik

Lukas Aspöck, Janina Fels, Matthias Frank, Matthias Bertsch, Andreas Mühlberger, Leon Kroczek, Sarah Roßkopf, Bernhard U. Seeber, Josep Llorca-Bofi, Michael Vorländer, Christoph Sladeczek, Jakob Bergner, Kevin Hock, René Rodigast, Joachim Bös, Franz Zotter, Gerriet K. Sharma, Meret Stellbrink, Stefan Weinzierl, Sebastià V. Amengual Garí

Editor:innen: Annika Neidhardt, Jens Ahrens, Christoph Pörschmann

**Virtuelle Akustik kann Personen auditiv in eine andere Umgebung versetzen, virtuelle Elemente zur realen Umgebung hinzufügen oder diese für den/die Nutzer:in modifiziert erscheinen lassen. Inzwischen erzielt die Virtuelle Akustik dabei perzeptiv so überzeugende Ergebnisse, dass sie sowohl als Werkzeug in der Forschung als auch als Technologie in kommerziellen Produkten zunehmend an Bedeutung gewinnt. Der vorliegende Artikel gibt einen Einblick in die Bandbreite der aktuellen und künftigen Einsatzmöglichkeiten der Virtuellen Akustik. Forschende berichten von ihren Arbeiten, zeigen die praktischen Anwendungen auf, die uns allen in naher Zukunft im Alltag begegnen könnten und welche Potenziale und Herausforderungen dabei bestehen.**

## Einleitung

„Wie können technische Systeme realisiert werden, die eine:n Hörer:in auditiv in eine virtualisierte Realität versetzen?“ Das war über viele Jahre die zentrale Forschungsfrage der Virtuellen Akustik. Dabei ging es vor allem um die Entwicklung von Methoden, Verfahren und technischen Realisierungen. Damit einher ging die Beantwortung perzeptiver Fragestellungen: „Welche Aspekte des physikalischen Schallfeldes müssen mit welcher Genauigkeit nachgebildet werden?“ Ziel der auf diese Weise technisch realisierten virtuellen Realität ist es, dass sich ein/eine Hörer:in in der virtuellen Umgebung präsent fühlt, diese als natürlich wahrnimmt und in dieser (näherungsweise) so agiert wie in einer realen Umgebung. Die darauf aufbauende Frage „Wie können wir die Qualität einer virtuellen Realität messen?“, z. B. um verschiedene technische Realisierungen und Systeme miteinander zu vergleichen, kann oft nicht mehr unabhängig von einer geplanten Anwendung beantwortet werden. Immer mehr Anwendungen der Virtuellen Akustik als eine Modalität der virtuellen Realität haben Eingang in unterschiedlichste Themenfelder gefunden. Und inzwischen ist das kommerzielle Interesse an solchen Anwendungen so groß, dass sich große multinationale Konzerne intensiv mit virtueller Realität beschäftigen und diese für ihre Anwendungsbereiche erforschen. Wir befinden uns mit der Virtuellen

## Applications of Virtual Acoustics

**Virtual acoustics can aurally transport people into a different environment, add virtual elements to the real environment or make it appear modified to the user. Over the years, virtual acoustics has reached such convincing perceptual results that it is becoming increasingly important both as a tool in research and as a technology in commercial products. This article provides an insight into the range of current and future applications of virtual acoustics. Researchers report on their work, highlight the practical applications that we could all encounter in everyday life in the near future and the potential and challenges that exist.**

Akustik also in einem Umfeld, in dem die Anwendungen selbst einen eigenen Forschungsgegenstand darstellen, die technische Machbarkeit und Fragen einzelner Details der auditiven Wahrnehmung sind dabei oft nur noch Nebenaspekte. Um diese sich über die Jahre veränderten Aspekte der wissenschaftlichen Arbeit zu verdeutlichen, widmet sich dieser Artikel den Anwendungen der Virtuellen Akustik. Dabei stellen verschiedene Arbeits- und Forschungsgruppen ihre Anwendungen und die damit verbundenen Möglichkeiten und Herausforderungen vor.

## Virtuelle Akustik in der Forschung – ein Überblick

- Lukas Aspöck, Janina Fels  
(Institut für Hörtechnik und Akustik, RWTH Aachen)

Beim Einsatz der Virtuellen Akustik als Werkzeug in der Forschung steht insbesondere eine geeignete Auralisierung im Vordergrund, um in Hörexperimenten Proband:innen kontrolliert verschiedene Szenarien über Kopfhörer oder mit Hilfe mehrkanaliger Lautsprechersysteme darzubieten.

Derartige Experimente werden beispielsweise häufig im Bereich der Hörforschung durchgeführt. So wurde bereits in den 1990er und 2000er Jahren mit Hilfe von simulierten Räumen untersucht, welchen Ein-

fluss das binaurale Hören auf die Sprachverständlichkeit hat [1]. Die Nutzung von Simulationen hat den Vorteil, dass die Szenarien, z. B. die Raumakustik, die Position oder der Pegel der Störschallquellen, exakt kontrolliert und verändert werden können, um Versuchspersonen in den Hörexperimenten verschiedene Bedingungen darzubieten. In jüngeren Studien wurde beispielsweise untersucht, wie sich bewegender Störschall bei jüngeren oder älteren Personengruppen auf die Sprachverständlichkeit auswirkt [2]. Abseits davon gibt es auch die Anwendung im Bereich der musikalischen Akustik, z. B. zur Untersuchung der Bewegung von Musikinstrumenten [3], oder zur Beurteilung der Raumakustik von Konzertsälen [4]. Auch im Bereich der Bauakustik findet Virtuelle Akustik in Experimenten Anwendung [5].

Zunehmend hat sich die Komplexität der dargebotenen Szenen erhöht, die inzwischen eine hohe Anzahl von aktiven, sich bewegenden Schallquellen beinhalten kann. So wird es möglich, auch Alltagssituationen wie sie im Restaurant, an einem Bahnhof oder bei einer Tagung auftreten, realistisch nachzubilden. Solche komplexen Szenen können auch bei der Untersuchung der selektiven auditiven Aufmerksamkeit eine wichtige Rolle spielen [6], welche dann in Experimenten mit unterschiedlichsten Personengruppen, z. B. mit Kindern untersucht werden kann [7]. Ebenso weit hat sich die Anwendung Virtueller Akustik in vielen Bereichen der Lärmwirkungsfor schung etabliert, z. B. bei Studien zu Großraumbüros [8] oder bei der Untersuchung von Flug- oder Straßenlärm [9]. Im urbanen Kontext bietet zudem die Durchführung von virtuellen Soundwalks [10] den Vorteil, die Szenarien kontrollierbar zu halten, was in der Durchführung von realen Soundwalks häufig nicht gewährleistet werden kann.

In den folgenden Beiträgen werden die Nutzung der Virtuellen Akustik für musikalisches Training, für die Untersuchung und Erhaltung des Kulturerbes, für psychologische Therapiemaßnahmen als auch zur Entwicklung von Hörhilfen, in der akustischen Stadtplanung, sowie in der Komposition und Veranstaltungstechnik tiefgehender beleuchtet.

## Virtuelle Akustik für musikalisches Training

■ Matthias Frank<sup>1</sup>, Matthias Bertsch<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Universität für Musik und darstellende Kunst Graz; <sup>2</sup>Universität für Musik und darstellende Kunst Wien)

Die akustische Umgebung eines:r Musikers:in beeinflusst die Spielweise der Instrumente und den Einsatz der Stimme [1]. Mit Hilfe der Virtuellen Akustik kann schnell zwischen unterschiedlichen Umgebun-

gen umgeschaltet werden, um so bewusst gewisse Reaktionen zu provozieren. Dabei ist es wichtig, die Latenz des akustischen Systems (vom Mikrofon am Instrument durch die gesamte Signalverarbeitungskette bis zu den Ohren der:s Musiker:in) so gering wie möglich zu halten, damit die natürliche Spielweise möglichst wenig gestört wird [2]. Deshalb bieten sich Systeme an, die den Direktschall des Instruments ungehindert durchlassen und nur den Raumanteil mit Hilfe der Virtuellen Akustik zuspieren. Für die Zuspierung können entweder transparente Kopfhörer [3] oder umgebende Lautsprecherkuppeln [4, 5] verwendet werden. Während früher für die schnelle Berechnung noch digitale Signalprozessoren notwendig waren, sind heutzutage normale Computer nutzbar [3]. Auch die Verfügbarkeit von transparenten Kopfhörern [6] wird durch aktuelle Entwicklungen für Augmentierte Realität leichter. Nachfolgend wird der Einsatz von Virtueller Akustik in zwei Szenarien der musikalischen Ausbildung skizziert.

Typischerweise ist die zum Üben verfügbare Zeit in Konzertsälen sehr begrenzt, und meist sind solche Räume auch erst gegen Ende der Musikausbildung überhaupt zugänglich. Deshalb wird der Umgang mit unterschiedlichen akustischen Umgebungen erst sehr spät gelernt. Mit Hilfe der Virtuellen Akustik können Konzertsäle im kleinen Übezimmer auralisiert werden und so schon sehr früh in die musikalische Ausbildung einfließen. Studienergebnisse zeigen, dass das Erkennen von unterschiedlichen akustischen Umgebungen und das Reagieren darauf bei jungen Anfänger:innen noch nicht stark ausgeprägt sind, aber mit Virtueller Akustik erlernt werden kann [7]. Während die Lehrenden in der Studie vom Einfluss der Virtuellen Akustik auf Agogik, Artikulation, Tempo, Intonation und andere musikalische Parameter berichten, bemerken die Lernenden in erster Linie bewusst eine Steigerung der Freude beim Musizieren.

Extremes Lampenfieber ist ein sehr häufiges Hindernis für Musiker:innen, in außergewöhnlichen und angstbesetzten Auftrittssituationen wie Aufnahmeprüfungen, Orchesterproben spielen oder Konzerten an legendären Auftrittsorten Topleistungen zu erbringen. Mit Hilfe von Virtual Reality Headsets können räumliche 360°-Kameraaufnahmen dieser Orte in Verbindung mit einer adäquaten Virtuellen Akustik ein intensives immersives Erlebnis erzeugen, das als effektives Expositionstraining eine neue virtuelle Variante des Lampenfiebertrainings ermöglicht [8]. Das realitätsnahe Training ermöglicht es, in einer sicheren Umgebung individuelle Zugänge und Fähigkeiten zu entwickeln, die helfen, Ängste zu überwinden [9]. Insbesondere bei Bläser:innen und Sänger:innen funktioniert das Spiel mit Headset ohne Sicht auf das Instrument sehr gut. Ergänzt durch psychophysiologische

Messungen können zusätzlich Stressparameter erfasst und analysiert werden. Aktuell stört das hohe Gewicht der Headsets teilweise die natürliche Spielweise, doch durch die rasante Entwicklung von solchen Geräten im Bereich der virtuellen Realität ist eine Besserung in den nächsten Jahren zu erwarten.

### Virtuelle Akustik in der Psychotherapie

- Andreas Mühlberger, Leon Kroczeck, Sarah Roßkopf  
(Universität Regensburg)

Beim Einsatz von Virtueller Realität (VR) als Hilfsmittel in der Psychotherapie geht es darum, die sozial-kognitive Verarbeitung der störungsrelevanten Situation durch das Eintauchen in die Situation (Präsenz) und die Wahrnehmung der relevanten Aspekte intuitiv zu aktivieren. Insbesondere für phobische Störungen konnte die Exposition in Virtueller Realität als eine erfolgreiche Methode wissenschaftlich sehr gut belegt werden [1]. Nach der Netzwerktheorie der Emotionsverarbeitung [2] ist dabei die Passung der Wahrnehmung mit dem abgespeicherten Furchtnetzwerk zentral. Theorien gehen von einer Wechselwirkung zwischen der Qualität der Virtuellen Realität in Bezug auf die erzielte Immersion und der ausgelösten Präsenz sowie der emotionalen Reaktion als Voraussetzung für den Therapieerfolg aus [3]. Bezüglich der akustischen Simulation bedeutet dies, dass deren Plausibilität von herausragender Bedeutung ist. Eine die Methoden der Virtuellen Akustik nutzende auditive Darbietung, durch die Schallquellen externalisiert und kongruent zu der visuellen Umgebung wahrgenommen werden, kann das Eintauchen in die Simulation unterstützen. Drei Einsatzgebiete in der Psychotherapie mit hoher Relevanz der Virtuellen Akustik werden exemplarisch vorgestellt:

Verhaltensübungen bei der Sozialen Angststörung, bei der die Furcht vor negativer Bewertung im Vordergrund steht, beinhalten soziale Interaktionen, bei denen die angstbesetzte Situation (z. B. Öffentliches Sprechen, Auftritte vor Publikum, oben beschriebenes Lampenfiebertraining) neu verarbeitet wird. Die Übungen können erfolgreich in Virtueller Realität durchgeführt werden. In ersten Untersuchungen konnte bereits gezeigt werden, dass eine optimierte auditive Darbietung in relevanten virtuellen Situationen (Seminarraum, siehe Abbildung 1) die soziale Präsenz verbessert und den Aufmerksamkeitsfokus automatisch auf die sprechende Person (z. B. im Auditorium) zu lenken erlaubt [4]. Es kann davon ausgegangen werden, dass auch Raumklang sowie Geräusche eines virtuellen Publikums (z. B. Gähnen) emotionale Prozesse stärker anstoßen. Über die Aktivierung der emotionalen Netzwerke kann dann die Widerlegung von Befürchtungen als relevanter Wirkmechanismus von Psychotherapie optimiert werden.

Die Aufmerksamkeits-Hyperaktivitätsstörung ist durch eine erhöhte Ablenkbarkeit gekennzeichnet, die insbesondere in Situationen mit vielen externen Reizen (z. B. im Klassenzimmer) verstärkt auftritt. Es konnte gezeigt werden, dass virtuelle Klassenzimmer für die Diagnostik effektiv genutzt werden können [5]. Eine mit Hilfe der Virtuellen Akustik optimierte auditive Darbietung und damit eine externalisierte Wahrnehmung der ablenkenden auditiven Reize wird voraussichtlich die Qualität der Diagnostik, aber auch den Einsatz von VR für die Therapie von Aufmerksamkeits-Hyperaktivitätsstörungen verbessern.

Für die Therapie akustischer Halluzinationen, ein typisches Symptom im Rahmen einer Psychose, wurde die sogenannte AVATAR-Therapie [6] entwickelt, bei der Patient:innen lernen, mit einer nach ihren Vorgaben generierten visuellen und akustischen Repräsentation der halluzinierten Stimme zu interagieren. Die Bedrohlichkeit der Stimme wird im Laufe von wenigen Therapiesitzungen immer mehr reduziert. Eine optimierte auditive Darbietung kann die Erfahrungen mit der Repräsentation der virtuellen Stimme verstärken und dadurch den Therapieerfolg zusätzlich erhöhen.

Insgesamt gibt es leider noch wenige Befunde zum Einsatz Virtueller Akustik im Bereich der Psychotherapie. Erste Ergebnisse deuten auf ein großes Potenzial zur Optimierung psychotherapeutischer Methoden hin. Eine interessante Forschungsfrage ist dabei auch, ob die Wechselwirkung zwischen emotionaler Erregung und auditiver Kognition die Anforderungen an Präzision der akustischen Stimulation reduzieren könnte. Generell eröffnet der technische Fortschritt bei der auditiven Ausgestaltung virtueller sozialer Interaktionen weitreichende Möglichkeiten, da Psy-

Abb. 1: Beispiel einer typischen sozialen Leistungssituation (Öffentliches Sprechen) in Virtueller Realität





chotherapie, die ja im Kern eine soziale Interaktion darstellt, durch innovative virtuelle Formate ergänzt werden kann.

## Virtuelle Akustik in der Audiologie

■ Bernhard U. Seeber  
(Technische Universität München)

Audiologie beschäftigt sich mit den Funktionen und den Erkrankungen des menschlichen Gehörs. Diagnostik spielt dabei eine zentrale Rolle. Die Hörleistung einer Person wird ohne und mit Hörhilfen charakterisiert, wobei das Hören in Kommunikationssituationen im Fokus steht. Diese werden durch Satztests nachgebildet, in denen meist ein Störschall das Sprachverständnis beschränkt. Die räumliche Lage des Störschalls ist dabei ausschlaggebend für den binauralen Vorteil, und es kann bis zu 10 dB mehr Störschall toleriert werden, wenn er aus einer anderen Richtung als das Zielsprachsignal kommt [1]. Die Mechanismen des Sprachverstehens können gut in diesen abstrakten Laborsituationen charakterisiert werden. Allerdings korrelieren die Ergebnisse schlecht mit den Berichten der Patienten über ihre Probleme in schwierigen realen Hörsituationen [2].

Virtuelle Akustik ermöglicht die Synthese und Auralisation von realitätsnahen Hörsituationen mit beliebiger Komplexität – aber was macht eine Hörsituation komplex? Die Anzahl, die räumliche Verteilung und Orientierung der Schallquellen sowie die Art des Signals beeinflussen das Sprachverstehen entscheidend, da der binaurale Vorteil und die Fähigkeit, in zeitliche Lücken zu hören, direkt betroffen sind [3]. Der Informationsgehalt der Störquellen ist ebenfalls wichtig, da verständliche störende Sprache von der Zielsprache ablenken kann und verwechselt werden kann. Starke frühe Reflexionen an Wänden und Objekten können den Zielschall besser verständlich machen, während später diffuser Hall den binauralen Vorteil reduziert. Hörgeräte nutzen komplexe Algorithmen für die automatische Umschaltung der Richtcharakteristik und die Unterdrückung von Störschall und Hall, die eine Situationserkennung und Lokalisation der Quellen erfordern und daher nur in komplexen Hörsituationen getestet werden können. Um solche Hörsituationen definiert und auch in anderen Labors reproduzierbar zu gestalten, können virtuelle Referenzszenen verwendet werden [4], welche Messergebnisse liefern, die nur sehr gering von jenen abweichen, die in der betreffenden Originalszene erzielt wurden [5].

In der Audiologie wird Virtuelle Akustik somit als Messgerät verwendet. Dies erfordert eine Schallwiedergabe mit einer vorgegebenen hohen Messpräzision, was in der Praxis eine Herausforderung darstellt



Abb. 2: Beispielhaftes audiovisuelles Interaktionsszenario in der real-time Simulated Open Field Environment im reflexionsarmen Raum an der TUM.

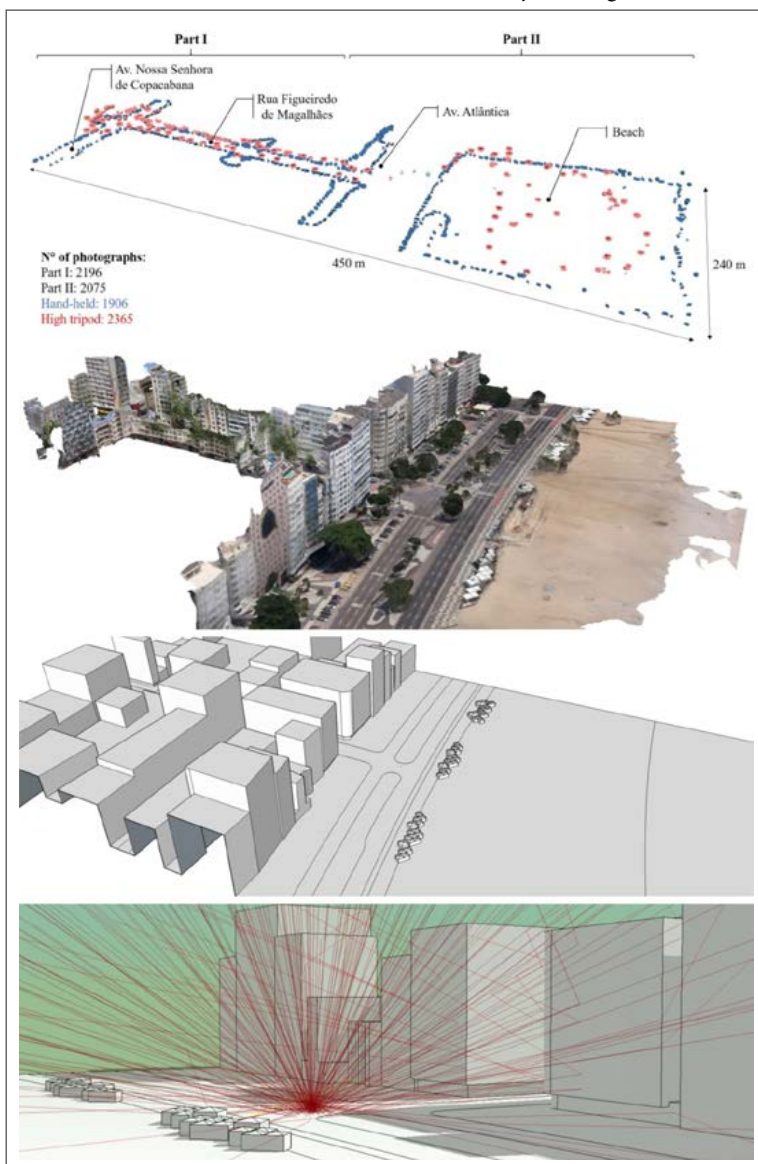
[6]. Ein weiterer Aspekt ist die Abhängigkeit der Auralisationsqualität vom Laboraufbau – während an Universitäten komplexe Laborsysteme mit vielen Lautsprechern zu finden sind (Abbildung 2), haben Kliniken Systeme mit üblicherweise wenigen Lautsprechern in Hörkabinen. Virtuelle Akustik nutzt zudem Verfahren mit unterschiedlicher Rechenkomplexität, um frühe und späte Reflexionen zu simulieren und dynamisch wiederzugeben. Insbesondere bei einer Vereinfachung von Raumakustiksimulationen und Auralisationsverfahren sind Evaluationen mit normalhörenden Proband:innen, in denen keine hörbaren Unterschiede ermittelt wurden, nicht unbedingt auf Personen mit Hörstörungen übertragbar. So nimmt die Störwirkung von Reflexionen bei Hörstörungen oft zu, da Mechanismen des Präzedenzeffekts nur eingeschränkt funktionieren. Daher kommt der richtungstreuen Abbildung von frühen Reflexionen eine größere Bedeutung zu als bei Normalhörenden [7]. Die Anwendung von Virtueller Akustik in der Audiologie ist nicht auf Laboruntersuchungen und die Forschung an Hörhilfen beschränkt. Die Einstellung von Hörhilfen beim/bei der Hörgeräteakustiker:in erfordert realitätsnahe Hörsituationen, wofür die Verfahren der Virtuellen Akustik ebenfalls genutzt werden können. Auch kann eine patientengesteuerte Einstellung der Hörhilfe für problematische Hörsituationen hilfreich sein. Zur Therapie eignet sich Virtuelle Akustik ebenfalls: ein Hörtraining in realistischen Situationen macht nicht nur mehr Spaß, sondern verbessert den Umgang mit schwierigen Hörsituationen. Die Nutzung von Virtueller Akustik in der Audiologie steht somit erst am Anfang.

## Virtuelle Akustik in der Stadtplanung

- Josep Llorca-Bofi, Michael Vorländer  
(Institut für Hörtechnik und Akustik, RWTH Aachen)

Das Interesse an der Bewertung von Lärm in Städten und im Freien nimmt stetig zu. Das gilt nicht nur für etablierte Methoden wie die Lärmkartierung [1], sondern geht darüber hinaus. Eine Möglichkeit, Menschen partizipativ in Planungsprozesse einzubeziehen, ist der Einsatz von Auralisationen in der virtuellen Realität, bei denen Schallquellen, Schallausbreitung und Empfängerkonfigurationen separat gesteuert werden können [2, 3]. Ergänzt durch eine visuelle Darstellung können diese Modelle als plausible Repräsentationen der Umgebung dienen, um

Abb. 3: Halbautomatische Erstellung eines 3D-Modells für die Virtuelle Akustik des komplexen Szenarios am Strand von Copacabana, Brasilien. Von oben nach unten: Akustische und visuelle Datenerfassung, Photogrammetrisches Netz, akustisches Modell, akustisches Ray-Tracing.



die Wahrnehmung und die Präferenzen der Menschen zu untersuchen (siehe Abbildung 3).

Offene städtische Umgebungen enthalten eine Vielzahl von Geräuschen, die von Quellen aus dem Verkehr, von Menschen oder aus der Natur stammen. Diese Geräusche breiten sich über unterschiedliche Entfernungen in der Umgebung aus. Die variablen physikalischen Eigenschaften des inhomogenen Mediums Luft, die geometrischen Merkmale der Umgebung und der Schallabsorption und -streuung von Oberflächen sind dabei wesentlich. Ausbreitungsverluste sind ein weiterer erwähnenswerter Aspekt, da die Energieverluste des Schalls nicht nur durch die Entfernung zur Quelle, sondern auch durch Wettervariablen wie Luftfeuchtigkeit, Temperatur oder Dichte der Luft beeinflusst werden kann. Infolgedessen sind diese Klanglandschaften schwieriger nachzubilden als die Akustik geschlossener Innenräume.

Dennoch sind die Ansätze der Schallausbreitungssimulation denjenigen der Raumakustik ähnlich. Sehr unterschiedlich sind jedoch die Schritte der Audiosignalverarbeitung bei der Verrechnung von „trockenen“ (hallfreien) Primärsignalen mit den Ausbreitungsfunktionen (Impulsantworten). Während bei raumakustischen Auralisationen im Wesentlichen von einem zeitlich konstanten System ausgegangen werden kann, ist bei Außengeräuschen eher von einer sehr dynamischen Situation mit vielen bewegten Quellen auszugehen. Und im Gegensatz zur Raumakustik sind die entsprechenden Impulsantworten eher dünn besetzt, enthalten eher einzelne Reflexionspfade als einen dichten Nachhall. Daher sind weniger Faltungsoperationen mit kompletten Impulsantworten als vielmehr „Variable Delay Line“ VDL-Strukturen vorteilhaft, die nebenbei den Dopplereffekt von bewegten Quellen mitliefern [4, 5].

Falls nun noch Informationen über die Geräuschquellen vorliegen (Signale, Richtcharakteristiken), kann die Auralisation durchgeführt werden [6]. An all diesen Komponenten, insbesondere an der Quellcharakterisierung wird intensiv gearbeitet [7, 8]. Die Ergebnisse klingen schon recht plausibel, sind aber eher „typisch“ als authentisch und ermöglichen somit noch keine unmittelbaren Rückschlüsse auf die tatsächliche Schallausbreitung in einer spezifischen Umgebung, z. B. in einer realen Straßenschlucht mit bestimmten Gebäudefassaden.

Neben der Erfassung von Quellsignalen durch Messung oder Synthese gibt es nämlich noch zahlreiche offene Fragen bezüglich der Schallausbreitungssimulation. Wellenmodelle benötigen möglichst präzise Eingangsdaten wie Oberflächenimpedanzen oder Parameter der Atmosphäre, insbesondere bei der Betrachtung von Fluglärm. Bei Modellen der geometrischen Akustik trifft das ebenso zu, aber diese müssen

auch weiterentwickelt werden, um die eher stochastischen Effekte der Interaktion von Schall mit Gebäudefassaden besser abzubilden. Dies sind Anwendungen, in denen die Einflüsse von Streuung und Beugung besonders wichtig sind, mehr als in der Raumakustik, und insofern besteht auch ein Bedarf an besser geeigneten Modellen mit spezifischen (z.B. einfallswinkelabhängigen) Eingangsdaten für die Absorption und die Streuung an Gebäudeoberflächen.

### Virtuelle Akustik in der Veranstaltungstechnik

- Christoph Sladeczek<sup>1</sup>, Jakob Bergner<sup>1</sup>, Kevin Hock<sup>1</sup>, René Rodigast<sup>1</sup>, Joachim Bös<sup>1,2</sup>  
(<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie IDMT, Ilmenau; <sup>2</sup>Fachgebiet Industrielle Anwendungen von Medientechnologien IAM, Technische Universität Ilmenau)

In der Veranstaltungstechnik zielen lautsprecherbasierte Anwendungen der Virtuellen Akustik auf ein effektvolles Hörerlebnis und eine bestimmte emotionale Wirkung ab. Methoden der Virtuellen Akustik erlauben die Erzeugung künstlicher akustischer Umgebungen, die realen Umgebungen gleichen oder sich bewusst davon unterscheiden. Dafür wichtige Aspekte sind die Reproduktion von Schallquellen, die eine korrekte Lokalisation sowie eine plausible und effektvolle raumakustische Einhüllung im Auditorium zulassen. Je nach Anwendung wird dafür ein geeignetes Audio-Wiedergabeverfahren ausgewählt, sowie Anzahl und Position der Lautsprecher festgelegt [1]. Ein Beispiel für räumliche Großbeschallungssysteme ist die Seebühne der Bregenzer Festspiele, auf der eine Vielzahl von Lautsprechern für das Publikum unsichtbar in die Kulisse der über 80 m breiten Bühne integriert ist. Sie werden verwendet, um ein Auditorium mit über 7000 Sitzplätzen zu beschallen [2]. Dafür werden die Lautsprecher zu sogenannten Richtungsgebieten gruppiert und individuell durch Laufzeit- und Pegelkorrektur so eingemessen, dass das verstärkte akustische Signal immer mit der visuellen Position der Akteure auf der Bühne übereinstimmt. Auch für Live-Konzerte besteht der Wunsch nach immersiven Beschallungskonzepten und dabei sowohl nach korrekter Lokalisation der Akteur:innen auf der Bühne als auch nach virtuellen raumakustischen Effekten. Hierzu werden z. B. Lautsprecher-Arrays oder verteilte Lautsprecher-Cluster installiert, die objektbasiert angesteuert werden, um etwa die Lokalisation von Schallquellen oder die raumakustische Einhüllung zu gewährleisten.

Für andere Veranstaltungsorte besteht der Wunsch, Multifunktionsräume mit einem flexiblen immersiven Beschallungssystem auszustatten. Ein Beispiel

ist die Schaubühne auf dem Kreuzfahrtschiff Mein Schiff 1 von TUI Cruises. Dieser Veranstaltungssaal bietet Platz für 150 Gäste und wird unter anderem für Stand-up-Comedy, Zaubershows, Lesungen, Sprechtheater, Konzerte und Filmvorführungen genutzt. Um den Reisenden ein einzigartiges Erlebnis zu bieten, wurde ein objektbasiertes Beschallungssystem bestehend aus 34 Lautsprechern installiert. Das System erlaubt die gleichzeitige Wiedergabe von bis zu 64 Audioobjekten und eine variable Veränderung der Raumakustik.

Die akustische Erweiterung von Großbildwiedergabesystemen in Planetarien ist ein weiteres Anwendungsbeispiel [3]. Diese Einrichtungen haben sich in den letzten Jahren von klassischen Visualisierungen des Sternenhimmels hin zu Entertainment-Erlebnisorten gewandelt. Die Kuppelprojektionen bieten ein beeindruckend einhüllendes Bild für das Publikum, was analog auch für die Audiowiedergabe erwünscht ist. Insbesondere die Verbindung von Live-Acts mit Full-dome-Shows oder immersive Hörspiele wie „Die drei Fragezeichen“ haben in den letzten Jahren zu einem verstärkten Zuschauerinteresse an Veranstaltungen in Planetarien geführt. Installationen dieser Art sind im ZEISS-Planetarium in Jena, sowie in Planetarien in Hamburg, Bochum, Berlin und Kiel zu finden.

### Virtuelle Akustik und Hörskulpturen in der elektroakustischen Komposition

- Franz Zotter<sup>1</sup>, Matthias Frank<sup>1</sup>, Gerriet K. Sharma<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>Universität für Musik und darstellende Kunst, Graz; <sup>2</sup>Hochschule für Gestaltung, Karlsruhe)

Auf der Weltausstellung 1958 wurden mit der Darbietung von Edgar Varéses Werk „poème électronique“ zum ersten Mal räumliche Hörskulpturen als eine Form der elektroakustischen Komposition einem großen Publikum präsentiert. Dabei nutzte der Komponist 350 Lautsprecher mit einer eigens dafür entwickelten Ansteuerung. Im Deutschen Pavillon der Weltausstellung 1970 in Osaka führte Karlheinz Stockhausen einige Werke auf einer hemisphärischen Lautsprecheranlage auf, in der 50 Lautsprecher-Cluster mit 7-Kanalton angesteuert wurden [1]. Der technische Aufwand war in beiden Fällen erheblich, auf eine einmalige Installation ausgerichtet und daher nur zeitlich begrenzt zugänglich. Darüber hinaus wurden seit den 1970er Jahren vereinzelt permanente Aufbauten realisiert [2].

Eine Studie im Jahr 2008 [3] beleuchtete die Sichtweisen von Klangkünstler:innen und Komponist:innen zur Verräumlichung von Klängen. 44 % der Befragten gaben an, räumliche Aspekte als künstlerisches Ausdrucksmittel einzusetzen und mehr als 20 % von ihnen arbeiten typischerweise mit Systemen mit mehr als



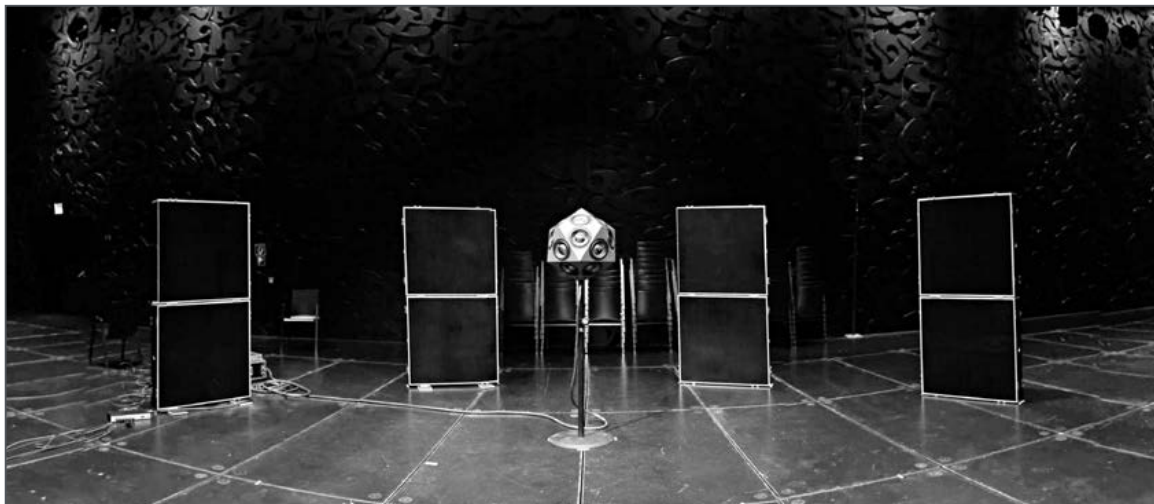


Abb. 4: Ikosaederlautsprecher IKO im Ligeti-Saal der Kunstuniversität Graz, mit Reflektorwänden, deren zusätzliche Reflexionen helfen, elektroakustische Hörskulpturen für eine große Publikumsfläche zu erzeugen (Foto: Zotter).

zwei Lautsprechern. Seither hat die Verfügbarkeit von diversen Software-Werkzeugen drastisch zugenommen (z. B. Spat5, Blue Ripple Sound, Ambix, SPARTA Plugins, IEM Plugin Suite), darunter auch zahlreiche freie und quelloffene. Diese können räumliche Kompositionen über definierte und gut erforschte Formate mit umgebenden Lautsprechersystemen oder über Kopfhörer wiedergeben [4] und somit eine größere Verbreitung der Kompositionen ermöglichen.

Parallel dazu wird seit etwa den 2000er Jahren immer besser dokumentierte künstlerische Forschung betrieben, um die Einsatzmöglichkeiten für die Klangkompositorische Praxis zu verfeinern, z. B. [5, 6]. Natasha Barrett beschreibt dazu beispielhaft die Schaffung einer räumlichen Illusion in Bezug auf die akustische Hülle und Größe eines Raums durch die darin befindlichen Klangobjekte und deren relative Lage und Bewegungspfade. Aber auch die Anspielung auf verfremdete raumakustisch/physikalische Gegebenheiten, ggf. durch Raumsimulation, wird angedeutet.

Umgekehrt zu umgebenden Lautsprecheranlagen kann ein kompaktes Kugellautsprecher-Array (z. B. Ikosaederlautsprecher, siehe Abbildung 4) von seinem Standort aus gebündelt Schallstrahlen in frei wählbare Richtungen abstrahlen. Die Reflexion von Schallstrahlen eines solchen Kugel-Arrays an Raumwänden beeinflusst dabei die Lokalisation sowie das räumliche Erscheinungsbild einer Hörskulptur [7]. Dies eröffnet kompositorisches Neuland, in welchem künstlerische Forschungsfragen psychoakustische Fragestellungen aufwerfen. Komponierte Hörskulpturen verknüpfen statische und veränderliche Schallstrahlenanteile mit verschiedenen Signalen und können auf diese Art Höreindrücke in unterschiedlicher Form (Umriss, räumliche Schichtung, richtungsbezogene Aufmerksamkeitsführung) erzeugen [8]. Zu-

dem ließ sich beispielsweise die Unterscheidbarkeit skulpturaler Grundtypen Kernplastik, Kern-Schale-Prinzip und Raumplastik nachweisen [7].

Nach wie vor ist die Frage von übereinkommend benennbaren akustischen Gestalten unbeantwortet. Bezüglich der Verwendung von aufgenommenem räumlichen Klangmaterial als Ausgangspunkt für Kompositionen skizziert Barrett die Zerlegung des Klangmaterials in einzelne Komponenten und die dafür nötige Strukturerkennung als bislang herausfordernden, manuellen Kompositionsansatz [9]. Potenzial liegt in der automatisierten Zerlegung solchen Klangmaterials in eine Vielzahl von Klang- und Bewegungsbausteinen, die kompositorisch verfremdet und variiert werden können [10]. In der elektroakustischen Musik mit umgebenden Lautsprechern zeigt sich auch deutlich: Ein oft erwünschter, vollständiger Eindruck von gleichmäßiger Einhüllung des/der Hörers/in gelingt entweder nur unter speziellen Bedingungen für Signale mit einer gewissen zeitlichen Struktur, oder er erfordert neue Beschallungsansätze für Hörpositionen, die außerhalb des Zentrums der verwendeten Lautsprecheranordnung liegen.

### Virtuelle Akustik zur Erforschung und Bewahrung des Kulturerbes

- Meret Stellbrink, Stefan Weinzierl  
(Technische Universität Berlin, Fachgebiet Audiokommunikation)

Erste Anwendungen der Virtuellen Akustik zur Erforschung und Dokumentation des kulturellen Erbes entstanden bereits Ende der 1990er Jahre mit dem Einsatz von raumakustischen Simulationen etwa zur Rekonstruktion der historischen Aufführungsbedingungen der Orchesterwerke Ludwig van Beethovens in Wien [1], der akustischen Verhältnisse in Theaterbauten der

klassischen Antike [2] oder von Meilensteinen der elektronischen Medienkunst wie dem oben genannten *Poème électronique* von Le Corbusier und Edgard Varèse, für das auf der Weltausstellung 1958 in Brüssel ein Pavillon entworfen und bereits kurz nach der Ausstellung wieder demontiert wurde [3]. Im Gegensatz zu Simulationen für die raumakustische oder elektroakustische Planung geht es bei diesen Projekten nicht darum, ein zukünftiges Gebäude zu planen, sondern ein verlorenes oder jedenfalls nicht mehr im Originalzustand erlebbares Gebäude oder eine nicht mehr verfügbare akustische Installation digital zu rekonstruieren. In einigen dieser Projekten wurden die Ergebnisse akustischer Simulationen auf unterschiedliche Weise hörbar gemacht.

In diesem Kontext wurden z. B. offene und geschlossene Theaterbauten der griechischen und römischen Antike durch Messungen und Simulationen akustisch analysiert [4], oder es wurden die Klavierwerke Joseph Haydns auf historischen Instrumenten eingespielt und in originalen Aufführungsräumen auralisiert [5]. „Concert Life in Vienna 1780–1830. Performances, Venues, and Repertoire“ (DFG Förderung #471268557) widmet sich der Erforschung der Konzertgeschichte in der Zeit der Wiener Klassik. Hierbei entsteht eine multimediale Online-Datenbank, in der nicht nur alle musikalischen Aufführungen in Wien zwischen 1780 und 1830, sondern auch die Orte dieser Aufführungen anhand von Grundrissen und 3D-Modellen beschrieben sind, inklusive einer Einordnung der Räume hinsichtlich ihrer akustischen Bedingungen anhand zeitgenössischer Einschätzungen. Die Auswertung dieses multimedialen Datensatzes soll Aufschluss über den Wandel der musikalischen Aufführungspraxis geben, gegenüber der Zeit, in der ein Großteil des heutigen Konzertrepertoires entstanden ist.

Die Herausforderung solcher Projekte liegt zum einen in der Offenlegung von Unsicherheiten, die aus Lücken in den historischen Quellen und aus den Unsicherheiten der akustischen Simulation selbst resultieren. Abbildung 5 gibt ein Beispiel, wie der Bezug zu den historischen Quellen sichtbar gemacht werden kann, indem das 3D-Modell für die Simulation auf den historischen Grundriss des Gebäudes projiziert wird, der der Rekonstruktion zugrunde lag. Zum anderen ist die Frage, was aus einer Auralisation historischer Räume über die Musikerfahrung einer vergangenen Zeit geschlossen werden kann, da ein heutiges Publikum diese „Re-enactments“ natürlich vor einem vollkommen anderen Erfahrungshintergrund bewertet [6]. Die Auralisation eines historischen Raumes kann hierbei sinnvoll nur im Vergleich zu einer bekannten Referenz bewertet werden, z. B. einem populären, modernen Saal, da es in der medientechnisch vermittelten Hörsi-

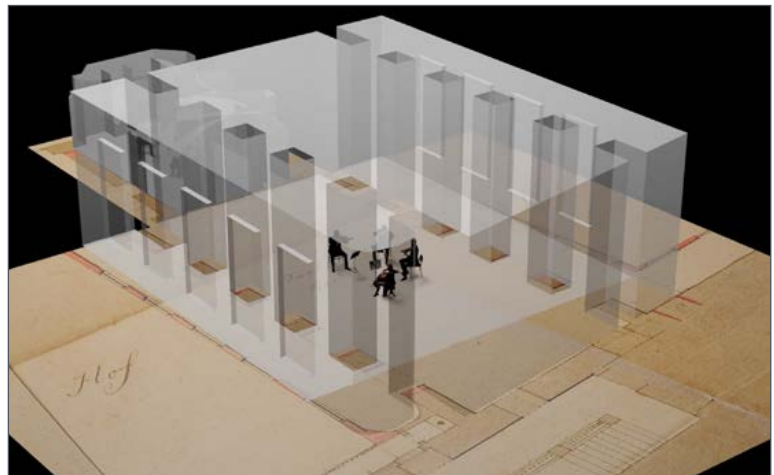


Abb. 5: Die Säle „Zum römischen Kaiser“ in Wien, in denen im Jahr 1813 erstmals eine öffentliche Konzertreihe mit der Aufführung von Streichquartetten, u. a. von L. v. Beethoven gegeben wurde. Das aus einer Planserie der Bauzeit rekonstruierte 3D-Modell ist auf den historischen Grundriss projiziert [7].

Die Binauralsynthese einer Streichquartettaufführung in diesem Raum, im Vergleich zu einer Aufführung im Kammermusiksaal der Berliner Philharmonie, ist unter <https://www.tu.berlin/ak/forschung/forschungsprojekte/konzertleben-in-wien-1780-1830-auffuehrungen-spielstaetten-und-repertoires> verfügbar.

tuation ansonsten schwierig ist, eine geeignete innere Referenz aufzurufen. Insgesamt lässt sich nur durch einen interdisziplinären Zugang, der Methoden der Akustik, der historischen Musikwissenschaft und der Ethnographie verbindet, das materielle und das noch schwerer zu erhaltende immaterielle Kulturerbe in Gestalt von Klangcharakteristiken historischer Musikaufführungen wissenschaftlich reflektiert erforschen und für ein breiteres Publikum erlebbar machen.

### Virtuelle Akustik im Metaverse

#### ■ Sebastia V. Amengual Garí

(Reality Labs Research at Meta, Menlo Park, CA, USA)

Erstmals wurde das Metaverse in dem Roman *Snow Crash* (1992) als eine immersive virtuelle Welt beschrieben, in der Menschen mit virtuellen Objekten, mit ihrer Umgebung sowie miteinander interagieren können. In den letzten Jahren wurden Head-Mounted-Displays (HMDs) und Anwendungen der Extended Reality (XR) als Zugangsgeräte zum Metaverse für das breite Publikum verfügbar, was zunehmend auch zu Diskussionen über die gesellschaftliche Rolle und den Nutzen dieser Technologie führt. Das World Wide Web Consortium (W3C) [1] gliedert das Metaverse in vier Teilbereiche: Virtuelle Welten, Spiegelwelten, Augmented Reality (AR) und Lifelogging. Während Virtuelle Welten vollständig synthetische, immersive Umgebungen sind, bilden Spiegelwelten



bestehende Räume nach, bieten Zugang zu schwer zugänglichen Orten und ermöglichen dadurch neue Formen der Interaktion. Beide können in der Praxis unter dem Begriff Virtual Reality (VR) zusammengefasst werden. Bei Augmented Reality (AR) werden virtuelle Objekte und Informationen der realen Welt überlagert, und Lifelogging beschreibt die Erfassung von Ereignissen und Erfahrungen der Nutzer:innen, oft aus der Ich-Perspektive, um diese mit anderen zu teilen oder erneut selbst zu erleben. Audio ist bei all diesen Erlebnissen ein wesentlicher Bestandteil.

Eine geeignete Audiodarbietung schafft eine räumliche Trennung von Schallquellen, eine bessere Orientierung in komplexen Umgebungen [2] und ermöglicht den Nutzer:innen eine natürlichere Kommunikation, wie z. B. das Führen beiläufiger Unterhaltungen. Außerdem unterstützt es im Vergleich zu herkömmlichen Videoanrufen eine bessere Sprachverständlichkeit, eine geringere kognitive Belastung [3], geringere Ermüdung [4] und ein besseres Verständnis [5]. Derzeit wird VR vor allem für Online-Videospiele und immersive soziale Anwendungen genutzt. Doch auch im professionellen Kontext gewinnen VR und Spatial Audio zunehmend an Bedeutung, beispielsweise für virtuelle Klassenräume oder Schulungen im industriellen Bereich, in der Notfallvorsorge oder dem Gesundheitswesen, und insbesondere in Situationen, in denen diese in der realen Welt nur begrenzt möglich sind [6]. In der Kunst ermöglichen virtuelle Welten und Spiegelwelten, dass sich mehrere Musiker einen virtuellen Raum teilen, während sie sich physisch an verschiedenen Orten befinden [7].

Augmented Reality erlaubt die Platzierung virtueller Gesprächspartner in der eigenen realen Umgebung oder kann durch räumliches Audio auch die Navigation, u. a. für sehbehinderte Personen [8] unterstützen. Spatial Audio im Lifelogging konzentriert sich auf die Aufnahme von Szenen mit kompakten Mikrofonarrays zur späteren Wiedergabe. In Verbindung mit der Aufnahme von 360°-Videos entstehen so immersive Szenen, die mit HMDs wiedergegeben werden können. Obwohl aktuelle kommerzielle Lösungen dedizierte Kameras und Mikrofon-Arrays erfordern, wurden kürzlich neue Ansätze für die Kodierung, Dekodierung und Optimierung von Mehrkanalsignalen präsentiert, welche mit tragbaren Arrays aufgenommen wurden [9, 10].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass räumliches Audio eine Schlüsselkomponente für eine Vielzahl von Metaverse-Anwendungen ist. Eine Herausforderung wird sein, eine einheitliche technologische Plattform zu erschaffen, in welcher die verschiedenen Teile des Metaverse miteinander verbunden werden können.

Die DEGA-Community hat bereits sowohl durch

die Ausbildung von Wissenschaftlicher:innen und Ingenieur:innen als auch durch wissenschaftliche Kollaborationen wichtige Beiträge zur Technologie geliefert, die das Metaverse formen wird.

Aktuelle Forschungsansätze verbessern die technische Umsetzung von AR und unterstützen das Wohlbefinden des/der Nutzers:in.

## Literatur

Virtuelle Akustik in der Forschung – ein Überblick:

- [1] Peng, J.: Feasibility of subjective speech intelligibility assessment based on auralization. *Applied Acoustics*, 66(5), pp. 591–601, 2005.
- [2] Munoz, R. V.; Aspöck, L.; Fels, J.: Spatial release from masking under different reverberant conditions in young and elderly subjects: Effect of moving or stationary maskers at circular and radial conditions. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 62(9), pp. 3 582–3 595, 2019.
- [3] Ackermann, D.; Böhm, C.; Brinkmann, F.; Weinzierl, S.: The acoustical effect of musicians' movements during musical performances. *Acta Acustica united with Acustica*, 105(2), pp. 356–367, 2019.
- [4] Lokki, T.; Pätynen, J.; Tervo, S.; Siltanen, S.; Savioja, L.: Engaging concert hall acoustics is made up of temporal envelope preserving reflections. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(6), pp. EL223–EL228, 2011.
- [5] Rodríguez-Molares, A.: A new method for auralisation of airborne sound insulation. *Applied Acoustics*, 74(1), pp. 116–121, 2013.
- [6] Oberem, J.; Seibold, J.; Koch, I.; Fels, J.: Intentional switching in auditory selective attention: Exploring attention shifts with different reverberation times. *Hearing Research*, 359, pp. 32–39, 2018.
- [7] Loh, K.; Fintor, E.; Nolden, S.; Fels, J.: Children's intentional switching of auditory selective attention in spatial and noisy acoustic environments in comparison to adults. *Developmental Psychology*, 58(1), p. 69, 2022.
- [8] Zaglauer, M.; Drotleff, H.; Liebl, A.: Background babble in open-plan offices: A natural masker of disruptive speech? *Applied Acoustics*, 118, pp. 1–7, 2017.
- [9] Pieren, R.; Lincke, D.: Auralization of aircraft flyovers with turbulence-induced coherence loss in ground effect. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 151(4), pp. 2 453–2 460, 2022.
- [10] Oberman, T.; Jambrosic, K.; Horvat, M.; Bojanic Obad Scitaroci, B.: Using virtual soundwalk approach for assessing sound art soundscape interventions in public spaces. *Applied Sciences*, 10(6), 2020.

Virtuelle Akustik für musikalisches Training:

- [1] Schärer Kalkandjiev, Z.: The Influence of Room Acoustics on Solo Music Performances. An Empirical Investigation, Dissertation, TU Berlin, 2015.
- [2] Marentakis, G.; Kranzler, C.; Frank, M.; Opitz M.; Sontachi, A.: Latency Tolerance Enhancement in In-Ear Monitoring Systems. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2012, 38. Jahrestagung für Akustik, Darmstadt, S. 323–324.
- [3] Frank, M.; Rudrich, D.; Brandner, M.: Augmented Practice-Room – Augmented Acoustics in Music Education. In Fortschritte der Akustik – DAGA 2020, 46. Jahrestagung für Akustik, Hannover, S. 151–154.
- [4] Yadav, M.; Cabrera, D.; Martens, W.L.: A system for simulating room acoustical environments for one's own voice, vol. 73(4), 2012.  
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.10.001>
- [5] Amengual Gari, S.A.; Eddy, D.; Kob, M.; Lokki, T.: Real-time auralization of room acoustics for the study of live music performance. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2016, 42. Jahrestagung für Akustik, Aachen, S. 1 474–1 477.
- [6] Mülleder, A.; Romanov, M.; Meyer-Kahlen, N.; Zotter, F.: Do-it-yourself headphones and development platform for

- augmented-reality audio. AES 2023 International Conference on Spatial and Immersive Audio, August 2023.  
<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=22188>
- [7] Klanjscek, N.; David, L.; Frank, M.: Evaluation of an e-learning tool for augmented acoustics in music education, *Music & Science*, vol. 4, 2021.  
<https://doi.org/10.1177/205920432110375>
- [8] Bertsch, M.; Frank, M.: Stage-Fright Training with EMG- or Biofeedback for Musicians by means of Virtual and Augmented Reality. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2022, 48. Jahrestagung für Akustik, Stuttgart, S. 818–821.  
<https://www.mdw.ac.at/mrm/iasbs/virtual-performance> (Projekt-URL)
- [9] Bissonnette, J.; Dubé, F.; Provencher M.D.; Moreno Sala, M. T.: Virtual Reality Exposure Training for Musicians: Its Effect on Performance Anxiety and Quality, *Medical Problems of Performing Artists*, 30(3), pp. 169–177, 2015.  
<https://doi.org/10.21091/mppa.2015.3032>
- Virtuelle Akustik in der Psychotherapie:
- [1] Carl, E.; Stein, A. T.; Levihn-Coon, A.; Pogue, J. R.; Rothbaum, B.; Emmelkamp, P.; Asmundson, G. J. G.; Carlbring, P.; Powers, M. B.: Virtual reality exposure therapy for anxiety and related disorders: A meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of Anxiety Disorders*, 61, pp. 27–36, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2018.08.003>
- [2] Foa, E. B.; Kozak, M. J.: Emotional processing of fear: Exposure to corrective information. *Psychological Bulletin*, 99(1), pp. 20–35, 1986.  
<https://doi.org/10.1037/0033-2909.99.1.20>
- [3] Diemer, J.; Alpers, G. W.; Peperkorn, H. M.; Shiban, Y.; Mühlberger, A.: The impact of perception and presence on emotional reactions: A review of research in virtual reality. *Frontiers in Psychology*, 6, 2015.  
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00026>
- [4] Roßkopf, S.; Kroczeck, L. O. H.; Stärz, F.; Blau, M.; Van De Par, S.; Mühlberger, A.: Comparable sound source localization of plausible auralizations and real sound sources evaluated in a naturalistic eye-tracking task in virtual reality. *Forum Acusticum*, 2023.
- [5] Mühlberger, A.; Jekel, K.; Probst, T.; Schecklmann, M.; Conzelmann, A.; Andreatta, M.; Rizzo, A. A.; Pauli, P.; Romanos, M.: The Influence of Methylphenidate on Hyperactivity and Attention Deficits in Children With ADHD: A Virtual Classroom Test. *Journal of Attention Disorders*, 24(2), pp. 277–289, 2020. <https://doi.org/10.1177/1087054716647480>
- [6] Craig, T. K.; Rus-Calafell, M.; Ward, T.; Leff, J. P.; Huckvale, M.; Howarth, E.; Emsley, R.; Garety, P. A.: AVATAR therapy for auditory verbal hallucinations in people with psychosis: A single-blind, randomised controlled trial. *The Lancet Psychiatry*, 5(1), pp. 31–40, 2018.  
[https://doi.org/10.1016/S2215-0366\(17\)30427-3](https://doi.org/10.1016/S2215-0366(17)30427-3)
- Virtuelle Akustik in der Audiologie:
- [1] Bronkhorst, A. W.: The Cocktail Party Phenomenon: A Review of Research on Speech Intelligibility in Multiple-Talker Conditions. *Acta Acustica united with Acustica* 86, pp. 117–128, 2000.
- [2] Wolters, F.; Smeds, K.; Schmidt, E.; Christensen, E. K.; Norup, C.: Common Sound Scenarios: A Context-Driven Categorization of Everyday Sound Environments for Application in Hearing-Device Research. *J Am Acad Audiol* 27, pp. 527–540, 2016.
- [3] Weisser, A.; Buchholz, J. M.; Keidser, G.: Complex Acoustic Environments: Review, Framework, and Subjective Model. *Trends Hear* 23, 2331216519881346, 2019.
- [4] van de Par, S.; Ewert, S. D.; Hládek, L.; Kirsch, C.; Schütze, J.; Llorca-Bofí, J.; Grimm, G.; Hendrikse, M. M. E.; Kollmeier, B.; Seeber, B. U.: Auditory-visual scenes for hearing research. *Acta Acust* 55, 2022.  
<https://doi.org/10.1051/aacus/2022032>
- [5] Hládek, H.; Ewert, S.; Seeber, B. U.: Communication conditions in virtual acoustic scenes in an underground station. In: 2021 Immersive and 3D Audio: from Architecture to Automotive (I3DA) (Bologna, Italy), pp. 1–8, 2021.  
<https://doi.org/10.1109/I3DA48870.2021.9610843>
- [6] Kuntz, M.; Bischof, N. F.; Seeber, B. U.: Sound field synthesis for psychoacoustic research: in-situ evaluation of auralized sound pressure level. *J Acoust Soc Am*, 154 (3), 2023.  
<https://doi.org/10.1121/10.0021066>
- [7] Kerber, S.; Seeber, B. U.: Localization in reverberation with cochlear implants: predicting performance from basic psychophysical measures. *J Assoc Res Otolaryngol* 14, pp. 379–392, 2013.
- Virtuelle Akustik in der Stadtplanung:
- [1] Kang, J.; Schulte-Fortkamp, B.: *Soundscape and the Built Environment*. CRC Press, Boca Raton, U.S., 2016.
- [2] Llorca-Bofí, J.; Dreier, C.; Heck, J.; Vorländer, M.: Urban Sound Auralization and Visualization Framework – Case Study at IHTApark. *Sustainability* 14(4), 2022.  
<https://doi.org/10.3390/su14042026>
- [3] Tarlao, C.; Steele, D.; Blanc, G.; Guastavino, C.: Interactive soundscape simulation as a co-design tool for urban professionals. *Landscape and Urban Planning* 231, 104642, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104642>
- [4] Stienen, J.: Real-time auralization of outdoor sound propagation. Dissertation RWTH Aachen, Logos-Verlag, Berlin, 2023.
- [5] Hornikx, M.; Forssén, J.: Noise abatement schemes for shielded canyons. *Applied Acoustics* 70 (2), pp. 267–283, 2009.  
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2008.04.002>
- [6] IHTApark. Physically-based auralization and visualization. <https://youtu.be/rudxfV94UwA>
- [7] Pieren, R.: Auralization of Environmental Acoustical Scenarios – Synthesis of Road Traffic, Railway and Wind Turbine Noise. Dissertation Delft University of Technology, 2018.
- [8] Dreier, C.; Vorländer, M.: Aircraft noise – Auralization-based assessment of weather-dependent effects on loudness and sharpness. *J. Acoust. Soc. Am.* 149 (5), pp. 3565–3575, 2021. <https://doi.org/10.1121/10.0005040>
- Virtuelle Akustik in der Veranstaltungstechnik:
- [1] Sladeczek, C.; Rodigast, R.; Seideneck, M.; Frutos-Bonilla, J.; Gehlhaar, T.: Objektbasierte interaktive 3D-Audio Anwendungen. *FKTG Fachzeitschrift*, November 2016.
- [2] Dausel, M.; Deguara, J.; Gatzsche, G.; Melchior, F.; Reichelt, K.; Strauss, M.: Universal System for Spatial Sound Reinforcement in Theatres and Large Venues – System Design and User Interface, 120th Convention of the Audio Engineering Society (AES), Paris, 2006.
- [3] Rodigast, R.; Overschmidt, G.; Schröder, U. (Hrsg.): *Full-space Projection, Kapitel 27 – Klangraum Kuppel*. Springer Verlag Heidelberg 2013. ISBN 978-3-642-24655-5.
- Virtuelle Akustik und Hörskulpturen in der elektroakustischen Komposition:
- [1] Winckel, F. W.; Krause, M.: Acoustical and Electroacoustical Arrangement for the Dynamically Focused Room. *Journal of the Audio Engineering Society*, 20(3), pp. 198–206, 1972. <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=2084>
- [2] Barrett, N.: *Spatial Music Composition: in 3D Audio*, 1st ed, Justin Paterson and Hyunkook Lee (eds), Routledge, 2021. <https://doi.org/10.4324/9780429491214>
- [3] Peters, N.; Marentakis, G.; McAdams, S.: Current technologies and compositional practices for spatialization: A qualitative and quantitative analysis. *Computer Music Journal*, 35(1), pp. 10–27, 2011.  
[https://doi.org/10.1162/COMJ\\_a\\_00037](https://doi.org/10.1162/COMJ_a_00037)
- [4] Spors, S.; Wierstorf, H.; Raake, A.; Melchior, F.; Frank, M.; Zotter, F.: Spatial Sound With Loudspeakers and Its Perception: A Review of the Current State. In: *Proceedings of the IEEE*, Vol. 101, No. 9, pp. 1920–1938, Sept. 2013.  
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2264784>
- [5] Barrett, N.: Spatio-musical composition strategies: Organised sound, 7(3), pp. 313–323, 2002.  
<https://doi.org/10.1017/S1355771802003114>
- [6] Baalman, M.: On Wave Field Synthesis and electro-acoustic music, with a particular focus on the reproduction of arbitra-

rily shaped sound sources, Dissertation, TU Berlin, 2008.

<https://doi.org/10.14279/depositonce-1883>

- [7] Wendt, F.; Sharma, G. K.; Frank, M.; Zotter, F.; Höldrich, R.: Perception of spatial sound phenomena created by the icosahedral loudspeaker. *Computer Music Journal*, 41(1), pp. 76–88, 2017. [https://doi.org/10.1162/COMJ\\_a\\_00396](https://doi.org/10.1162/COMJ_a_00396)
- [8] Sharma, G. K.; Frank, M.; Zotter, F.: Evaluation of Three Auditory-Sculptural Qualities Created by an Icosahedral Loudspeaker. *Applied Sciences*, 9(13), p. 2698, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9132698>
- [9] Barrett, N.: Composing Spatial Music Beyond Technology. Keynote at AES Int. Conf. on Spatial and Immersive Audio, Huddersfield, UK, 2023.
- [10] Tremblay, P.A.; Roma, G.; Green, O.: Enabling Programmatic Data Mining as Musicking: The Fluid Corpus Manipulation Toolkit. *Computer Music Journal*, 45(2), pp. 9–23, 2022. [https://doi.org/10.1162/comj\\_a\\_00600](https://doi.org/10.1162/comj_a_00600)

Virtuelle Akustik zur Erforschung und Bewahrung des Kulturerbes:

- [1] Weinzierl, S.: Beethovens Konzerträume: Raumakustik und symphonische Aufführungspraxis an der Schwelle zum modernen Konzertwesen. Erwin Bochinsky Verlag, 2002.
- [2] Rindel, J. H.; Lisa, M.: The ERATO project and its contribution to our understanding of the acoustics of ancient Greek and Roman theatres. In: *Proceedings of the ERATO Project Symposium*, pp. 1–10, 2006.
- [3] Lombardo, V.; Valle, A.; Fitch, J.; Tazelaar, K.; Weinzierl, S.; Borczyk, W.: A virtual-reality reconstruction of poeme électronique based on philological research. *Computer Music Journal*, 33(2), pp. 24–47, 2009.
- [4] Naif Haddad: Criteria for the Assessment of the Modern Use of Ancient Theatres and Odea. *International Journal of Heritage Studies*, 13:3, pp. 265–280, 2007.
- [5] Beghin, T.: *The virtual Haydn: Paradox of a twenty-first-century keyboardist*. University of Chicago Press, 2015.
- [6] Weinzierl, S.; Lepa, S.: On the epistemic potential of virtual realities for the historical sciences. A methodological framework. In: J. M. Ariso (Hrsg.), *Augmented reality: Reflections on its contribution to knowledge formation* (S. 61–80). De Gruyter, 2017.
- [7] Albrecht, C.; Weinzierl, S.: Die Säle Zum Römischen Kaiser. Rekonstruktion und Auralisation der ersten öffentlichen Aufführungsräume für Kammermusik in Wien. *Musiktheorie*, 37(1), S. 69–83, 2022.

Virtuelle Akustik im Metaverse:

- [1] Smart, E. J.; Cascio, J.; Paffendorf, J.: *Metaverse Roadmap Overview*. World Wide Web Consortium (W3C), 2007.
- [2] Amengual Garí, S.; Calamia, P.; Robinson, P.: Navigation of virtual mazes using acoustic cues. In: *Audio Engineering Society Convention 154*. Audio Engineering Society, 2023.
- [3] Xia, J.; Nooraei, N.; Kalluri, S.; Edwards, B.: Spatial release of cognitive load measured in a dual-task paradigm in normal-hearing and hearing-impaired listeners. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(4), pp. 1888–1898, 2015.
- [4] Fauville, G.; Luo, M.; Queiroz, A. C. M.; Bailenson, J. N.; Hancock, J.: Zoom Exhaustion & Fatigue Scale. *Computers in Human Behavior Reports*, 4:100119, 2021.
- [5] Baldis, J. J.: Effects of spatial audio on memory, comprehension, and preference during desktop conferences. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '01*, pp. 166–173, New York, NY, USA, 2001. Association for Computing Machinery.
- [6] Renganayagalu, S. K.; Mallam, S. C.; Nazir, S.: Effectiveness of VR Head Mounted Displays in Professional Training: A Systematic Review. *Technology, Knowledge and Learning*, 26(4), pp. 999–1041, December 2021.
- [7] Cairns, P.; Hunt, A.; Cooper, J.; Johnston, D.; Lee, B.; Daffern, H.; Kearney, G.: Recording Music in the Metaverse: A case study of XR BBC Maida Vale Recording Studios. In: *AES 2022 International Audio for Virtual and Augmented Reality Conference*. Audio Engineering Society, August 2022.
- [8] Zhao, Y.; Kupferstein, E.; Rojnirun, H.; Findlater, L.; Azen-

kot, S.: The Effectiveness of Visual and Audio Wayfinding Guidance on Smartglasses for People with Low Vision. In: *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '20*, pp. 1–14, New York, NY, USA, April 2020. Association for Computing Machinery.

- [9] McCormack, L.; Politis, A.; Gonzalez, R.; Lokki, T.; Pulkki, V.: Parametric ambisonic encoding of arbitrary microphone arrays. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 30:2062–2075, 2022.
- [10] Fernandez, J.; McCormack, L.; Hyvärinen, P.; Politis, A.; Pulkki, V.: A spatial enhancement approach for binaural rendering of head-worn microphone arrays. In: *ICA 2022 Proceedings*, 2022. ■

**Editor:innen:**  
**Annika Neidhardt**  
*University of Surrey,*  
*Guildford (UK)*

**Jens Ahrens**  
*Chalmers University*  
*of Technology,*  
*Göteborg (SWE)*

**Christoph Pörschmann**  
*Technische Hochschule*  
*Köln*