

# Virtuelle akustische Welten in Forschung und Praxis

Michael Vorländer

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

## Einleitung

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

## Virtual acoustic worlds in research and practice

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

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

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

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

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

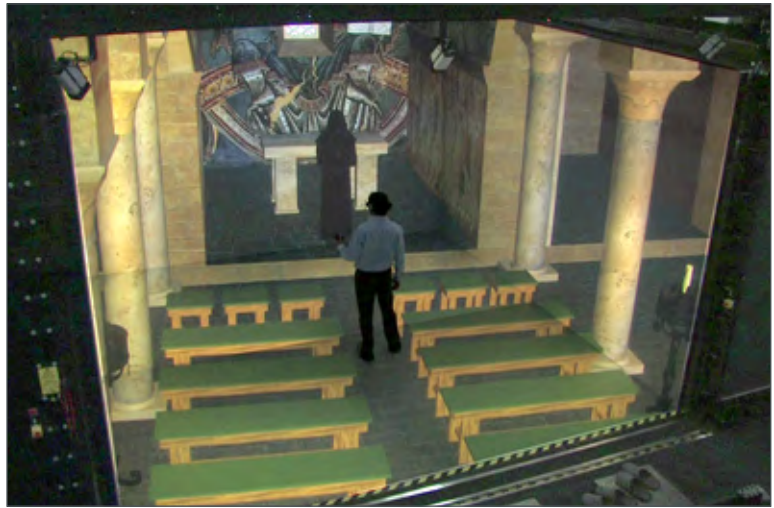


Abb. 1: Zeitreise ins 11. Jahrhundert – Einblicke in die Kunstgeschichte spanischer Kirchen und des Mozarabischen Gesangs [1].

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

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

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





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

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

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

### Von der Simulation zur Auralisation zur Akustischen Virtuellen Realität

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



**Norsonic**

**Tippkemper** norsonic

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

## Schallpegelmesser Nor145

### Schallimmissionsschutz

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

### Bauakustik / Raumakustik

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

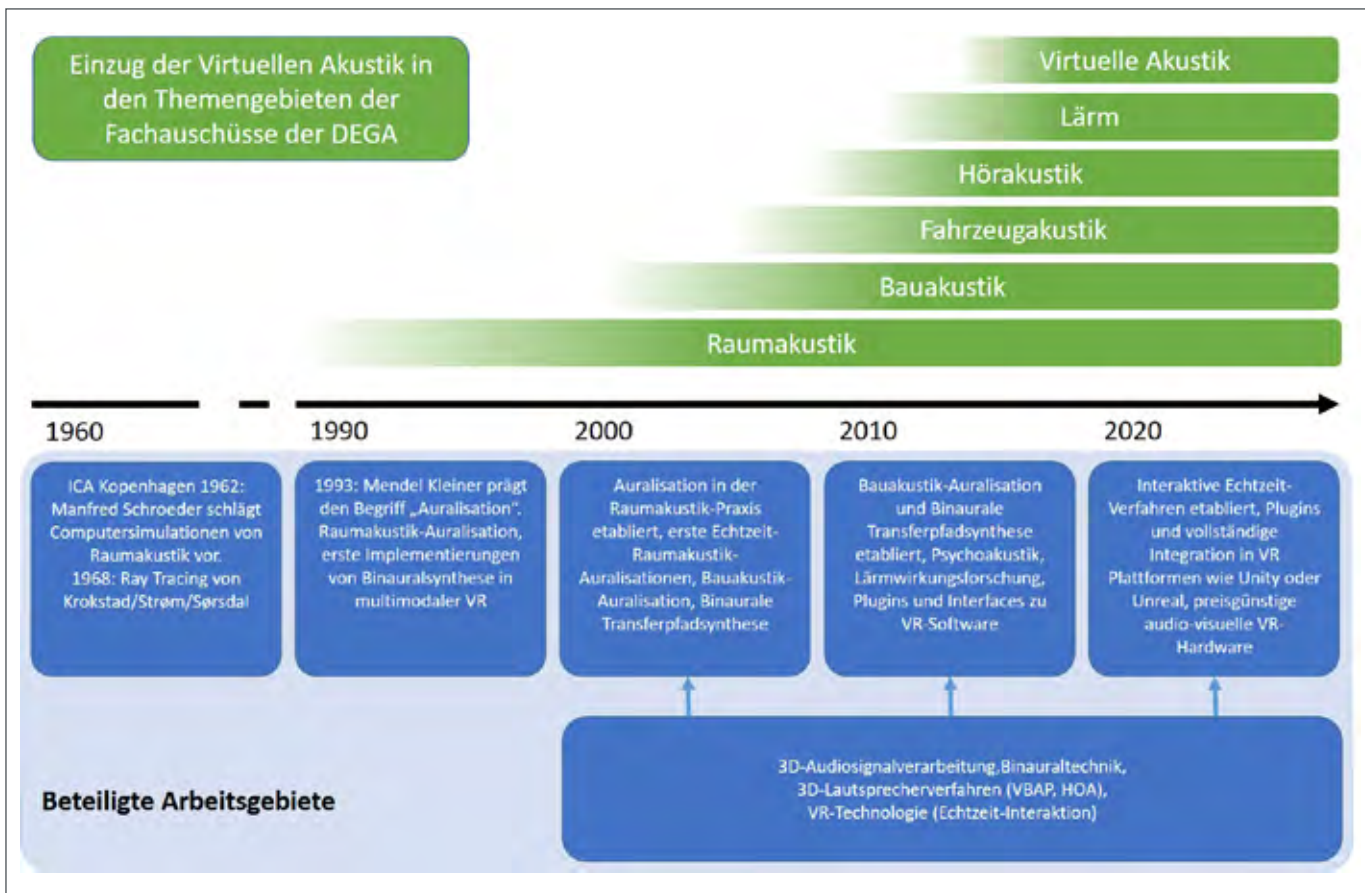


Abb. 3: Zeitliche Entwicklung der Virtuellen Akustik mit Gründung des Fachausschusses „Virtuelle Akustik“ der DEGA im Jahre 2015.

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

#### Raumakustische Simulationen

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

#### Auralisation

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

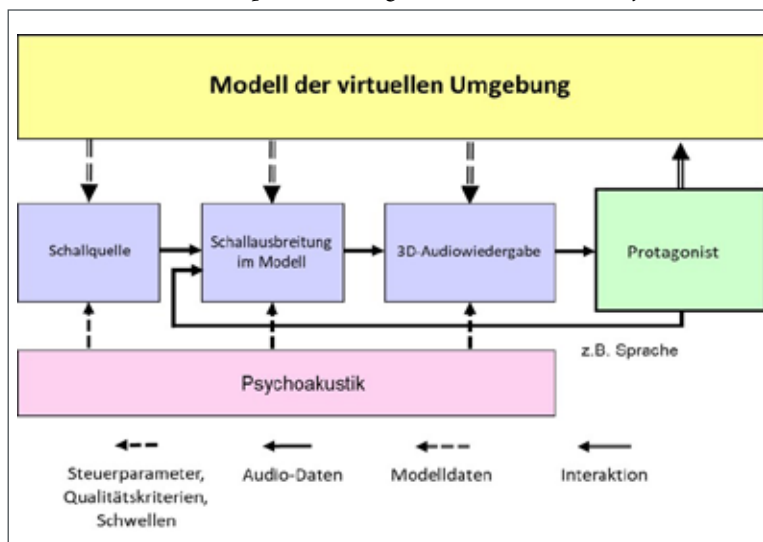
Nun ist es so, dass Impulsantworten eine zentrale Bedeutung bei der Auralisation haben. Sie können mehr oder weniger unmittelbar auch als Audiofilter verstanden werden. Impulsantworten beschreiben die Schallausbreitung in der betreffenden Umgebung vollständig, sofern man von linearen und zeitinvarianten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

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

#### Virtuelle Akustik

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

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



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

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

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

#### **Herausforderungen der akustischen virtuellen Realität – Interaktion in Echtzeit**

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



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

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

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

### Arbeitsschritte zur Schaffung virtueller akustischer Szenen

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

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

Zuerst müssen Datensätze für Schallquellen und Empfänger in geeigneter Form erstellt werden. Dies bedeutet eine Berücksichtigung zeitlicher und spektraler Eigenschaften, aber auch der räumlichen (Richt-)Wirkungen.

### Schallquellen-Charakterisierung

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

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

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

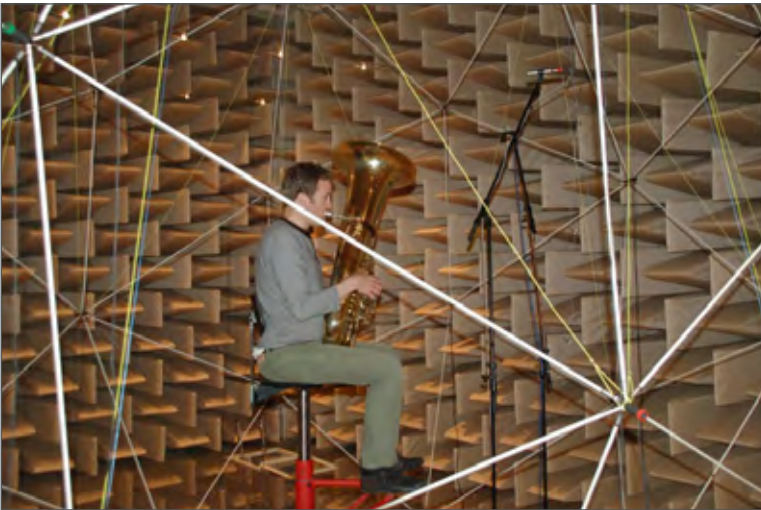


Abb. 5: Messung der Richtcharakteristik einer Tuba mit einem 32-kanaligen Mikrofonarray.

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

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

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

### Schallausbreitungsmodelle

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

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

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

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

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

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

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

**MBBM**  
MÜLLER·BBM GROUP

**Beratung | Dienstleistungen | Produkte**



Besuchen Sie uns  
auf der DAGA 2021  
in der Online-Ausstellung  
[www.daga2021.eu](http://www.daga2021.eu)

## Kompetenz in Akustik und Schwingungen

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

**Messung | Analyse | Lösung | Innovation**

[www.mbbm.de](http://www.mbbm.de)



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

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

### 3D-Hören und -Sehen in virtuellen Welten

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

### Anwendungsbeispiele

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

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

### Beratungsprojekte im Bauwesen

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

Sofern die architektonische Umgebung noch nicht



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

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

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

#### Entwicklungsprozesse in der Industrie („Virtual Prototyping“)

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

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

#### Historische Szenen

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



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

#### Forschung und Lehre

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

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

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

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

#### **Abschließende Bemerkungen – wo geht die Reise hin?**

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

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

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

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

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

## Fazit

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

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

## Danksagung

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

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

## Multimedia-Beispiele

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

## Literatur

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

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



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