

Möglichkeiten der Auralisation

Michael Vorländer
Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen
DE-Aachen



Möglichkeiten der Auralisation

1. Von der Simulation zur Auralisation

Numerische Simulationen sind für die Forschung in vielen Wissenschaften unverzichtbar, ganz abgesehen von den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten für Lösungen von praktischen Problemen in Entwurfsprozessen und in der Produktentwicklung. Das Element der Computergrafik und der Visualisierung hat sich dabei zu einer fast eigenständigen Fachdisziplin entwickelt. Die Sichtbarmachung komplexer Daten wie Temperaturen an Fassaden, Luftströmungen in Stadtgebieten oder Spannungen in Tragwerken sind nur wenige Beispiele, und diese auch nur aus dem Bauwesen. In Darstellungen dieser Art wird die physikalische Größe in Farbskalen dargestellt, meist in Übergängen von rot zu blau für die Abbildung großer und kleiner Werte. Die physikalischen Daten werden so in eine intuitive Skala eines menschlichen Sinnes umgesetzt, und zwar für das Auge.

Auch akustische Daten werden oft visualisiert. Nur stellt sich hier die Frage, wieso man so etwas tun sollte, wenn doch das Ohr zur Verfügung steht. Selbst wenn viele Disziplinen augenorientiert sind, und dies gerade in der Architektur, ist doch eine direkte Umsetzung von physikalischen akustischen Daten (= Schall) in etwas Hörbares der einzig zielführende Weg, wenn man Entwürfe hinsichtlich ihrer akustischen Wirkung beurteilen will.

Dieser Vorgang, der äquivalent zur Visualisierung ist, wird „Auralisation“ genannt. Die Visualisierung ist üblicherweise ein Bild oder ein Film, und der Prozess der Herstellung des Bildes wie auch das Bild selbst werden als „die Visualisierung“ bezeichnet. Ebenso kann man bei der Auralisation den Vorgang der Erzeugung als auch das Ergebnis als Auralisation bezeichnen, wobei das Ergebnis kein Bild, sondern ein von einem geeigneten Gerät abspielbare Tondatei ist (Computer mit Sound-Ausgang und Kopfhörer).

Wenn nun Raumakustik auralisiert werden soll, müssen die Reflexionen und Schallstreuungen an den Raumbegrenzungen berechnet und in ein Signalverarbeitungsmodell umgesetzt werden, damit man die Schallereignisse (Sprache, Musik, Lärm) so aufbereiten kann, dass sie quasi in diesem Raum stattfinden würden. Das entsprechende kann auch auf Fragen der Schalldämmung angewendet werden, wenn wir die Auralisation der Bauakustik für Luftschall- oder Körperschallprobleme untersuchen wollen.

2. Aspekte der Raumakustik

Das auffälligste akustische Merkmal eines Raumes ist sicherlich sein Nachhall. Daneben gibt es eine Reihe anderer Höreindrücke in einem Raum, die mit Begriffen wie Silbenverständlichkeit, Transparenz und Räumlichkeit beschrieben werden können. Der Nachhall ist natürlich nicht nur am Ende eines Schallereignisses vorhanden, sondern während der gesamten Schalldauer und bewirkt ein gewisses zeitliches Verschmelzen aufeinander folgender Signalabschnitte. Dies wirkt sich bei Sprache und Musik unterschiedlich aus. Bei Sprache bewirkt der Nachhall eine Vermischung aufeinander folgender Sprachlaute oder -silben und setzt daher die Verständlichkeit herab. Diese Minderung kann bis zu einem gewissen Grad toleriert werden, zumal es in der Praxis ohnehin keine nachhallfreien Räume gibt.

In Arbeitsräumen fördert ein langer Nachhall die Entstehung eines hohen Lärmpegels. Die Absenkung der Nachhallzeit durch schallschluckende Verkleidungen kann hier also auch eine Maßnahme der Lärmbekämpfung sein.

Um zu verstehen, wie sich Schall in Räumen ausbreitet und welche Kriterien für „die Raumakustik“ relevant sind, überlegen wir uns ein einfaches Modell, und zwar das der so genannten „Geometrischen Akustik“. Sendet die Schallquelle einen kurzen Impuls aus, so besteht die am Ohr des Zuhörers auftretende Antwort des Raumes aus einer ganzen Folge von Impulsen, deren Dichte mit der Zeit im Mittel quadratisch zunimmt, deren Stärke aber immer kleiner wird.

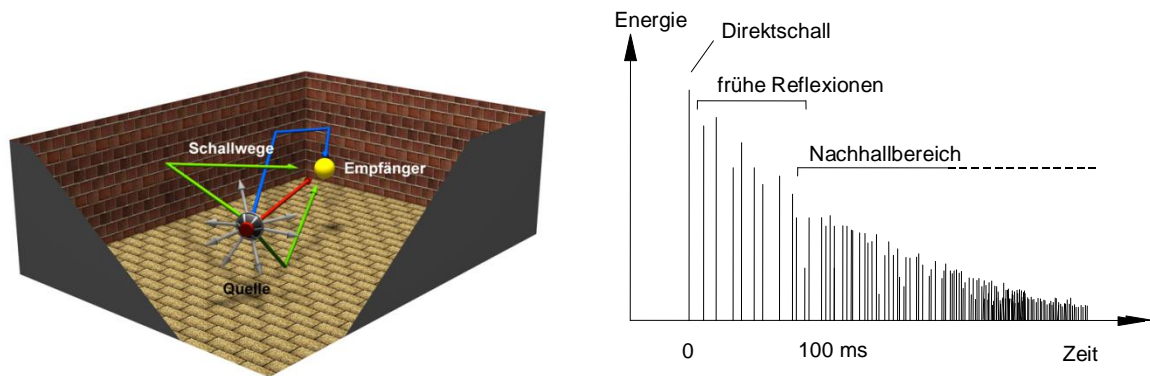


Abbildung 1: Ein Raum und dessen Impulsantwort. Die Schallquelle (links) zeigt eine allseitige Abstrahlung. Es werden drei Schallstrahlen gezeigt, deren Ausbreitung auf geometrischen Pfaden berechnet wird. Die Impulsantwort (rechts) wird dann aus allen je nach Laufzeiten verzögerten Schallanteilen der Strahlen ermittelt, die den Empfänger treffen.

Der erste Teilimpuls, der Direktschall, legt die Richtung fest, aus der die Schallquelle gehört wird. Die Rückwürfe, die nur weniger als etwa 50 ms gegenüber dem Direktschall verzögert sind, werden gehörmäßig dem Direktschall zugerechnet, vergrößern also dessen scheinbare Lautstärke („nützliche“ Reflexionen). Alle anderen Rückwürfe bilden den Nachhall. Falls unter den länger als um 50 ms verzögerten Impulsen einer die anderen energiemäßig deutlich überragt, wird er als echte Wiederholung (Echo) gehört, was in der Regel sehr ungünstig ist.

Ferner ist es für die Musikwahrnehmung in Räumen wesentlich, dass der Schall nicht ausschließlich von der Quelle herzukommen scheint, sondern dass sich der Zuhörer gleichsam von Schall eingehüllt fühlt, ohne die Fähigkeit der gehörmäßigen Lokalisierung der Schallquelle zu verlieren. Es liegt auf der Hand, dass dieser subjektive Eindruck eines räumlich ausgedehnten Schallfelds wesentlich darauf beruht, dass wir zweiohrig hören und dabei zwar nicht die Einfallsrichtung der einzelnen Rückwürfe unterscheiden können, wohl aber in pauschalerer Form einen Eindruck von der Dreidimensionalität des Schallfelds in einem Raum erhalten.

Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, werden so genannte binaurale Übertragungsfunktionen verwendet, die quasi einen „Kunstkopf“ nachbilden (s.u., Abschnitt 4). Mit einem Kunstkopf ist es möglich, die auf einen Menschen aus allen Raumrichtungen einfallenden Schallwellen so aufzuzeichnen, dass bei einer geeigneten Wiedergabe (z.B. mit Kopfhörern) die Reize am Trommelfell exakt reproduziert werden können. Falls das geschieht, ist die Schallwirkung exakt die gleiche wie in der Aufnahme- oder Synthesituation.

3. Grundzüge akustischer Computersimulationen

3.1. Simulation der Raumakustik

Bei der raumakustischen Computersimulation wird eine geometrische Nachbildung des Raumes mit Hilfe von Flächen (Polygonen) erstellt. Die Computerverfahren bestehen letztlich in der Lösung geometrischer Algebra, nämlich in der Verfolgung von Strahlen oder Schallteilchen auf Geraden, die Ebenen schneiden, reflektiert oder detektiert werden. Die Verfahren werden angewendet zur Berechnung einiger raumakustischer Kenngrößen oder eben zur „Auralisation“ (Binaurale Raumsimulation). Grundsätzlich unterscheidet man dabei zwei Modellansätze: Ray-Tracing- und Spiegelschallquellen-Verfahren. Mit beiden Verfahren kann man die Schallausbreitung im Raum visualisieren (s. Abbildung) oder man kann Impulsantworten berechnen, welche die Grundlage der Auralisation bilden. Ferner ist wichtig, dass notwendigerweise beide Verfahren eingesetzt werden müssen, um die physikalischen Effekte der Spiegelung an akustisch glatten Flächen und der Streuung an akustisch rauen Flächen berücksichtigen zu können.

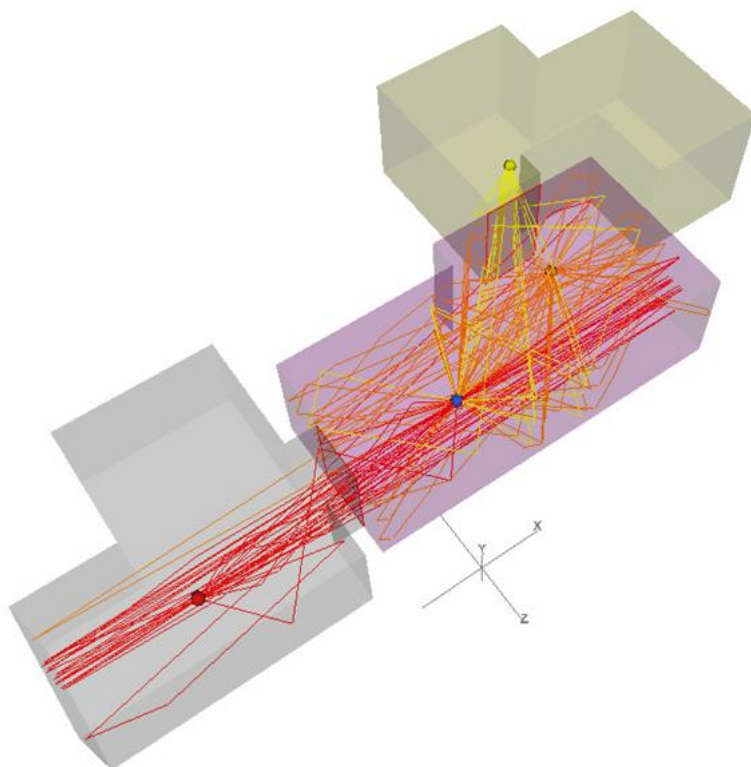


Abbildung 2: Virtuelle Raumakustik. Ray-Tracing in einem Saal mit anschließenden Räumen.

Die geometrische Akustik ermöglicht Simulationen von Schallfeldern in Räumen und im Freien. Die darin gemachten Näherungen sind für große Räume und/oder hohe Frequenzen normalerweise vollkommen hinreichend. Gewisse Erweiterungen der geometrischen Akustik, insbesondere die Berücksichtigung komplexer Flächenimpedanzen, verführen allerdings zu unbedachten Anwendungen und zum irrigen Glauben, dass man nun auch Eigenschwingungen (Raumresonanzen) in kleinen Räumen wie Wohnräumen oder gar PKW-Innenräumen ermitteln kann.

Während die Schallstreuung an den Wandflächen dafür sorgt, dass die Diffusität des Schallfeldes zunimmt, kann eine ungeeignete Wandgeometrie auch das Gegenteil, nämlich unerwünschte Schallfokussierungen, bewirken. Dies ist beispielsweise in Räumen mit wenig absorbierenden, glatten zylinderförmigen Seitenwänden oder Kuppeldächern zu erwarten. Soll die Simulation ein geeignetes Instrument für die raumakustische Planung sein, so müssen auch solche gekrümmte Wandflächen auf geeignete Weise berücksichtigt werden können. Dies kann die geometrische Akustik allerdings nur begrenzt leisten, indem die Problematik eines Fokus qualitativ aufgedeckt wird, aber keine exakte Berechnung eines Echopegels möglich ist. Sofern unbedingt akustisch relevante Räume mit Kuppeln oder anderen gekrümmten Flächen gebaut werden müssen, ist trotz der Verfügbarkeit der Computersimulationen größte Vorsicht nach wie vor angezeigt, und als sicheres Planungswerkzeug steht immerhin die Modellmesstechnik zur Verfügung.

Schließlich haben wir für nicht zu kleine Räume Methoden zur Verfügung, welche den Direktschall und die wichtigen frühen Reflexionen recht präzise berechnen können. Der später eintreffende Nachhall ist ohnehin eher stochastischer Natur und im Raum gleichverteilt. Somit kann man die Strategien zur Auralisation in dem Sinne weiter verfolgen, wie diese Betrachtungen und Vereinfachungen gehörmäßig richtig sind, d.h. die Vereinfachungen nicht hörbar sind, wenn man das Ergebnis mit dem echten Hörerlebnis im Saal vergleichen würde. Dieser Aspekt wird am Ende entscheidend sein, wenn man die Qualität der Auralisation beurteilen wird.

3.2. Simulation von Schalldämmung

Die Bauakustik beschäftigt sich mit der Schall- und Schwingungsausbreitung in Gebäuden mittels technischer Mess- und Rechenverfahren sowie mit sozialen und rechtlichen Fragen der Beurteilung des Schallschutzes in Gebäuden. Dabei ist jeweils Luftschall und Körperschall hinsichtlich der Anregung und der Fortpflanzung in Gebäude zu unterscheiden. Beispielsweise würde eine laut eingestellte Hifi-Anlage zunächst Luftschall im „Senderraum“ abstrahlen. Die Schallübertragung in den sog. „Empfangsraum“, der ein schutzbedürftiger Raum im Sinne des baulichen Lärmschutzes sein kann (z.B. ein Schlafzimmer in fremdem Wohnbereich) erfolgt dann über vielfältige Wege, z.B. als Luftschall über Lüftungskanäle, als Körperschall direkt über die Trennwand oder als Umwandlungen von Luft- in Körperschall und umgekehrt auf verschiedensten direkten und indirekten Wegen der Flankenübertragung. Körperschall, der durch Gehen auf Decken erzeugt wird, nennt man „Trittschall“. Weiterhin ist noch der Körperschall aus haustechnischen Anlagen (Frisch- und Abwasserinstallation, Klimaanlage, etc.) von Interesse, sowie die Schalldämmung von Fassaden gegen Außenlärm (Industrielärm, Straßen- und Luftverkehrslärm). In einer typischen Raum-zu-Raum-Situation empfindet man die Übertragung von Musik oder Sprache als „leise“ (glücklicherweise) und „dumpf“. Die Auralisation muss also in erster Linie diese Effekte nachbilden, d.h. die Lautheit und die Klangfarbe. Räumliche Effekte wie in der Raumakustik spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Für die Berechnung wird die Raum-zu-Raum-Situation bezüglich der Energiepfade ausgespalten. Jedem Pfad wird ein in Terzen oder Oktaven vorliegender Dämmverlauf des jeweiligen Bauteils zugeordnet (aus einem Bauteilkatalog). In einer konsequenten und theoretisch fundierten Vorgehensweise kann man ein auf physikalische Prinzipien ausgerichtetes Rechenmodell verwenden, welches auf der sog. statistischen Energieanalyse (SEA) basiert. SEA-Verfahren nutzen das Energiegleichgewicht zwischen gekoppelten Resonanzsystemen hoher Modendichte aus. Die Energieübertragung über alle beteiligten Bauteile wird jeweils einzeln berechnet und entsprechend der Bausituation für den Empfangsraum zusammengefasst. Als Ergebnis erhält man eine Schallpegeldifferenz. Bei Vorgabe der Schallquelle erhält man einen resultierenden Schall im Empfangsraum, bzw. bei Impulsanregung ebenfalls, wie oben beschrieben, eine Impulsantwort, die nun nicht nur die Schallübertragung im Raum, sondern von Raum zu Raum „durch die Wand“ repräsentiert.

4. Signalverarbeitung für die Auralisation

Auf Grundlage der berechneten Impulsantworten aus der Raum- und Bauakustik können die nächsten Schritte für die Auralisation unmittelbar in Angriff genommen werden. Der Kern der Auralisation ist die Filterung („Färbung“) von Schallen mit den Charakteristika (Impulsantworten) der Schallübertragung in Räumen oder zwischen Räumen. Dieser Prozess wird in der Signalverarbeitung „Faltung“ genannt. Eine nachhallfreie („trockene“) Schallaufnahme klingt danach so, als wenn sie in der entsprechenden simulierten Umgebung erzeugt worden wäre.

Die Räumlichkeit des Schallereignisses wird durch die Kopfkopftechnik erzielt. Diese Art der Verarbeitung erlaubt eine richtungsgetreue Wiedergabe für das Ohr, in dem die natürlichen Reflexions- und Beugungseffekte an Kopf und Ohren des Zuhörers berücksichtigt werden.

Eine derartige binaurale Synthese kann in prinzipiell allen akustischen Innen- oder Außenszenarien, sofern die Schallpfade in Laufzeit, Intensität und Richtung bekannt sind. Das akustische Empfinden ist dann konsistent mit dem realen Schallereignis, welches der Simulation zugrundeliegt. Diese Variante der Auralisation ist unmittelbar für eine Kopfhörerwiedergabe geeignet.

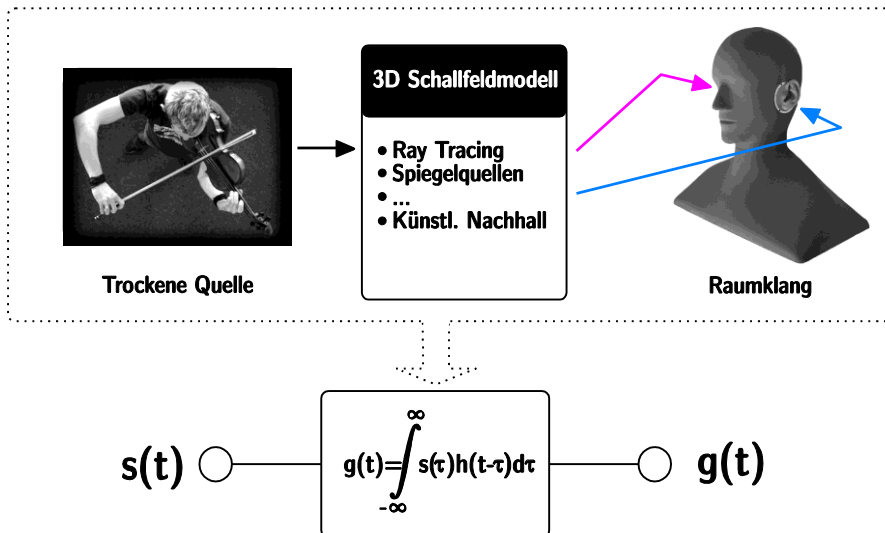


Abbildung 3: Abbildung des Vorgangs der Schallausbreitung auf ein Modell der Signalverarbeitung. Die Zeitfunktion der trockenen Aufnahme (Schallaufnahme) wird mit binauralen Impulsantworten gefaltet.

Hörbeispiele von auralisierten Räumen und Gebäuden für Kopfhörer finden sich unter: <http://www.akustik.rwth-aachen.de/Forschung/Projekte/raven>

Ein Merkmal derartiger Auralisationen ist, dass die simulierte Schallszene und der Zuhörer ortsfest im Raum stehen. Das ist durchaus ein erster wichtiger Schritt, aber doch noch ein Stück von der Realität entfernt, in der eine freie Bewegungsfreiheit herrscht. Gerade in unklaren Situationen der Schalllokalisierung drehen wir bewusst oder unbewusst den Kopf, um uns akustisch zu orientieren oder den Raum in all seinen akustischen Facetten zu erleben. Darüber hinaus kann man sich vorstellen, dass man gerne durch den Raum laufen würde, um die akustischen Bedingungen beispielsweise der Sprachverständlichkeit, der musikalischen Qualität oder der Lärmbelastigung zu untersuchen.

5. Akustische Virtuelle Realität

Wir stellen uns nun vor, dass die Abhörsituation nicht absolut statisch ist, sondern dass man sich beim Hören bewegen darf. Das bedeutet für die Simulation unmittelbar, dass veränderte akustische Bedingungen (Impulsantworten) ständig neu berechnet werden müssen, sobald sich eine hörbare Veränderung ergeben würde. Klar ist, dass der Schall in der Nähe zur Schallquelle anders klingt als in großer Entfernung, bei der das Hallfeld überwiegt. Aber auch kleine Bewegungen und insbesondere Kopfdrehungen bewirken einen besseren Effekt der „Immersion“, d.h. der glaubhaften Integration des Hörers in den dreidimensionalen Raum.

Alles, was zuvor beschrieben wurde, ist auch hier weiter verwendbar, die Methoden der Schallfeldsimulation, der Signalverarbeitung und der Wiedergabetechnik. Nur muss das Gesamtsystem dynamisch auf Bewegungen des Zuhörers reagieren, woraus sich die erste Voraussetzung ableitet, dass nämlich die Position und Orientierung der Ohren (des Kopfes) gemessen werden und in der räumlichen Simulation adaptiv berücksichtigt werden muss. Dieses Prinzip wird „Tracking“ genannt. Die Auffrischrate dieser Messung und der Umsetzung in der Simulation liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie die Bildwiederholrate beim Fernsehen oder beim Kino-Bild, also etwa bei 50 Millisekunden. Obwohl zahlreiche Techniken in der Akustik und der Computergrafik zur Verfügung stehen, ist dies eine sehr große Herausforderung. Dennoch sind derartige Systeme weit entwickelt und nun für zahlreiche Anwendungen verfügbar.

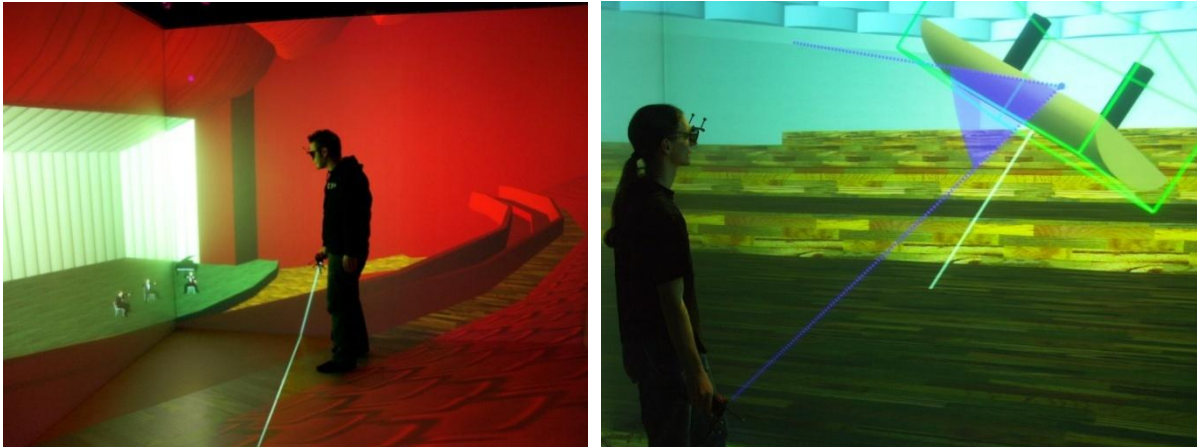


Abbildung 4: Links: Virtuelle Raumakustik in einer "CAVE" (Cave Automatic Virtual Environment). In einer CAVE werden virtuelle Umgebungen visuell und akustisch projiziert. Rechts: Einbringen und Manipulation eines Reflektors in einem Konzertsaal. Die Simulation des visuellen und der akustischen Szene erfolgen in „Echtzeit“.

6. Anwendungen für die Architektur

Das Hineinhören (und –sehen) in virtuelle Welten findet mehr und mehr Eingang in Entwurfsprozesse. Beispiele aus dem Maschinenbau (Virtual Prototyping), der Medizin und aus Trainingsprozessen (Fahr- und Flugsimulatoren) gehören inzwischen zum Standardrepertoire.

Auch in der Architektur kommen leistungsfähige Computerwerkzeuge immer mehr in den Vordergrund. Was die akustische Komponente betrifft, sollte jeder Raum und jedes Gebäude auch unter Gesichtspunkten einer „guten Akustik“ entworfen werden. Von daher liefert die Auralisation weit reichende Möglichkeiten, wenn man sich vorstellt, während der Planung den Entwurf nicht nur sehen, sondern auch in ihm bereits hören zu können. Eine derart multimodale Entwurfsmethodik könnte jedenfalls eine weitere Inspiration liefern, um eine optimale Lösung zu erlangen.

Bei Räumen mit offensichtlicher akustischer Relevanz ist dies unmittelbar verständlich: Säle für Sprache und Musik, Kirchen, Unterrichtsräume, Büros (Vertraulichkeit), Büros (Lärm am Arbeitsplatz), Arbeitsräume und Fabrikhallen, Bahnhöfe und Flughäfen.

Auch bei Gebäuden im Allgemeinen und im Städtebau ist es problematisch, wenn akustische Aspekte zu spät betrachtet werden. Kostenintensive Änderungen können vermieden, insgesamt bessere Lösungen erzielt werden. Eine Auralisation von Varianten eines Entwurfs im frühen Stadium kann somit sehr nützlich sein. Dies betrifft den baulichen Schallschutz in schutzbedürftigen Räumen, die durch die Normen des Schallschutzes im Hochbau erfasst sind, wie auch ebenso wie die Raumakustik von Treppenhäusern, Korridoren und Foyers.

Ganz abgesehen vom Einsatz der Auralisation im Entwurf besteht die Möglichkeit, die schalltechnische Leistungsfähigkeit von Materialien, Bauprodukten und Konstruktionen zu demonstrieren. In Zeiten der Internetpräsenz von Unternehmen und Planungsbüros liegt auf der Hand, Produktinformationen nicht nur rein visuell zu vermitteln, wie es in Katalogform üblich ist, sondern anhand von auralisierten Beispielen.