

# Simulation und Auralisierung kleiner Räume

Sebastian Goossens

Institut für Rundfunktechnik, 80939 München, E-Mail: goossens@irt.de

## Einleitung

Es ist das Ziel der raumakustischen Simulation, vor dem Bau oder Umbau eines Raumes das Schallfeld in diesem Raum zu bestimmen. Dabei sollen störende akustische Effekte bereits bei der Planung erkannt und durch Änderungen in der akustischen Gestaltung minimiert werden. Die Auralisierung (Hörbarmachung) soll realitätsnah die akustische Situation im Raum wiedergeben und zur subjektiven Bewertung der Planung dienen.

### Simulation mit verkleinerten Modellen

Bereits in den Vierziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts hat z.B. Spandöck die Methodik der Modellakustik beschrieben. Mit Hilfe eines Tonbandgerätes wurden die Signale in den Modellmaßstab von beispielsweise 1:10 transformiert, indem das Tonband bei Aufnahme und Wiedergabe im Modell zehnmal so schnell lief wie bei normalen Betrieb. Das führt zu einer Verschiebung im Frequenzbereich: Der in der Realität interessante Bereich von 50 Hz bis 8 kHz muss im 1:10-Modell im Frequenzbereich von 500 Hz bis 80 kHz untersucht werden. Obwohl der Aufwand für den Modellbau sehr hoch ist, wird dieses Verfahren insbesondere für große Konzertsäle bis heute angewandt. Auch im Vortragsprogramm der DAGA 2010 wird von raumakustischen Modelluntersuchungen berichtet. Das deutet darauf hin, dass die aktuell verfügbaren Simulationsprogramme bis heute manche raumakustischen Effekte nicht zuverlässig im Computer abbilden.

### Kleine Räume mit niedriger Nachhallzeit

In diesem Beitrag soll es aber speziell um die Simulation und Auralisierung kleiner Räume gehen. Die Akustiker im Institut für Rundfunktechnik befassen sich vor allem mit der Akustik von Rundfunkproduktionsräumen. Darunter fallen sowohl Aufnahme Räume (häufig für Sprache) als auch Regieräume, die der Tonbeurteilung dienen. Typischerweise weisen diese Räume eine Fläche von etwa 30 m<sup>2</sup> und ein Volumen von ca. 100 m<sup>3</sup> auf. Raumakustisch zeichnen sie sich durch eine niedrige Nachhallzeit (0,2 – 0,35 s) aus. In diesen kleinen Räumen bildet sich nur in vergleichsweise geringem Ausmaß ein diffuses Schallfeld aus.

### Simulation als Planungswerkzeug

Im Jahr 1997 wollten die IRT-Akustiker für die Planung in der Rundfunk- bzw. Studioakustik künftig die Computersimulation und Auralisierung einsetzen und suchten auf dem Markt nach einem geeigneten Softwareangebot. Erforderlich war ein Programm, das eine möglichst wirklichkeitstreu Simulation und Auralisierung bietet. Eine lediglich "plausible" Simulation reicht als Planungswerkzeug nicht aus. Bei den Tests wurden die Auralisationen der verschiedenen Programme subjektiv mit

einer Kunstkopfaufnahme des entsprechenden Raumes verglichen. Zudem wurden die errechneten Übertragungsfunktionen und Nachhallzeiten mit Messungen im realen Raum verglichen. Das Ergebnis war enttäuschend: Die Auralisationen der verfügbaren Simulationsprogramme hielten im Fall der kleinen Räume dem Vergleich mit dem wirklichen Höreindruck bzw. der Kunstkopfaufnahme nicht stand.

Auf der Suche nach den Ursachen für das unbefriedigende Abschneiden der am Markt verfügbaren Software führten folgende Überlegungen weiter: Niedrige Nachhallzeit und kaum diffuses Schallfeld in den untersuchten kleinen Räumen bedeuten, dass der Direktschall und die ersten Reflexionen das Hören prägen. Bei deren Überlagerung sind die Phasenbeziehungen wichtig. Die verfügbaren Simulationsprogramme berücksichtigten aber die Phasenbeziehungen nicht korrekt. Zudem wurde stets der diffuse und nicht der winkelabhängige Reflexionsfaktor verwendet auch wenn das zu berechnende Schallfeld gar nicht diffus war [5]. Interessant wäre ein Simulationsprogramm, das diese Erkenntnisse berücksichtigt. So kam es zu dem, was ursprünglich gar nicht geplant war: Im IRT wurde ein eigenes Simulationsprogramm mit dem Namen AUVIS (Auralisation virtueller Studios) entwickelt.

## Bausteine der Computersimulation

Bei jeder raumakustischen Computersimulation müssen die Eigenschaften des nachzubildenden realen Raumes in das Berechnungsmodell übertragen werden. Die Form und die Abmessungen des Raumes, die Schall reflektierenden Eigenschaften seiner Oberflächen sowie die Richtcharakteristiken der Quellen und des Empfängers müssen für die Simulation zur Verfügung stehen. Darüber hinaus wird ein geeignetes Berechnungsverfahren zur Nachbildung der Schallausbreitung und Schallreflexion benötigt. Im Folgenden werden diese Bausteine der Computersimulation im Einzelnen erläutert.

### Die Modellierung des Raumes

Alle Raumboberflächen werden als ebene Flächen mit ihren Abmessungen eingegeben. Gekrümmte Strukturen werden durch ebene Teilsegmente angenähert.

### Die Modellierung der Oberflächeneigenschaften

Allen Oberflächensegmenten werden frequenzabhängig Reflexionseigenschaften zugeordnet, um in der Simulation festzulegen, wie der auftreffende Schall vom jeweiligen Oberflächensegment reflektiert wird. Dazu wird entweder der Diffusfeld-Reflexionsfaktor  $r_{\text{diff}}$  angegeben oder der komplexe winkelabhängige Reflexionsfaktor  $r(\Theta)$

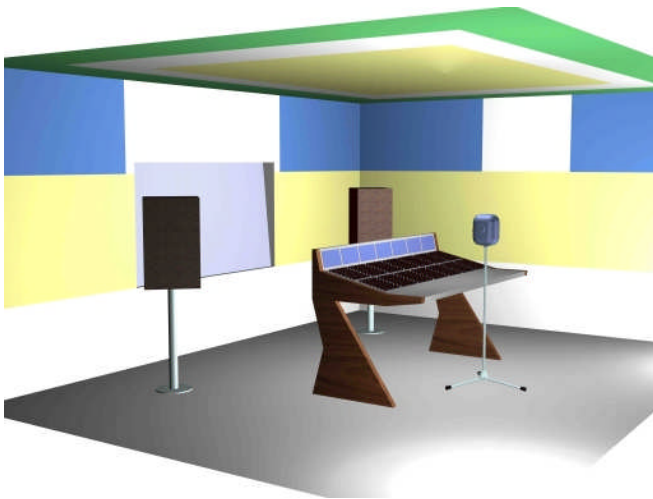


Abbildung 1: Modellierung eines Regieraumes mit unterschiedlicher Absorberbelegung

Der Diffusfeld-Reflexionsfaktor  $r_{diff}$

In gängiger Simulationssoftware wird Diffusfeld-Reflexionsfaktor  $r_{diff}$  verwendet.

Er wird nach Gleichung 1 aus dem Diffusfeld-Absorptionsgrad  $\alpha_{diff}$  abgeleitet, der meist im Hallraum gemessen wird, und liegt in Terzen oder Oktaven als Tabellenwert vor.

$$r_{diff} = \sqrt{1 - \alpha_{diff}} \quad (1)$$

Er hat den Vorteil, dass die üblichen Diffusfeld-Absorptionsgrade verwendet werden und die Simulation schnell berechnet werden kann. Der Nachteil besteht darin, dass die Winkelabhängigkeit der Schallreflexion nicht berücksichtigt wird und keine Phaseninformation in die Berechnung eingeht. Vor allem aber enthält der Diffusfeld-Reflexionsfaktor  $r_{diff}$  Eigenschaften des äußeren Raumschallfeldes und ist damit für nicht diffuse Schallfelder von eingeschränkter Gültigkeit. Richtiger ist daher der vom Schalleinfallswinkel abhängige Reflexionsfaktor  $r(\Theta)$ , der keine Eigenschaften des äußeren Raumschallfeldes enthält.

Der komplexe, winkelabhängige Reflexionsfaktor  $r(\Theta)$

Er ist gemäß Gleichung 2 abhängig von der: Kennimpedanz der ebenen Welle in Luft  $Z_0$ , der Wandimpedanz  $Z_1$  und vom Schalleinfallswinkel  $\Theta$ .

$$r(\Theta) = \frac{Z_1(\Theta) - Z_0 / \cos \Theta}{Z_1(\Theta) + Z_0 / \cos \Theta} \quad (2)$$

- $Z_0$ : Kennimpedanz der ebenen Welle (410 Pa s/m)
- $Z_1$ : Wandimpedanz
- $\Theta$ : Schalleinfallswinkel

Dabei kann die Wandimpedanz lokal reagieren, wie in Abb. 2 links dargestellt, oder lateral reagieren (Abb. 2 rechts) und damit selbst vom Einfallswinkel abhängig sein.

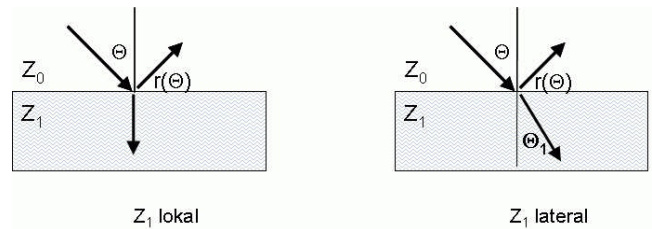


Abbildung 2: Winkelabhängige Schallreflexion bei lokal und bei lateral reagierender Wandimpedanz  $Z_1$ .

Die Bestimmung des komplexen, winkelabhängigen Reflexionsfaktors  $r(\Theta)$  nach Gleichung (2) setzt die Kenntnis der komplexen Wandimpedanz  $Z_1$  voraus. Prinzipiell kann sie messtechnisch erfasst werden. Der Aufwand ist angesichts der Winkelabhängigkeit jedoch beträchtlich. Als Alternative bietet sich die Theorie der Schallabsorber an [1]. Vorteilhaft ist dabei, dass eine Vielzahl von Absorbentypen und deren Varianten berechenbar sind. Zudem erlaubt die Theorie auch die Dimensionierung von Schallabsorbern. Dies gilt insbesondere für poröse Absorbentypen (z.B. Mineralfaser, Vorhänge) in Kombination mit beispielsweise Folien oder Lochblechen. Die in die Berechnung eingehenden Parameter beschränken sich in der Regel auf Strömungswiderstände, Massen und Abmessungen. Allerdings wird durch diese Berechnung die Simulation etwas langsamer.

#### Absorber-Schichtenmodell

Die Abbildung 2 zeigt schematisch wie zur Berechnung der Wandimpedanz  $Z_1$  der Absorber mit dem Absorber-Schichtenmodell (nach Mechel) [1] [2] beschrieben werden kann. In der Modellierung kann der Wandabsorber aus mehreren Schichten zusammengesetzt werden. Jede dieser Schichten besteht aus einem porösen Material (gekennzeichnet durch den Strömungswiderstand, das Flächengewicht und die Schichtdicke) und einem Belag (beispielsweise gekennzeichnet durch das Flächengewicht einer Folie oder durch Lochdurchmesser, Lochabstand und Flächengewicht eines Lochbleches).

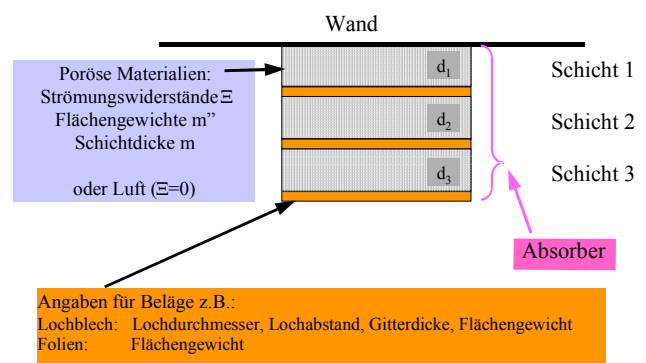


Abbildung 3: Schematische Modellierung eines Wandabsorbers mit dem Absorber-Schichtenmodell (nach Mechel) zur Bestimmung der Wandimpedanz und des winkelabhängigen Reflexionsfaktors.

Die Wandimpedanz jeder einzelnen Absorbenterschicht kann als Wellenleiter berechnet werden. Abb. 4 zeigt hierzu die

Abhängigkeiten und Entsprechungen zur Beschreibung der Absorberschicht als Wellenleiter in Form von Serienimpedanz und Abschlussimpedanz. Die Berechnung einer einzelnen Schicht erfolgt dann nach Gleichung 3.

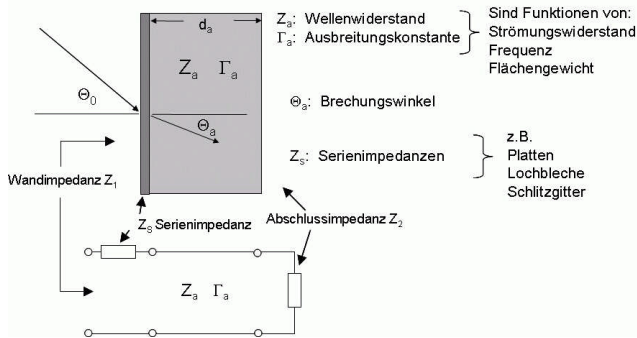


Abbildung 4: Beschreibung poröser Schallabsorber als Wellenleiter zur Berechnung der Wandimpedanz einer einzelnen Schicht nach Gleichung 3.

$$Z_1 = Z_s + Z_2 \frac{1 + \frac{Z_a}{Z_2 \cos \Theta_a} \tanh(\Gamma_a d \cos \Theta_a)}{1 + \frac{Z_a}{Z_2 \cos \Theta_a} \tanh(\Gamma_a d \cos \Theta_a)} \quad (3)$$

Ein mehrschichtiger Absorber wie in Abb. 2 kann als mehrschichtiges Wellenleitermodell beschrieben werden. Dabei bildet die Impedanz der darunter liegenden Schicht die Abschlussimpedanz der jeweils darüber liegenden Schicht.

#### Vergleichende Simulation mit $r(\Theta)$ und $r_{diff}$

Vergleichende Simulationen zum Einfluss des winkelabhängigen Reflexionsfaktors haben ergeben, dass der Diffusfeld-Reflexionsfaktor zwar in vielen Fällen brauchbare Ergebnisse liefert. Bei Anwesenheit größerer Flächen stark winkelabhängiger Wandimpedanzen kann es jedoch zu deutlich wahrnehmbaren akustischen Effekten kommen, deren realitätsnahe Abbildung die Berücksichtigung von  $r(\Theta)$  erfordert.

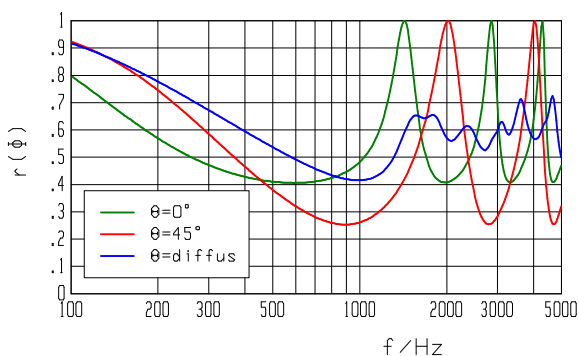


Abbildung 5: Reflexionsfaktor  $r(\Theta)$  und  $r_{diff}$  eines Lochbleches mit absorbierendem Vlies im Abstand von 12 cm vor einer harten Wand.

Abb. 5 zeigt den Reflexionsfaktor eines Lochbleches mit absorbierendem Vlies im Abstand  $d$  von 12 cm vor einer harten Wand. Deutlich zu sehen ist die starke Abhängigkeit

von  $\Theta$  und  $f$  bei schrägem Schalleinfall. Die ausgeprägten Spitzen erreichen für  $d = n\lambda/2$  den Wert  $r=1$ . Dies ist typisch für dünne poröse Schichten mit Luftpolster. Der Verlauf von  $r_{diff}$  dagegen ist wesentlich ruhiger und weniger zerklüftet.

Die Simulationsergebnisse sind in Abb. 6 an Hand der aus terzgefilterten Impulsantworten gewonnenen Nachhallzeit dargestellt. Die Berücksichtigung von  $r(\Theta)$  in der Simulation bestätigt den gemessenen Verlauf der Nachhallzeit. Das Gleiche gilt für die entsprechende Auralisation, die einen ähnlichen Höreindruck wie im realen Raum zeigt. Eine Simulation mit  $r_{diff}$  dagegen kann die akustischen Effekte in diesem Raum nicht nachbilden.

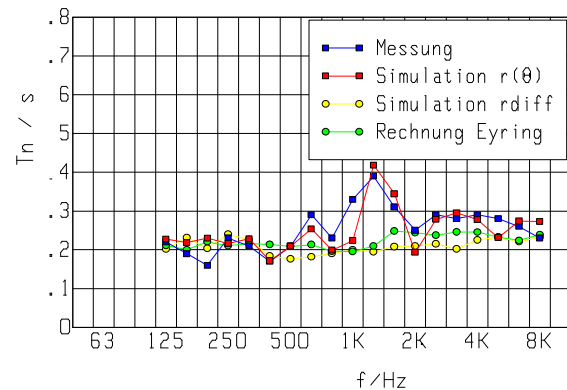


Abbildung 6: Nachhallzeiten der Simulation mit  $r(\Theta)$  und  $r_{diff}$  im Vergleich zu gemessenen Nachhallzeit und zur Rechnung nach Eyring. Die Simulation mit  $r(\Theta)$  bestätigt den Verlauf der gemessenen Nachhallzeit. Die Simulation mit  $r_{diff}$  kann die störenden akustischen Effekte nicht nachbilden

#### Simulation mit Absorbermodell erfordert Erfahrung

Die Verwendung des komplexen, winkelabhängigen Reflexionsfaktors  $r(\Theta)$  und seine Berechnung mit Hilfe des oben beschriebenen Absorbermodells bietet gerade bei der Simulation kleiner Räume Vorteile. Allerdings braucht man dafür Erfahrung in raumakustischer Planung und auch die Absorberberechnung setzt eine gewisse Einarbeitungsphase und die Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge voraus. Ganz entscheidend bei der Modellierung der Oberflächeneigenschaften ist aber der Blick für das Wesentliche. Wer, etwas übertrieben gesagt, jede Steckdose in der Wand als Helmholtz-Resonator beschreibt, wird nicht mit einem vernünftigen und letztlich auch wirtschaftlichen Zeitaufwand ans Ziel kommen.

#### Die Modellierung der Quellen

Für kleine Räume die Modellierung der Quellen in der Regel einfacher als für Konzertsäle. Dort muss unter Umständen jedes Instrument eines Orchesters als einzelne Quelle modelliert werden. In Regieräumen ist die Quellenanzahl recht übersichtlich (z.B. 5.1-Lautsprecher-Anordnung) und die Position der Lautsprecher im Raum bleibt konstant. Die Richtcharakteristik eines Lautsprechers ist für jedes Signal konstant und kann gemessen werden. Auch die Richtcharakteristik einer sprechenden Person kann durch Lautsprecher angenähert werden. Die Messung der

Richtcharakteristik erfolgt im reflexionsarmen Messraum meist mit einem automatisierten Messverfahren: In einer Auflösung von z.B. 5 Grad im Raumwinkel werden die Übertragungsfunktionen (Amplitude und Phase) z.B. an 2048 Frequenzstützstellen in feiner Frequenzauflösung gemessen. Für jeden Lautsprecher entsteht so ein umfangreicher Datensatz, der dann in der Simulation verwendet wird. Gegenüber der Richtcharakteristik in Form von Oktav- oder Terzpegeln bildet die Beschreibung durch komplexe Übertragungsfunktionen die reale Schallabstrahlung besser nach.

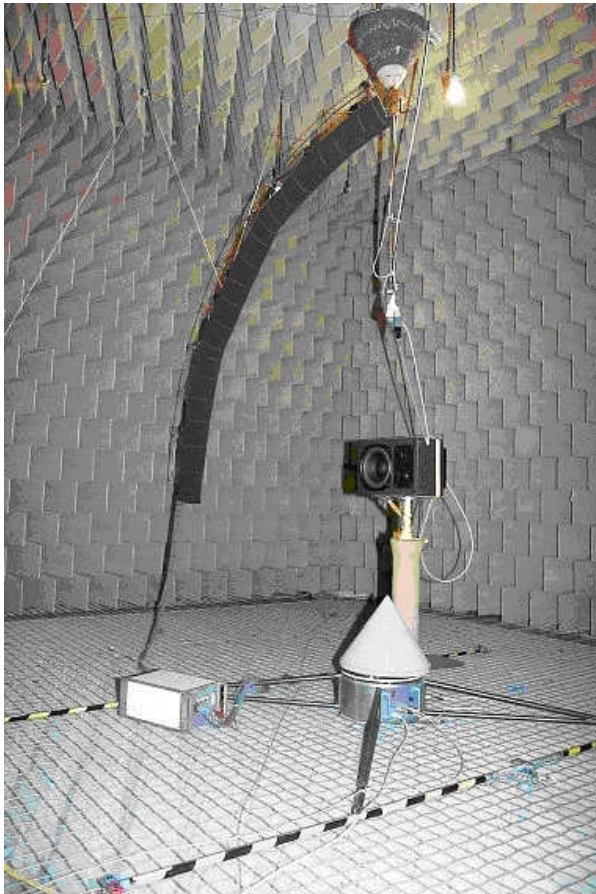


Abbildung 7: Messung der richtungsabhängigen Übertragungsfunktionen (Amplitude und Phase) eines Lautsprechers im reflexionsarmen Messraum in feiner Frequenz- und Winkelauflösung

### Die Modellierung des Empfängers

In einem realen Raum liefert ein Kunstkopf als Zwei-Kanal-Aufnahmemikrofon ein binaurales Signal für die Kopfhörerwiedergabe. Um mit der raumakustischen Computersimulation einen Raum zu auralisieren, wird meist die Wiedergabe über Kopfhörer gewählt. Zur Erzeugung der Kopfhörersignale ist ein binaurales Modell erforderlich, das oft aus dem Datensatz der richtungsabhängigen Übertragungsfunktionen (Amplitude und Phase) eines Kunstkopfes besteht, der im reflexionsarmen Messraum in feiner Frequenz- und Winkelauflösung ermittelt wurde.

### Einige Rechenverfahren

Die Liste der hier aufgeführten Rechenverfahren kann in diesem Rahmen nicht vollständig sein. Eine gute und umfangreiche Übersicht ist im Buch Auralization von M.Vorländer [8] zu finden.

Die Verfahren der geometrischen Akustik (z.B. Spiegelschallquellen SSQ oder Ray tracing) beschreiben die Ausbreitung einer ebenen Schallwelle in Form von Schallstrahlen. Dagegen berücksichtigen die Wellentheoretische Ansätze (z.B. FEM, BEM) das modale Schallfeld und die Eigenschaften von Kugelwellen.

### Geometrische Akustik

#### Spiegelschallquellen SSQ (mirror-image-method)

Zur Erläuterung dieses Verfahrens zeigt Abb. 8 schematisch den Grundriss eines Raumes mit der Quelle S und dem Empfänger E. Der Schall erreicht den Empfänger nicht nur auf direktem Wege, sondern die nach allen Seiten gemäß ihrer Richtcharakteristik abstrahlende Schallquelle regt auch die benachbarten Wände an. Entsprechend des Prinzips Schalleinfallswinkel ist gleich Schallausfallswinkel erreichen die Schallstrahlen den Empfänger auch über einfache Reflexion an einer Wand oder als Reflexion zweiter Ordnung über zwei Wandreflexionen. Die am Empfänger eintreffenden Schallstrahlen können auch als Strahlen der gedachten Quellen S' oder S'' beschrieben werden, die an der reflektierenden Wand gespiegelt wurden. Daher der Name Spiegelschallquellen. Der Reflektionsfaktor der reflektierenden Wandoberfläche gibt an, welcher Schallanteil an der Wand reflektiert und welcher absorbiert wird.

Werden nun alle Schallanteile am Empfänger korrekt zusammengefasst, so erhält man daraus die Rumübertragungsfunktion zwischen Quelle und Empfänger.

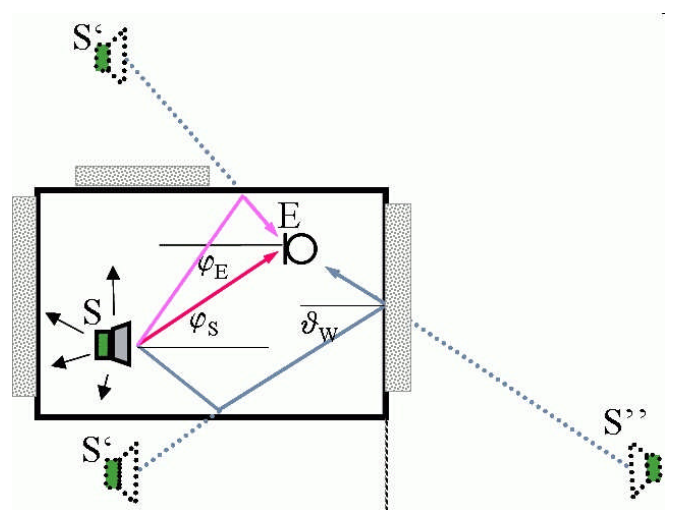


Abbildung 8: Beschreibung des reflektierten Schalls durch die Abstrahlung von gedachten Spiegelschallquellen (SSQ-Verfahren)



### Ray tracing (Strahlenverfolgung)

Beim Ray-tracing-Verfahren sendet die Quelle viele Schallstrahlen in die verschiedensten Richtungen aus. Die Intensität der Abstrahlung entspricht jeweils der Richtcharakteristik der Quelle. Die Strahlen werden verfolgt und es wird ihr Energieverlust durch Absorption und Wellenausbreitung errechnet. Am Empfangsort werden die Strahlen in „Zählkugeln“ gesammelt. Die Zusammenfassung erfolgt entweder durch Intensitätsaddition oder Überlagerung mit Phaseninformation. Die Verfolgung eines Strahls, der z.B. auch nach vorgegebener n-ter Ordnung den Empfangsort nicht erreicht, wird abgebrochen.

### Hybrides Modell: Zusammengesetzte Impulsantwort

Die präzise Berechnung mit dem Spiegelquellenverfahren wird bei Reflexionen höherer Ordnung äußerst rechenintensiv. Zur Berechnung des späteren Nachhalls wird die Impulsantwort im hybriden Modell mit dem weniger aufwendigen „ray tracing Verfahren“ berechnet. Als Ergebnis werden die ersten Reflexionen aus dem Spiegelquellenmodell und der spätere Nachhall aus dem „ray-tracing Verfahren“ zu einer Impulsantwort zusammengesetzt (Abb. 9).

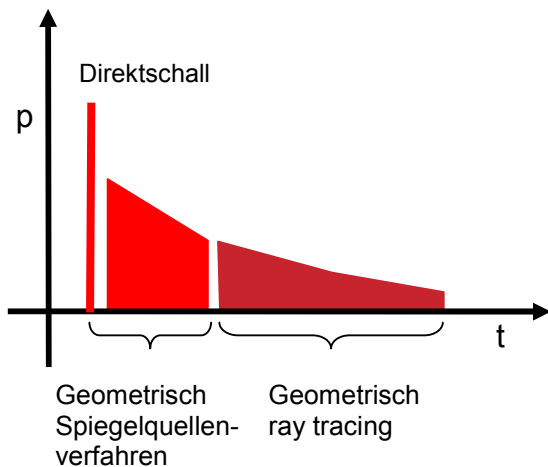


Abbildung 9: Zusammengesetzte Impulsantwort im hybriden geometrischen Modell

Andere hybride Modelle verwenden auch statistische Methoden (Reverberant Tail), um den späteren Nachhall zu ergänzen.

### Die Grenze der geometrischen Akustik

Die Beschreibung der Schallausbreitung und Schallreflexion mit Hilfe der geometrischen Akustik (Spiegelquellenmodell und Schallstrahlen mit lokaler Reflexion siehe Abb. 8) ist nur gültig unter der Voraussetzung, dass die Raumabmessungen „groß“ im Vergleich zur Wellenlänge sind. Bei Räumen mit einem Volumen von ca. 100 m<sup>3</sup> (typische Abmessungen 4.5 m) liegt nach unserer Erfahrung die Grenze bei ca. 250 Hz (Wellenlänge 1.4 m). Unterhalb dieser Grenzfrequenz müssen das modale Schallfeld und die Eigenschaften von Kugelwellen berücksichtigt werden.

Abb. 10 zeigt die mit dem SSQ-Verfahren simulierten Terz-Übertragungsmaße im Vergleich zu den Messungen im realen Raum. Im Frequenzbereich unter 250 Hz weisen die Simulationen keine hinreichende Übereinstimmung mit den Messungen auf.

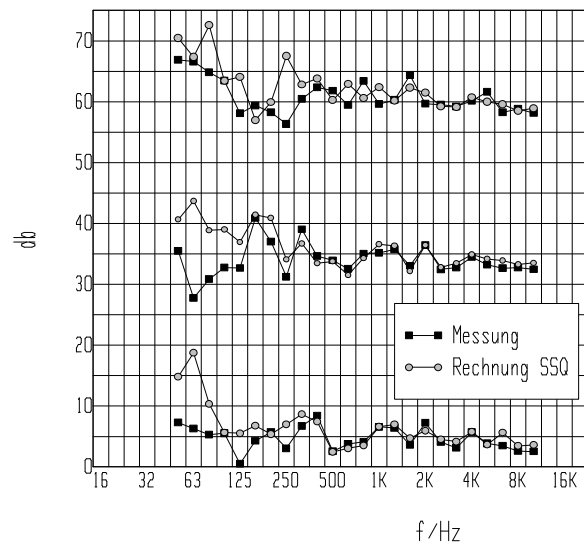


Abbildung 10: zeigt Terz-Übertragungsmaße mehrerer Lautsprecher-Mikrofon-Situationen in einer Tonregie mit ca. 160 m<sup>3</sup> Volumen und einer Nachhallzeit von 0.2 s. Grundlage der Berechnung war das Spiegelschallquellenverfahren (SSQ - 6. Ordnung) unter Berücksichtigung des komplexen winkelabhängigen Reflexionsfaktors [4]. Die ebenfalls komplexe und winkelabhängige Lautsprecher-Übertragungsfunktion wurde im reflexionsarmen Raum gemessen.

### Wellentheoretische Ansätze

Die Wellentheoretische Ansätze wie FEM, BEM oder Kugelwellen sind sicherlich dazu geeignet, unterhalb der Grenze der geometrischen Akustik zu guten Simulationsergebnissen zu kommen. Der damit verbundene Aufwand ist allerdings beträchtlich.

### Finite Element method (FEM)

2009 konnte Aretz [7] von FEM-Simulationen eines Regieraumes berichten. Unterhalb von ca. 200 Hz erreichten die simulierten Übertragungsmaße eine sehr gute Übereinstimmung mit den im realen Raum gemessenen Übertragungsmaßen. Für diese Genauigkeit musste allerdings auch in der FEM die komplexe winkelabhängige Wandimpedanz der verschiedenen Oberflächen ermittelt und verwendet werden.

### „Laterale“ Reflexion als Näherungsverfahren

Es wird sicher noch einige Zeit vergehen, bis die numerischen Ansätze der FEM praxisgerecht für die Raumakustische Computersimulation zur Verfügung stehen. Um unter der Grenze der geometrischen Akustik bei kleinen Räumen trotzdem zu brauchbaren Ergebnissen zu kommen, wurde am IRT die Methode der lateralen Reflexion entwickelt [4]. Diese ist im Ergebnis nicht mit einer guten

FEM zu vergleichen, aber sie kann näherungsweise die ersten Reflexionen bei tiefen Frequenzen erfassen.

Dabei wird zur Berechnung der Reflexion erster Ordnung die reflektierende Wand in Elemente unterteilt (vgl. Abb. 11), die als Kugelquellen betrachtet werden (in Anlehnung an die Rayleigh-Methode). Für diese Flächenelemente werden die winkelabhängigen Reflexionsfaktoren einbezogen. Das Verfahren berücksichtigt die Begrenzung der Wandfläche und die unterschiedliche Verteilung der Wandabsorption. Es kann als Näherung für die Reflexion von Kugelwellen betrachtet werden

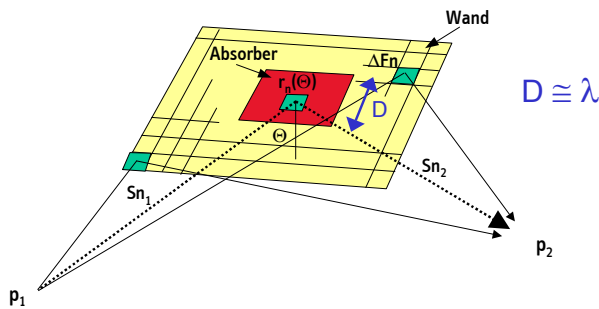


Abbildung 11: Der Ansatz der lateralen Reflexion als Näherung für die Reflexion von Wänden bei tiefen Frequenzen

Abb. 12 zeigt im Vergleich zu Abb. 10 welche Verbesserung in der Übereinstimmung zwischen Simulation und realer Messung auch bei tiefen Frequenzen erreicht wird, wenn das SSQ-Verfahren zu tiefen Frequenzen um die Laterale Reflexion erweitert wird.

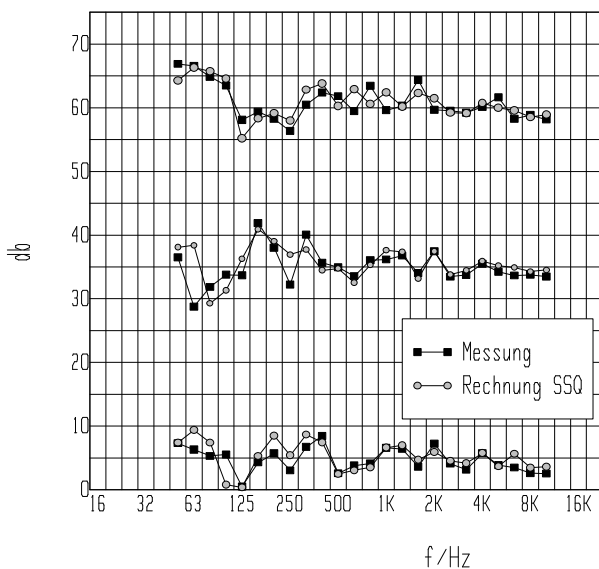


Abbildung 12: zeigt dieselben gemessenen Terz-Übertragungsmaße wie in Abb. 10 Für die Rechnung (Simulation) wurde das SSQ-Verfahren zu tiefen Frequenzen um die Laterale Reflexion erweitert Das verbessert die Übereinstimmung von Messung und Simulation bei tiefen Frequenzen erheblich.

## Kopfhörerwiedergabe mit Head tracking - das BRS System

Das Wiedergabesystem ermöglicht das Abhören in einem virtuellen Raum. Die Änderungen der Ohrsignale bei Drehbewegungen des Kopfes werden interaktiv berücksichtigt. Der Vorteil dieser Kopfhörerdarbietung ist, dass die Schallquellen - wie beim natürlichen Hören auch - bei Drehbewegung des Kopfes an ihrer Position bleiben.

Beispielsweise kann dem Hörer eine 3/2 Lautsprecheraufstellung in einem Regieraum präsentiert werden. In der technischen Umsetzung übermittelt ein am Kopfhörer angebrachter Orientierungssensor (head-tracker) fortlaufend die aktuelle Winkelstellung des Kopfes an den Faltungs-PC. Aus einem vorher geladenen Datensatz werden die zur aktuellen Kopfstellung passenden Impulsantworten ausgewählt und zur Faltung verwendet. (BRS Binaural Room Synthesis)

## Zusammenfassung

In kleinen Räumen (ca. 100 m<sup>3</sup>) mit niedriger Nachhallzeit prägen Direktschall und erste Reflexionen das Hören. Gerade für diese Räume liefert der komplexe winkelabhängige Reflexionsfaktor  $r(\theta)$  bessere Simulationsergebnisse als der Diffusfeld-Reflexionsfaktor  $r_{diff}$ . Um diesen zu ermitteln, hat sich die Modellierung der Schallabsorber durch ein Wellenleitermodell nach Mechel bewährt.

Die Grenze der geometrischen Akustik (SSQ und ray-tracing) liegt bei kleinen Räumen (ca. 100 m<sup>3</sup>) bei ca. 250 Hz. Unterhalb dieser Grenzfrequenz müssen das modale Schallfeld und die Eigenschaften von Kugelwellen berücksichtigt werden. Im vollen Umfang gelingt dies nur mit wellentheoretischen Ansätzen. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist geeignet Allerdings ist sie mit einem erheblichen Aufwand verbunden und erfordert die Eingabe der komplexen Wandimpedanz. Die laterale Reflexion bietet als praxiserichte Näherung eine Erweiterung der Spiegelschallquellen (SSQ) zu tiefen Frequenzen.

Die Wiedergabe der Auralisation erfolgt meist binaural über Kopfhörer. Die Wiedergabe mit head-tracking (BRS) ermöglicht ein natürliches Hörerlebnis, da die Schallquellen auch bei Drehbewegung des Kopfes an ihrer Position bleiben.

## Ausblick

Die Qualität der Auralisierung könnte möglicherweise durch Verbesserungen des binauralen Modells und der Kopfhörerwiedergabe weiter gesteigert werden.

Zudem sollte geprüft werden, ob einheitliche Parameter-Datensätze zur Modellbeschreibung gängiger Absorber möglich sind. Das würde die Berechnung der winkelabhängigen komplexen Reflektionsfaktoren für viele Anwender erleichtern.

Für den Frequenzbereich unter ca. 250 Hz sollte die Berechnung mit der FEM weiterverfolgt werden.

Wünschenswert sind programmtechnische Lösungen, mit denen die FEM komfortabel für die Praxis nutzbar wird.

#### Danksagung

Meinem Kollegen Roman Stumpner danke ich für die engagierte, systematische und zielstrebige Arbeit der letzten Jahre bei der Entwicklung und Anwendung des IRT-Programms AUVIS zur raumakustischen Simulation und Auralisierung.

#### Literatur

- [1] Mechel, Schallabsorber Band 1-3, Hirzel Verlag
- [1] Goossens, S.: „Vorteile der raumakustischen Simulation bei der Gestaltung von Aufnahme-, Regie-, und Bearbeitungsräumen“ 24. Tonmeistertagung, 2006, Bericht
- [2] Stumpner, R.; Goossens, S.: “About the influence of the reflection coefficient on simulation in room acoustics” Fortschritte der Akustik – CFA/DAGA’04 <30, 2004, Straßburg>. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Oldenburg 2004
- [3] Goossens, S.; Stumpner, R.: “Auralization of room acoustics - A tool for planning broadcast production rooms?” Fortschritte der Akustik – CFA/DAGA’04 <30, 2004, Straßburg>. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Oldenburg 2004
- [4] Stumpner, R.: „Berechnung des tieffrequenten Schallfeldes in Rundfunkproduktions-räumen“ Fortschritte der Akustik – DAGA’05 <31, 2005, München>. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2005
- [5] Lamparter, H.; Stumpner, R.: Über Versuche zur Auralisation virtueller Studioräume. In: Fortschritte der Akustik – DAGA’01 <27, 2001, Hamburg>. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Oldenburg 2001
- [6] Goossens, S.; Stumpner, R.; Lamparter, H.: Hochwertige Auralisation der Schallfelder in Produktionsräumen. In: Fernseh- und Kino-Technik FKT 7/2003. Heidelberg: Verlag Hüthig GmbH + Co. KG, 2003, S. 321 – 325
- [7] Aretz, M.: Specification of Realistic Boundary Conditions for the FE Simulation of Low frequency sound Fields in Recording Studios. Acta Acustica united with Acustica Vol. 95 (2009), 874-882
- [8.] Vorländer, M.: Auralization, Springer-Verlag, Berlin, 2007
- [9] Hörbeispiele im Internet: Demonstration raumakustischer Effekte in Bild und Ton, URL: <http://www.irt.de/de/themengebiete/akustik/raumakustische-effekte.html>