

BBSR-
Online-Publikation
23/2023

AcouScale

Entwicklung und Erprobung eines raumakustischen Modellmesssystems

von

Dr. Detlef Hennings

Prof. Dr. Karsten Voss



AcouScale

Entwicklung und Erprobung eines raumakustischen Modellmesssystems

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.45

Projektlaufzeit: 01.2021 bis 12.2022

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Steffen Kisseler, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
s.kisseler@brueggemann.kisseler.de

Autoren

F+E Büro Dr. Hennings, Köln
Dr. Detlef Hennings
detlef.hennings@eclim.de

Bergische Universität Wuppertal
Fakultät für Architektur & Bauingenieurwesen
Prof. Dr.-Ing. Karsten Voss (Projektleitung)
kvoss@uni-wuppertal.de

Redaktion

F+E Büro Dr. Hennings, Köln

Stand

Dezember 2022

Gestaltung

F+E Büro Dr. Hennings, Köln

Bildnachweis

Titelbild: D. Hennings
Audix: S. 13; D. Hennings: S. 7, 13, 15, 46; IBUS: S. 56; Microtech Gefell: S. 13; MicW: S. 13; Peutz Consult: S. 7; H.-M. Schmid: S. 45

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Hennings, Detlef; Voss, Karsten, 2023: AcouScale: Entwicklung und Erprobung eines raumakustischen Modellmesssystems. BBSR-Online-Publikation 23/2023, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Abstract	6
1. Einführung	7
2. Ergebnisse des Vorhabens	8
2.1. Grundlegendes	8
2.1.1. Skalierung als Planungs-Methode	8
2.1.2. Maßstab und Modell-Größe	8
2.1.3. Maßstabs-Transformation	9
2.1.4. Die Komponenten von 'AcouScale'	10
2.2. Die Meßapparatur	12
2.2.1. Mikrofone	12
2.2.2. Schallquellen	14
2.2.3. Die Meß-Elektronik	19
2.2.4. Temperatur- und Feuchte-Messung	21
2.2.5. Messungen an Schallabsorbern	23
2.3. Die AcouScale-Software	25
2.3.1. Aufbau und Funktionen der AcouScale-Software	25
2.3.2. Algorithmen für Modell-Messungen	26
2.3.3. Installation und Benutzung der AcouScale Software	31
2.3.4. Alternative Meßsoftware	34
2.4. Modell-Räume	35
2.4.1. Raumgröße und Maßstab	35
2.4.2. Modellraum-Konstruktion	37
2.4.3. Reflexion, Streuung und Absorption	39
2.4.4. Schallabsorber	40
2.4.5. Möblierung und Personen	45
2.5. Der Ablauf von Modell-Messungen	47
2.5.1. Voraussetzungen, Ausstattung	47
2.5.2. Vorbereiten, Einstellen	48
2.5.3. Meßvorgang	49
2.5.4. Auswerten	50
2.5.5. Genauigkeit	53
2.6. Anwendungs-Beispiele	56
2.6.1. Erprobung als Planungswerkzeug	56
2.6.2. Kantenabsorber	58
3. Kommunikation und Publikation	59
3.1. Projekt-Meetings	59
3.2. Publikation	59
4. Fazit	60
5. Literatur	61

Kurzfassung

In diesem Projekt geht es darum, die seit langem in der Planung von Konzertsälen und anderen akustisch sehr anspruchsvollen Bauten eingesetzte Technik, skalierte Modelle von Räumen zu erstellen und darin raumakustische Messungen vorzunehmen, so weiter zu entwickeln und zu vereinfachen, daß sie auf einfache Weise und zu vertretbaren Kosten verwendbar wird. Damit soll diese Methode auch für die Planung akustisch anspruchsvoller Musik-, Kommunikations-, Unterrichts- und Arbeitsräume, für Forschung und Entwicklung und als Lehrmittel erschlossen werden.

Wesentliche Komponenten des Projekts sind die Bestandteile des Meßsystems (Schallquellen, Mikrofone, Elektronik, ..), die Konstruktion geeigneter Modellräume, die Modellierung von Schallabsorbieren und anderen das Schallfeld beeinflussenden Elementen wie Streukörpern, sowie eine Meß-Software mit speziellen Algorithmen für die Messung in skalierten Modellen.

Ein wichtiger Aspekt von akustischen Messungen im Modell ist, daß im Modell nur dann ein korrektes physikalisches Abbild des 1:1 Vorbilds entsteht, wenn auch die Wellenlängen des Schalls im Maßstab geschumpft werden. Das impliziert, daß alle Frequenzen invers zum Maßstab ansteigen, was zu erhöhten Anforderungen an das Meßsystem führt. Außerdem spielt die Schallabsorption der Luft in Modellen eine größere Rolle als in 1:1. .

Für die Entwicklung und Erprobung wurde ein Test-System mit allen Komponenten aufgebaut, wobei Entwicklungs-Phasen und Erprobungs-Phasen miteinander verzahnt waren. Dabei wurden sowohl sehr hochwertige Elemente als Referenzen, als auch kostengünstige Alternativen erprobt.

Mikrofone sind mit nahezu idealen Eigenschaften erhältlich, wobei die obere Frequenz-Grenze des Übertragungsbereichs die Kosten bestimmt. Bei den Schallquellen sind dagegen von der jeweiligen Meßaufgabe abhängige Kompromisse erforderlich, da kein verfügbarer Wandler in allen Eigenschaften wie Bandbreite, Baugröße, Richtcharakteristik usw. zugleich optimal ist. Bei den Audio-Interfaces als zentralem Teil der Meß-Elektronik gilt ähnlich wie bei Mikrofonen, daß nahezu ideale Eigenschaften erhältlich sind und die nutzbare obere Frequenz-Grenze wesentlichen Einfluß auf den Preis hat.

Die Software baut auf die in Vorprojekten Entwickelte Meß-Software AcouCheck auf und ist mit zusätzlichen Algorithmen für die Messungen im Modell versehen. Ein wesentlicher Algorithmus transformiert die im Modell gemessenen Raum-Impulsantworten nach 1:1, so daß die Meßergebnisse im Maßstab des Originals dargestellt werden. Mit weiteren Algorithmen kann die Auswirkung der erhöhten Schallabsorption der Luft in den Ergebnissen korrigiert werden.

Neben den einzelnen Komponenten wurde auch das gesamte System ausführlich getestet und an Beispielen erprobt. Insbesondere konnte an einem nachgestellten Planungs-Einsatz zu einem bereits gebauten und vermessenen Unterrichtsraum gezeigt werden, daß die Messung am Modell eine bessere Prognose der Raumeigenschaften lieferte, als die ursprünglich eingesetzten Methoden.

Das Ziel des Projektes, ein System für raumakustische Messungen in Modellen, wurde erfolgreich umgesetzt. Wesentlichen Einfluß auf den technischen Aufwand und auf die Kosten hat dabei die gewünschte obere Frequenzgrenze. Jüngste Entwicklungen auf dem Gebiet der aus Mikro-Mechanik und Elektronik integrierten Bauelemente können hier möglicherweise in Zukunft zu deutlichen Verbesserungen und zu geringeren Kosten führen.

Die Ergebnisse des Projektes in Form des AcouScale-Handbuchs und der AcouScale-Software werden kostenfrei zum Herunterladen bereitgestellt.

Abstract

The aim of this project is to further develop and simplify the technique of creating scaled models of rooms and taking room acoustic measurements in them, which has long been used in the planning of concert halls and other acoustically demanding buildings, so that it can be used in a simple way and at reasonable cost. In this way, this method is also to be made accessible for the planning of acoustically demanding music, communication, teaching and work spaces, for research and development and as a teaching aid.

Essential components of the project are the components of the measurement system (sound sources, microphones, electronics, ..), the construction of suitable model spaces, the modeling of sound absorbers and other elements influencing the sound field such as scatterers, and measurement software with special algorithms for measurement in scaled models.

An important aspect of acoustic measurements in the model is that a correct physical image of the 1:1 model is only created if the wavelengths of the sound are also shrunk in the scale. This implies that all frequencies increase inversely to the scale, which leads to increased demands on the measurement system. In addition, the sound absorption of the air plays a greater role in models than in 1:1.

For development and testing, a test system was set up with all components, whereby development phases and testing phases were interlinked. In the process, both very high-quality elements were tested as references, as well as low-cost alternatives.

Microphones are available with almost ideal characteristics, whereby the upper frequency limit of the transmission range determines the cost. With sound sources, on the other hand, compromises are necessary depending on the particular measurement task, since no available transducer is optimal in all properties such as bandwidth, size, directional characteristic, etc. at the same time. In the case of audio interfaces as the central part of the measurement electronics, it applies similarly to microphones that almost ideal properties are available and the usable upper frequency limit has a significant influence on the price.

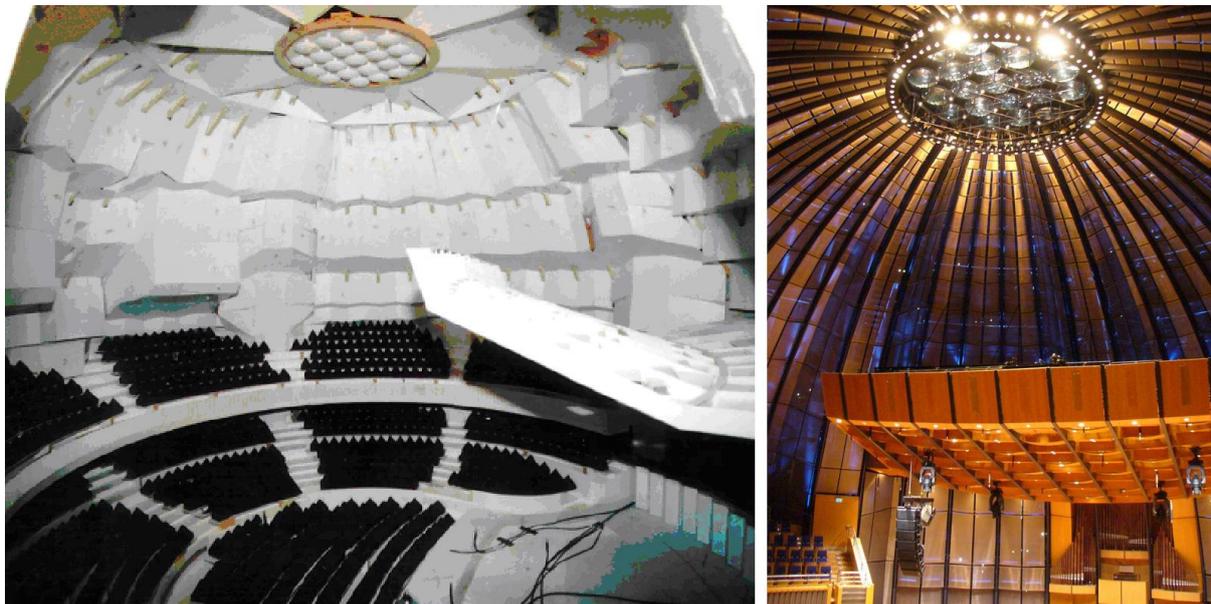
The software is based on the measurement software AcouCheck developed in previous projects and is provided with additional algorithms for the measurements in the model. An essential algorithm transforms the room impulse responses measured in the model to 1:1, so that the measurement results are displayed in the scale of the original. Another algorithm can be used to correct the effect of increased sound absorption of the air in the results.

In addition to the individual components, the entire system was also extensively tested and tried out on examples. In particular, it could be shown on a simulated planning application for an already built and measured classroom that the measurement on the model provided a better prediction of the room properties than the methods originally used.

The goal of the project, a system for room acoustic measurements in models, was successfully realized. The desired upper frequency limit has a significant influence on the technical effort and costs. Recent developments in the field of components integrated from micro-mechanics and electronics can possibly lead to significant improvements and lower costs in the future.

The results of the project in the form of the AcouScale manual and the AcouScale software are made available for download free of charge.

1. Einführung



Fotos: Peutz Consult (links) und D. Hennings (rechts)

Abb. 1 Blick in ein Modell des großen Saals der Tonhalle Düsseldorf im Maßstab 1:12. Mit diesem Modell wurde das komplexe 'Gebirge' innerhalb des kuppelförmigen Dachs erprobt, mit dessen Hilfe der nicht für diesen Zweck gebaute Raum zu einem guten Konzertsaal gemacht wurde (Bild links). In der Umsetzung ist das 'Gebirge' geschwärzt und von einem beleuchteten, für Schall transparenten Drahtgeflecht verkleidet. Das Drahtgeflecht erzeugt ein kuppelförmiges optisches Erscheinungsbild und verbirgt die akustisch wirksame Struktur (Bild rechts). Dies ist ein Beispiel für die Anwendung raumakustischer Messungen im skalierten Modell auf hohem Niveau.

Dieses Vorhaben baut auf die in vorangegangenen Entwicklungsvorhaben erstellte Raumakustik-Meßsoftware AcouCheck auf, die seit der Veröffentlichung von AcouCheck 2 Mitte 2017 vom primären Downloadportal rund 1000-mal jährlich heruntergeladen wird (ohne sekundäre Downloads von Hochschul-Servern, die nicht erfaßt werden). Zudem wurden weit über 20 000 Abfragen der Schallabsorber-Datenbank registriert, was auf eine rege Nutzung schließen läßt.

Mit dem Vorhaben AcouScale wird gegenüber AcouCheck, das Prinzip bedingt immer einen bereits vorhandenen Raum voraussetzt, die zusätzliche Möglichkeit erschlossen, mittels skalierten Modelle auch neu projektierte aber noch nicht realisierte Räume raumakustisch zu untersuchen. Diese Technik ist in der Planung akustisch sehr anspruchsvoller Räume wie Konzertsäle seit langem ein gängiges Mittel und soll im Projekt AcouScale so weit vereinfacht werden, daß sie auch in der akustischen Planung kleinerer Bauvorhaben, in der Forschung und für Lehrzwecke eingesetzt werden kann.

2. Ergebnisse des Vorhabens

2.1. Grundlegendes

2.1.1. Skalierung als Planungs-Methode

Es gibt eine Reihe von Werkzeugen, um in der raumakustischen Planung die Eigenschaften von Räume zu prognostizieren. Sehr einfach und häufig genutzt ist die Sabine'sche Formel zur Berechnung von Nachhallzeiten. Etwas weniger einfach ist die Berechnungs-Formel von Eyring. In beiden wird mit einem statistischen Ansatz das Abklingen des Schall aufgrund des Raumvolumens und der im Raum wirksamen Absorber berechnet. Die Geometrie und alle davon abhängigen Effekte bleiben dabei unberücksichtigt.

Auf einer Modellierung der Geometrie im Computer beruhen Raumakustik-Simulationsverfahren, in denen die Schallausbreitung analog zum Licht mit Strahlen und Spiegelungen nachgebildet wird. Solange die Wellenlängen klein sind im Vergleich zu den Abmessungen geometrischer Objekte im Raum und zu den Abmessungen der Umschließungsflächen, funktioniert diese Art der Modellierung recht gut. Allerdings können Beugungs-Effekte nur mit einer Parametrisierung berücksichtigt werden und Eigenschwingungen werden ignoriert.

Eine Computer-Modellierung mit finiten Elementen erlaubt es prinzipiell, mit beliebig hohem Aufwand beliebig genau zu modellieren. Die dafür erforderliche Rasterung des Volumens, aller Oberflächen und der Zeit muß umso feiner erfolgen, je höhere Frequenzen einbezogen werden. Aus praktischen Gründen eignet sich die Finite-Elemente-Modellierung daher eher für den tieffrequenten Bereich. Zudem ist der Aufwand sehr hoch.

Den genannten Werkzeugen ist gemeinsam, daß die Resultate jeweils aus einer mathematisch formulierten Nachbildung des realen Raums gewonnen werden. Im Gegensatz dazu wird beim Messen in skalierten Modellen der Schall selber in der Modellierung verwendet und nicht eine mathematische Beschreibung (die nie vollständig sein kann). Damit sind die grundlegenden Eigenschaften von Modell und Original dieselben physikalischen Zusammenhänge. Wenn die Geometrie und die Wellenlänge des Schalls im gleichen Maßstab skaliert werden, bleiben die Schallfelder 'selbstähnlich'. Damit kann das Modell prinzipiell ein perfektes Abbild des Originals sein.

Die praktischen Einschränkungen für die Perfektion des Abbilds beruhen in erster Linie darauf, daß mit einer um einen Maßstabs-Faktor m verkleinerten Wellenlänge mit einer um den inversen Faktor $1/m$ erhöhten Frequenz verbunden ist. Die erhöhten Frequenzen wirken sich auf mehrfache Weise aus:

- Die Schallabsorption durch die Luft nimmt stark zu
- Der Übertragungsbereich der Schallwandler (Mikrofone, Lautsprecher) ist begrenzt
- Oberflächen-Eigenschaften werden eventuell ungenau nachgebildet

2.1.2. Maßstab und Modell-Größe

In der Vorbereitung von Messungen in skalierten Modellen muß ein geeigneter Maßstab gewählt werden. Dabei spielt eine Reihe von Kriterien eine Rolle. Die Größe des Vorbild-Raums ergibt zusammen mit dem Maßstab die Größe des Modells. Dazu zwei Beispiele:

- Die Abmessungen großer Konzertsäle liegen im Bereich von etwa 20 bis 50 Meter, woraus im Maßstab 1:10 zwei bis fünf Meter werden.
- Ein Seminar- oder Unterrichts-Raum ($L = 10$ m, $B = 7$ m, $H = 3$ m) bekommt im Maßstab 1:5 die Dimension eines horizontal gelegten Kleiderschranks (2.0 m x 1.4 m x 0.6 m).

Da dies Innen-Abmessungen sind, kommt jeweils noch die Konstruktion der umschließenden Hülle hinzu.

Der verfügbare Aufstellort ist entscheidend für die maximal mögliche Größe des Modells und limitiert damit den Maßstab. Auch die Transportierbarkeit des Modells muß einbezogen werden. Soll ein Modell in einer Werkstatt aufgebaut und einem anderen Ort eingesetzt werden, dann muß es den Transport unbeschadet überstehen können. Das setzt Robustheit voraus und begrenzt das Gewicht ebenso wie die Abmessungen, so daß Türen passiert und Fahrzeuge genutzt werden können. Ein Demonstrations-Modell für Lehrveranstaltungen sollte auf einem Laborwagen transportabel sein.

Das Frequenzspektrum der Meßsignale ist ebenfalls durch den Maßstab und zusätzlich durch den Untersuchungsgegenstand bedingt. Mehr dazu im folgenden Kapitel.

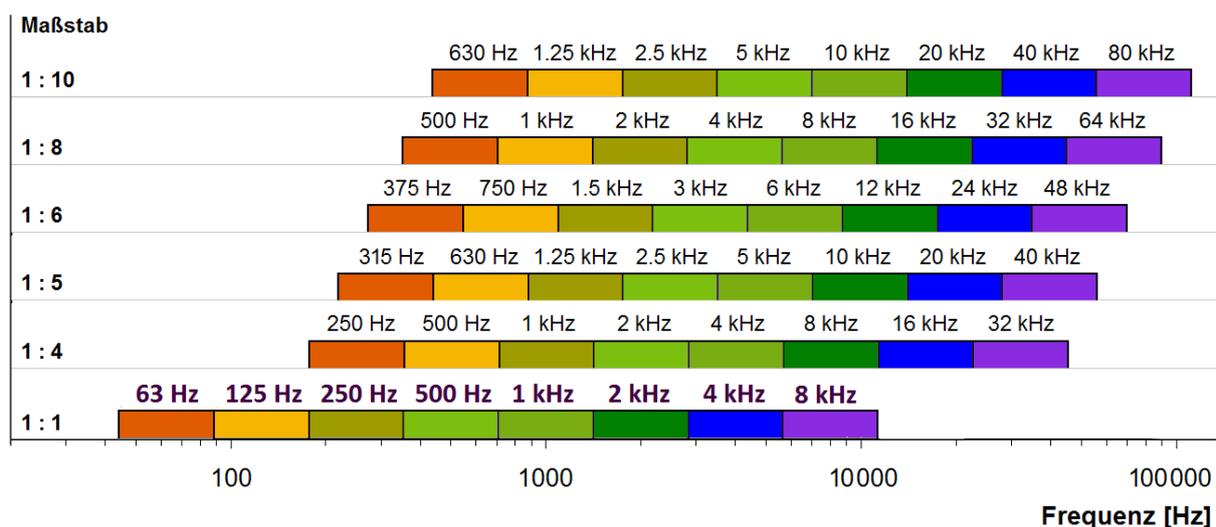
Weitere Kriterien können der gewünschte Detaillierungsgrad, bereits vorhandene Ressourcen oder eine Obergrenze für den Aufwand sein.

2.1.3 Maßstabs-Transformation

Zwecks Messung in einem Modell müssen alle in den Meßprozeß und dessen Auswertung eingehenden Größen entsprechend dem gewählten Maßstab transformiert werden. Unmittelbar einsichtig ist, daß bei einem Maßstab $1:m$ alle Längen und Abmessungen durch den Faktor m geteilt werden müssen. Die weiteren Transformationen ergeben sich daraus, daß im Modell die gleichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten gelten wie im Vorbild und zudem das Geschehen im Modell ein in sich schlüssiges Abbild des Geschehens im Vorbild sein soll.

Mit der Annahme, daß das Modell wie das Vorbild mit Luft bei gleicher Temperatur befüllt ist, bleibt die Schallgeschwindigkeit c unverändert. Das hat zur Konsequenz, daß im Modell auch die Zeit um einen Faktor $1/m$ geschrumpft wird und daß sich alle Schall-Frequenzen f um einen Faktor m erhöhen. Damit gilt für Frequenz f und Wellenlänge λ im Modell wie im Vorbild der grundlegende Zusammenhang: $c = f \cdot \lambda$

Die mit einem Verkleinerungs-Maßstab immer verbundene Verschiebung des Spektrums zu hohen Frequenzen (Abb. 2) hin bedeutet auch, daß technische Grenzen von Komponenten des Meßaufbaus erreicht werden und daß die Schallabsorption der Luft eine zunehmende Rolle spielt.



Grafik D. Hennings

Abb. 2 Die spektrale Verschiebung der Standard-Oktavbänder für verschiedene Maßstäbe.

Aus der Perspektive des Frequenzspektrum sind also Maßstäbe mit wenig Verkleinerung wie beispielsweise 1:5 eine gute Wahl. Wenn allerdings die Untersuchung nur auf den unteren Teil des Hörspektrums (bezogen auf das Original) begrenzt ist, spielt dieser Aspekt nur eine untergeordnete Rolle. Ein Beispiel dafür ist die Analyse von Eigenfrequenzen eines Raums, die vorwiegend unterhalb der Schröderfrequenz eine Rolle spielen.

Die Auswirkung der Maßstabs-Transformation auf einzelne Komponenten wie Schallabsorber wird Kapitel 2.4 erörtert. Darin sind auch die Algorithmen für die Maßstabs-Transformation innerhalb der AcouScale-Software einschließlich der Korrektur für die ansteigenden Schallabsorption der Luft beschrieben.

2.1.4 Die Komponenten von 'AcouScale'

Das Projekt AcouScale soll raumakustische Messungen in skalierten Modellen mit einem möglichst geringen technischen und finanziellen Aufwand ermöglichen und damit diese Methode auch für kleinere Bau- und Forschungsvorhaben sowie für Lehrzwecke erschließen. Dazu sind eine Reihe von Komponenten erforderlich, die untersucht und erpobt wurden, und die in den einzelnen Kapiteln beschrieben sind. Zudem wurde die Software 'AcouCheck 2' weiterentwickelt zur 'AcouScale-Software' mit speziellen Funktionen und Algorithmen für Messungen im Modell.

Die Meßapparatur

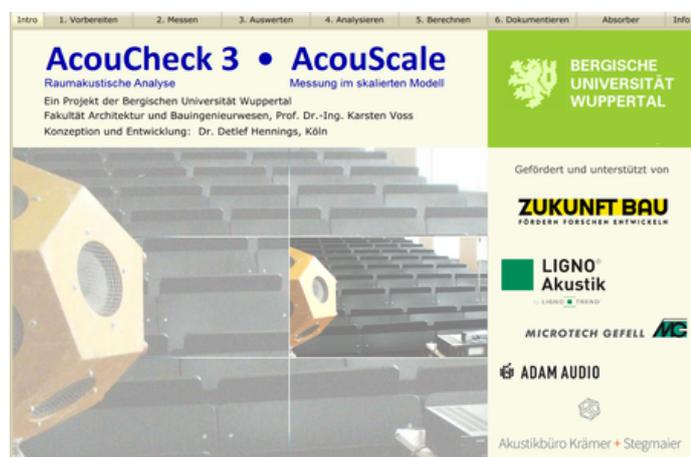
In Kapitel 2.2 wird die für die Messungen erforderliche Apparatur genauer betrachtet. Unverzichtbar für die Messungen sind Schallquellen, die Meß-Signale in den Modellraum abstrahlen und Mikrofone, die die vom Raum veränderten Meß-Signale wieder aufnehmen. Zudem wird eine Meßelektronik benötigt mit Signal-Verstärkern und Wandlern, die digitale Signale in Analoge umsetzen und umgekehrt. Schließlich muß es möglich sein, die Luft-Feuchte und -Temperatur im Inneren des Modells zu messen. In 2.2 werden die Eigenschaften der einzelnen Bestandteile der Meßelektronik erörtert und es wird beschrieben, wie und nach welchen Kriterien für ein bestimmtes Meßobjekt und eine Meßaufgabe geeignete Typen ausgewählt werden können.

Die AcouScale-Software

Die Software dient dazu, die Meßabläufe zu steuern, Meßsignale zu erzeugen und wieder aufzunehmen. Zudem erfolgt in der Software die Auswertung und Weiterverarbeitung der gemessenen Signale. Die AcouScale-Software ist als Weiterentwicklung entstanden aus der Raumakustik-Meßsoftware 'AcouCheck' und mit zusätzlichen Eigenschaften und Algorithmen versehen, die Messungen in Modellen erleichtern. In Kapitel 2.3 ist die Software in ihrer Funktionsweise und mit ihren Algorithmen beschrieben, einschließlich einer kompakten Benutzungs-Anleitung.

Abb. 3

Die Startseite der AcouScale Software, die zugleich Version 3 der Software AcouCheck ist..



Modell-Räume

In Kapitel 2.4 geht es um die Beschaffenheit von Modellräumen und deren Ausstattung mit Objekten und Oberflächen, die den Schall beeinflussen. Neben den Dimensionen und dem Maßstab geht es auch um Konstruktionsweise, Stabilität und Handhabbarkeit. Die Modellierung verschiedener Schallabsorber-Typen wird ebenso behandelt wie die Modell-Möblierung und die Besetzung mit Modell-Personen.

Der Ablauf von Modell-Messungen

Um das zuvor in Modulen beschriebene System im Einsatz geht es in Kapitel 2.5. Für eine konkrete Meßaufgabe müssen als erstes die Voraussetzungen geklärt werden und eine geeignete Ausstattung ausgewählt werden. In der Vorbereitung müssen die einzelnen Komponenten aufgebaut, zusammengesetzt und einsatzbereit gemacht werden. Nachdem alle Einstellungen erfolgt sind, kann eine Meßreihe beginnen, die aus mehreren Einzelmessungen besteht, die sich in der Regel in den Positionen von Schallquelle und Mikrofon unterscheiden. Zu jeder Einzelmessung gehört auch eine Überprüfung von deren Qualität mit der Option die Messung zu wiederholen. Die Ergebnisse jeder Einzelmessung in einem skalierten Modell werden von der AcouScale-Software automatisiert in den Maßstab 1:1 transformiert. Die Resultate können dann einzeln oder überlagert visualisiert werden. Nachhallzeiten können über die Einzelmessungen gemittelt und mit DIN-Empfehlungen verglichen und bewertet werden. Mit Hilfe der integrierten Schallabsorber-Datenbank kann die Wirkung zusätzlicher Absorber im Raum prognostiziert werden. Die Wirkung der stark erhöhten Schallabsorption der Luft bei hohen Frequenzen kann mit Hilfe integrierter Algorithmen der AcouScale-Software korrigiert werden.

Als abschließende Beispiele werden in Kapitel 2.6 Messungen an Objekten vorgestellt, die der Erprobung des AcouScale-Systems dienen.

2.2. Die Meßapparatur

Der Meßaufbau dient in erster Linie dazu, ein Meßsignal im Modell-Raum auszusenden und das im Raum modifizierte Signal zu empfangen. In der Auswertung werden aufgrund der Signal-Modifikation akustische Raum-Eigenschaften bestimmt. In Abb. 4 ist der Signalfluß im Meßaufbau schematisch dargestellt.

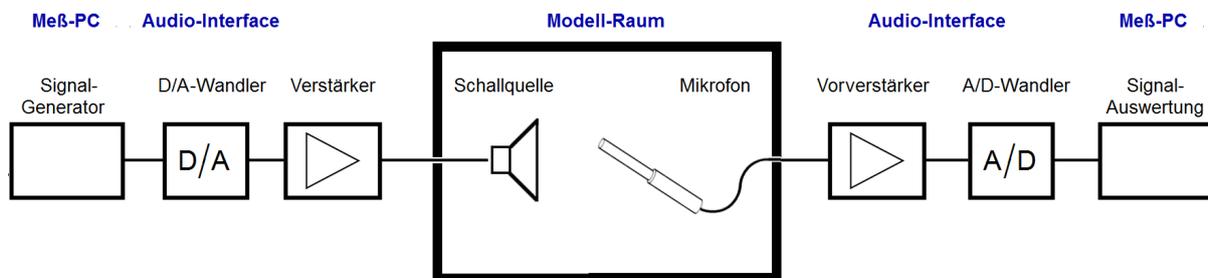


Abb. 4

Ein Signal-Generator, der Bestandteil der Meß-Software ist, erzeugt in digitaler Form das Meß-Signal, das in ein Analog-Signal gewandelt und dann verstärkt wird für den Lautsprecher, der als Schallquelle im Modell dient. Das vom Raum modifizierte Meßsignal wird über das Mikrofon nach Verstärkung und Digitalisierung zur Auswertung zurück an die Meß-Software übertragen. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten des Meßaufbaus behandelt.

2.2.1 Mikrofone

Mit dem Mikrofon werden die akustischen Meßsignale für die Auswertung in elektrische Signale verwandelt. Die Eignung eines Mikrofons für Modell-Messungen hängt von einigen Eigenschaften ab:

- Der Übertragungs-Frequenzbereich der meisten Mikrofone ist am menschlichen Hörbereich orientiert, der von etwa 20 Hz bis 20 kHz reicht. Da bei Modell-Messungen alle Frequenzen nach oben transformiert werden, sind hier Mikrofone mit hoher Obergrenze des Übertragungsbereichs gefragt. Die Untergrenze ist dagegen unkritisch.
- Die Richtcharakteristik soll bei Raumakustik-Messungen in der Regel kugelförmig sein. Deshalb sind Meßmikrofone 'Druckempfänger' - sie reagieren auf den Schalldruck, der eine ungerichtete Größe ist. Solange die Mikrophonkapsel klein gegen die Wellenlänge des Schalls ist, zeigen solche Mikrofone eine nahezu ideale Kugel-Charakteristik. Wenn dagegen bei hohen Frequenzen die Wellenlänge in die Nähe des Kapsel-Durchmessers kommt, zeigen alle Mikrofone eine deutliche Richtwirkung. Ein kleinerer Kapsel-Durchmesser verschiebt dies zu höheren Frequenzen, was bei Modell-Messungen vorteilhaft ist.
- Ein geringes Eigenrauschen des Mikrofons ist vorteilhaft um einen großen Signal-Stör-Abstand bei Messungen zu erhalten. Eine große Membranfläche führt zu einem stärkeren Signal und damit zu einem geringeren Geräuschpegel.

Als Referenz dient im Projekt AcouScale ein Mikrofon des Herstellers Mircotech Gefell mit dem Kapseltyp MK301E und mit einem spezifizierten Übertragungsbereich bis 100 kHz. Aufgrund des Kapsel-Durchmessers von 7 mm setzt die Richtwirkung erst bei recht hohen Frequenzen ein, was für raumakustische Modellmessungen vorteilhaft ist. Allerdings benötigt dieser Mikrontyp spezielle Vorverstärker und ist daher nicht direkt an gängige kostengünstige Audio-Interfaces anschließbar.

Abb. 5

Die als Referenz eingesetzte Mikrophonkapsel des Herstellers Mircotech Gefell. Wegen des geringen Kapsel-Durchmessers von 7 mm setzt die ausgeprägte Richtwirkung erst bei sehr hohen Frequenzen ein.

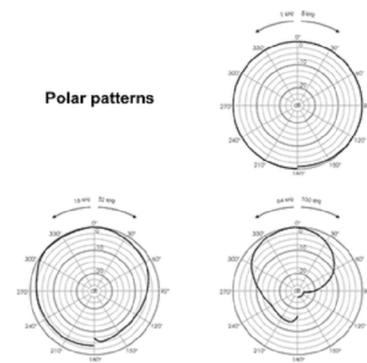


Foto und Grafik: MTG

Eine Minimal-Ausstattung auf Basis des Referenz-Mikrofons bedingt eine Investition der Größenordnung 3000 €. Um die Modell-Meßtechnik auch für Projekte mit geringem Budget besser zu erschließen, wurden exemplarisch auch einige kostengünstigere Meßmikrofon-Typen auf ihre Eignung hin untersucht.

Das HAUN MBNM 550 EL (Abb. 6) ist ein typisches Standard-Meßmikrofon mit guten Eigenschaften und bis 20 kHz spezifiziertem Übertragungsbereich. Soweit dies ausreicht, ist das Mikrofon gut für Messungen in Modellen geeignet. Dies gilt auch für diverse andere, ähnlich aufgebaute Meßmikrofone auf verschiedenen Qualitäts- und Preisniveaus von unter 100 € bis mehrer hundert Euro.



Abb. 6

Foto D. Hennings

Das Audix TM 1 (Abb. 7) ist, an der Preisklasse (250 - 300 €) gemessen, besonders gut für Messungen in Modellen geeignet, denn der Mikrofonhals ist besonders dünn, was sich positiv auf die Richtcharakteristik auswirkt, und der Übertragungsbereich ist bis 25 kHz spezifiziert.



Abb. 7

Foto Audix

Das MicW i436 (Abb. 8) ist ein besonders klein gebautes Meßmikrofon in der Preisklasse um 100 € und ist besonders zum Messen an beengten Positionen geeignet. Der Übertragungsbereich ist bis 20 kHz spezifiziert. Mit vierpoligem Klinkenstecker benötigt das Mikrofon für den Betrieb am PC ein spezielles Audio-Interface wie das RØDE AI-Micro.



Abb. 8

Foto MicW

In der höheren Preisklasse oberhalb 1000 € sind neben der Referenz Mircotech Gefell MK301E auch weitere Mikrofone mit sehr breitem Übertragungsbereich erhältlich wie das Meßmikrofon Earthworks Audio M50, das bis 50 kHz spezifiziert ist, und das bis 60 kHz spezifizierte Studio-Mikrofon Sennheiser MKH 8020. Letzteres hat allerdings einen für Studio-Mikrofone typischen größeren Kapsel-Durchmesser, was sich auf die Richtcharakteristik bei hohen Frequenzen auswirkt.

2.2.2. Schallquellen

Die Schallquellen dienen dazu, ein Meßsignal in den zu vermessenden Raum abzustrahlen. In raumakustischen Messungen kommen sowohl mechanische Quellen (z.B. zerplatzende Ballons) als auch elektrisch angesteuerte Quellen, im Wesentlichen Lautsprecher, zum Einsatz. Mechanische Quellen werden in der Regel von einer Person im Raum ausgelöst, so daß in Modellen in erster Linie Lautsprecher in Frage kommen.

Anforderungen an die Schallquellen:

- Die Schallquellen sollen eine für die jeweilige Meßaufgabe hinreichende Bandbreite aufweisen, beispielsweise bei Messungen in den 6 Oktavbändern 125 Hz bis 4 kHz in einem Maßstab 1:5 Modell bis 28 kHz, in einem Maßstab 1:10 Modell bis 56 kHz.
- Der Amplituden-Frequenzgang der Schallquellen soll gleichmäßig sein.
- Die Schallquellen sollen nach Möglichkeit reproduzierbare Meßsignale abstrahlen können.
- In vielen Fällen ist eine gleichmäßige Abstrahlung des Schalls in alle Richtungen erwünscht.
- Schallquellen sollten klein genug sein, so daß sie das Schallfeld im Raum nicht in untypischer Weise verändern.

Für raumakustische Messungen kommen eine Reihe von Schallquellen-Typen in Frage, die sich in zwei Kategorien unterteilen lassen:

- Schallquellen, die ausschließlich einen kurzen Schallimpuls abstrahlen können. Dazu zählen die rein mechanisch wirkenden Schallquellen wie zerplatzende Luftblasen und Ballone, Klappen und Hände-Klatschen. Ebenfalls zählen dazu explosive Knallkörper und Funkenstrecken. Mit diesen Schallquellen können Raum-Impulsantworten direkt gemessen werden. Die meisten Schallquellen dieser Kategorie sind in Modellen allerdings nicht nutzbar, da sie von Menschen im Raum mechanisch ausgelöst werden.
- Schallquellen, die als Schallwandler ein elektrisches Meßsignal in ein entsprechendes Schallsignal umsetzen. Dazu zählen Lautsprecher verschiedener Bauart, vorwiegend mit elektrodynamischem Antrieb. Eine alte Nutzungs-Variante besteht darin, über einen Lautsprecher ein Rauschen in den Raum abzustrahlen, das Rauschen abzuschalten und dann aus dem Abklingen des Rauschsignals Nachhallzeiten zu bestimmen. In den neueren Varianten werden Sinus-Sweeps oder MLS-Signale (Maximalfolgen) genutzt, mit denen auf indirekte Weise Raum-Impulsantworten präziser und weniger störanfällig gemessen werden können, als dies in der Regel mit Impulsschallquellen möglich ist. Soweit sie sich genügend miniaturisieren lassen, eignen sich diese Schallquellen auch für Messungen im Modell.

Im Folgenden wird die Eignung einzelner Schallquellen-Typen näher betrachtet.

Zu den elektrodynamischen Wandlern zählen die meisten gängigen Lautsprecher (und Kopfhörer). Ihre Funktion beruht auf der Kraft, die auf einen Strom-durchflossenen Leiter in einem Magnetfeld wirkt. Das häufigste Konstruktionsprinzip ist eine Strom-durchflossene Spule, die sich in einem ringförmigen Spalt zwischen den Polen eines Magneten befindet. Die Spule ist mit der Lautsprecher-Membran verbunden und setzt diese in Bewegung.

Diese Art Lautsprecher ist für den Hörbereich gut geeignet. Für einige Hochton-Lautsprecher dieser Bauart wird ein Übertragungsbereich bis etwa 40 kHz angegeben. In einem anderen Bauprinzip elektrodynamischer Wandler sind elektrische Leiterbahnen in die Membran integriert und diese befindet sich in einem parallel zur Membranfläche und senkrecht zu den Leiterbahnen verlaufenden Magnetfeld und wird somit direkt angetrieben. Diese Bauweise ist aufgrund des direkten Antriebs gut geeignet für die Übertragung hoher Frequenzen.

Abb. 9 Der als Referenz verwendete Hochtöner des Herstellers ADAM-Audio mit gefalteter und direkt angetriebener Membran

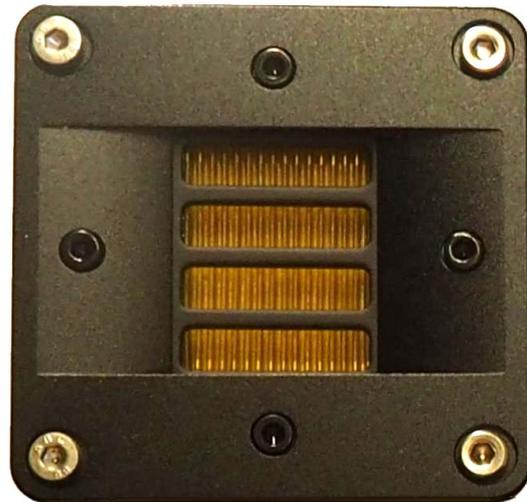


Foto D. Hennings

Bei elektrostatischen Wandlern befindet sich eine elektrisch geladene Membran in einem elektrischen Feld zwischen zwei schalldurchlässigen Elektroden-Platten, dem das Tonerzeugende Signal überlagert ist. Auch hier ist die Membran direkt angetrieben und zudem sehr leicht mit entsprechenden Vorteilen bei hohen Frequenzen. Allerdings sind die elektrostatischen Antriebskräfte recht klein, so daß zwei Wege beschritten werden um den abgestrahlten Schallpegel zu erhöhen. Mit einer hohen Spannung bis in den kiloVolt-Bereich wird für eine hohe Feldstärke gesorgt und die Membranfläche wird größer gewählt, als dies bei elektrodynamischen Wandlern üblich ist. letzteres bewirkt eine ausgeprägte Richtwirkung elektrostatischer Wandler. Der elektrostatische Antrieb kommt sowohl bei Lautsprechern als auch bei Kopfhörern zum Einsatz, allerdings eher als Ausnahme und im oberen Qualitäts-Segment, was durch erhöhten Aufwand und erhöhte Kosten bedingt sein dürfte.

Eine Funkenstrecke, die ähnlich der Zündung eines Ottomotors funktioniert, ist als elektrisch betriebene Impuls-Schallquelle in Modellen einsetzbar. Funkenstrecken werden in Konzertsaal-Modellen eingesetzt, beispielsweise um Reflexionen im Raum zu identifizieren. Sie sind aber auch nicht unproblematisch, den sie bedingen Sonderkonstruktionen, die Impulse sind nicht exakt reproduzierbar und enthalten eher geringe tieffrequente Anteile und sie erzeugen breitbandige elektromagnetische Störfelder, so daß die übrige Meßelektronik gut abgeschirmt sein muß.

Eignung und Auswahl von Wandlern für Messungen im Modell

Die Betrachtung der Eigenschaften verschiedener Wandler-Typen hat bereits gezeigt, daß keiner der Wandler alle gewünschten Eigenschaften gut bis sehr gut erfüllt. Es ist also notwendig, Kompromisse einzugehen, die vom Maßstab und der Größe des Modells und von der jeweiligen Meßaufgabe abhängig sein können. In welcher Weise dies geschehen kann, wird im Folgenden exemplarisch gezeigt, wobei die Einfachheit und der geringe Aufwand bei der Realisierung als zusätzliche Leitlinien dienen.

Die Obergrenze des Frequenzspektrums ergibt sich aus der Meßaufgabe und dem Maßstab. Sollen beispielsweise Messungen in den häufig genutzten Oktavbändern von 125 Hz bis 4 kHz (bezogen auf 1:1) in einem Raum im Maßstab 1:10 durchgeführt werden, dann werden die Oktavbänder nach 1.25 kHz bis 40 kHz transformiert. Da die obere Frequenzgrenze jedes Oktavband um den Faktor $\sqrt{2}$ über der 'Mittenfrequenz' liegt, ergibt als maximale Frequenz die Obergrenze des 40 kHz-Oktavbandes von etwa 56 kHz. Diese Frequenz wird nur von wenigen Lautsprecher erreicht wie einigen Typen mit gefalteter oder mit Bändchen-Membran. Ebenso von einigen Hochtönern mit kleiner Kalotten-Membran, allerdings mit spektral sehr ungleichmäßigem Verlauf (vgl. Abb. 10).



Grafik: D. Hennings

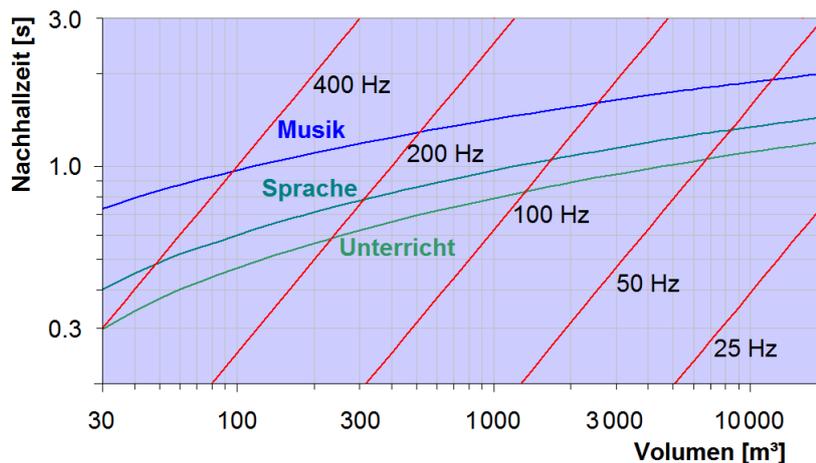
Abb. 10 Gemessene Amplituden-Frequenzgänge einiger Hochtön-Lautsprecher von 4 kHz bis 60 kHz auf der Achse. Alle vier Lautsprecher übertragen bis über 50 kHz hinaus. Allerdings zeigen die drei kleinen Kalottenhochtöner mit Membran-Durchmessern um 15 mm einem ungleichmäßigen spektralen Verlauf, wogegen die Übertragung des als Referenz eingesetzten ADAM-Hochtöners mit gefalteter und direkt angetriebener Membran (grüne Kurve) spektral recht glatt verläuft. Der gemeinsame Einbruch aller vier Kurven bei 24 kHz ist ein Artefakt des Meßaufbaus.

Bei der entsprechenden Messung in einem Modell des Maßstabs 1:5 sinkt die höchste benötigte Frequenz auf 28 kHz, und damit in einen Bereich, in dem die Auswahl an einsetzbaren Lautsprechern beträchtlich größer ist. Das bedeutet, wenn Messungen im 4 kHz-Oktavband ein nicht verzichtbarer Bestandteil der Meßaufgabe sind, ist es vorteilhaft einen größeren Maßstab zu wählen, soweit die Randbedingungen es zulassen. Wenn andererseits als Kompromiß auf das 4 kHz-Oktavband verzichtet werden kann, kann auch im Maßstab 1:10 die obere Frequenz-Grenze auf 28 kHz gesenkt werden.

Sollen dagegen in einer Meßreihe die Eigenschwingungen eines Raumes untersucht werden, dann ist der tiefe Frequenzbereich von besonderem Interesse, denn die Eigenschwingungen sind vorwiegend im Spektralbereich unterhalb der Schroederfrequenz relevant, die sich aus dem Volumen und der Nachhallzeit ergibt:

$$f_s = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}}$$

f_s Schroederfrequenz [Hz]
 T Nachhallzeit [s]
 V Raumvolumen [m^3]

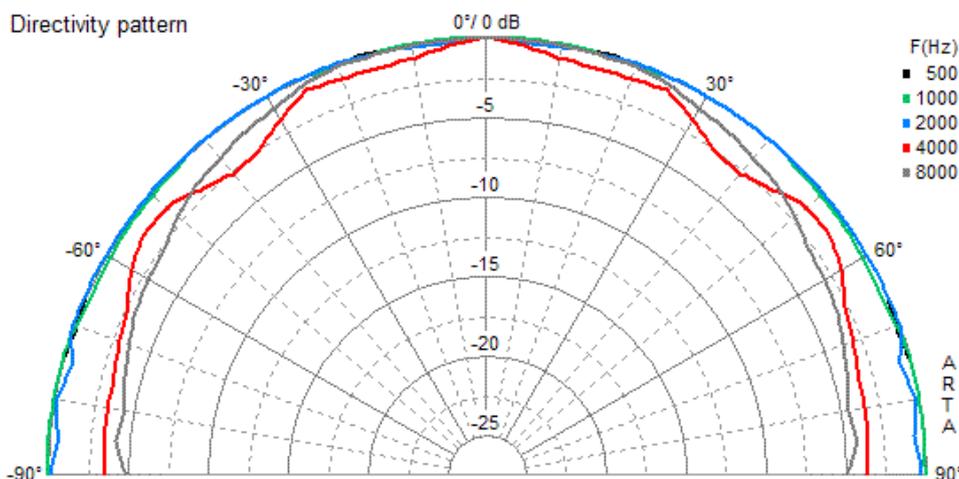


Grafik: D. Hennings

Abb. 11 Die Schröderfrequenz (rote Isolinien) in Abhängigkeit vom Raumvolumen und von der Nachhallzeit. Zusätzlich sind die empfohlenen Nachhallzeiten nach DIN 18041 für die Nutzungsarten Musik, Sprache und Unterricht eingetragen.

Aus Abb. 11 ist ersichtlich, daß die Schröderfrequenzen bei allen realistischen Räumen deutlich unter 1 kHz und damit auch bei 1:10-Modellen unter 10 kHz liegen. Für diese Meßaufgabe reichen also im menschlichen Hörbereich arbeitende Lautsprecher aus.

Die Richtcharakteristik einer Schallquelle hängt in erster Linie von der Größe der Schallquelle in Relation zur Wellenlänge des abgestrahlten Schalls ab. Bei einer Schallquelle, die klein im Vergleich zur Wellenlänge ist, wird der Schall nahezu gleichmäßig in alle Richtungen abgestrahlt. Wenn beispielsweise ein großer Tiefton-Lautsprecher mit 34 cm Durchmesser einen 100 Hz-Ton abstrahlt, beträgt die Wellenlänge mit 3,4 m das zehnfache des Durchmessers. Im Maßstab 1:10 entspricht das einem 1 kHz-Ton, den ein Miniatur-Lautsprecher mit 34 mm Durchmesser abstrahlt. Das ist realisierbar, da es solche kleinen Lautsprecher gibt.



Quelle: Visaton

Abb. 12 Die Richtcharakteristik eines kleinen Lautsprechers mit etwa 30 mm Membrandurchmesser (Visaton BF 32). Bis 2 kHz strahlt der Lautsprecher nahezu ideal kugelförmig ab. Darüber setzt die Richtwirkung ein.

Wenn nun in 1:1 ein 1 kHz-Ton von einem Mittelton-Lautsprecher mit 34 mm abstrahlt wird, läßt sich dies im Maßstab 1:10 nicht adäquat nachbilden, da Lautsprecher mit wenigen Millimeter Durchmesser nicht erhältlich sind. An diesen Beispielen ist erkennbar, daß in skalierten Modellen eine rundum gleichmäßige Abstrahlung weniger gut realisieren läßt als in 1:1, weil sich Schallquellen nicht beliebig minaturisieren lassen. Die gerichtete Abstrahlung von Schallquellen spielt Modell-Messungen offenbar eine größere Rolle als in 1:1.

In der 1:1-Welt wird eine Abstrahlung in viele Richtungen oft mit 12 gleichen Lautsprecher-Chassis in einem Dodekaeder realisiert. Der typische Membran-Durchmesser liegt im Bereich 10 - 15 cm. Es gibt Miniatur-Lautsprecher, mit denen ein solcher Dodekaeder-Lautsprecher im Maßstab 1:10 nachbilden läßt, allerdings mit oberer Grenze des Übertragungsbereichs bei 20 kHz. Ein sehr breitbandiger Dodekaeder-Lautsprecher mit ADAM-Hochtönern müßte wegen deren starken und platzgreifenden Magneten so groß sein, daß er nahezu die Höhe eines 1:10-Raums erreicht. Auch ein Würfel mit sechs dieser Lautsprecher wird ungeeignet groß.

Abb. 13 zeigt schematisch vier ADAM-Hochtöner in einer kompakten Anordnung mit Abmessungen eines Modell-Möbelstücks. In dieser Anordnung wurden Nachhallzeiten mit jedem der vier Lautsprecher gemessen, also mit jeweils um 90° gedrehter Abstrahl-Richtung. Die Ergebnisse zeigen, daß der Einfluß der Abstrahl-Richtung ähnlich groß ist, wie der Einfluß der Lautsprecher-Positionen im Raum. Abstrahl-Richtungen können dem zufolge in gleicher Weise wie Positionen im Raum behandelt werden, also durch Mittelung über mehrere Messungen mit unterschiedlicher Abstrahl-Richtung.

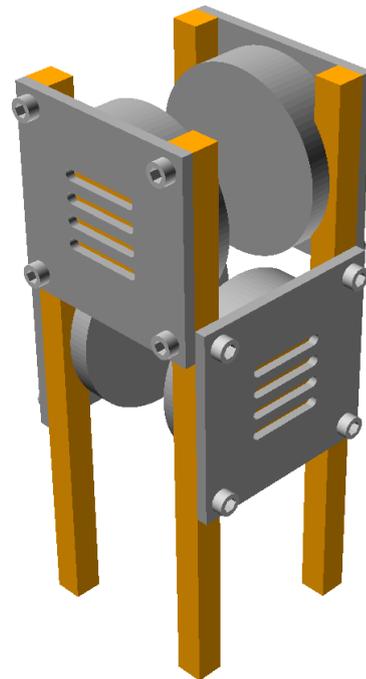
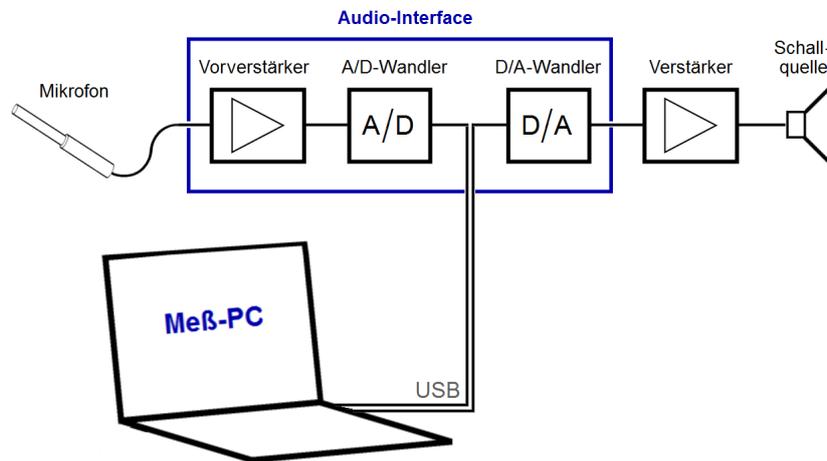


Abb. 13

Grafik D. Hennings

2.2.3. Die Meß-Elektronik

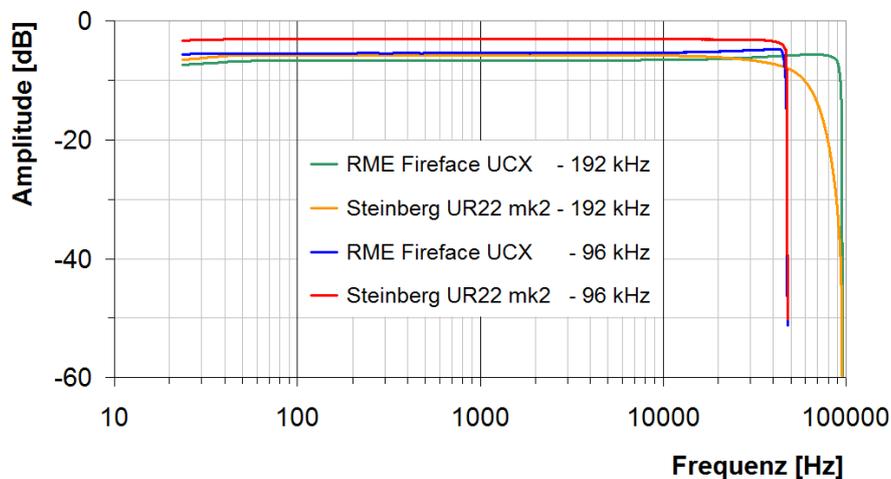
In Abb. 4 ist bereits gezeigt, wie das Meßsignal die gesamte Meßstrecke durchläuft. Abb. 14 zeigt die elektronischen Komponenten der Meßstrecke in einem Blockschaltbild.



Grafik D. Hennings

Abb. 14 Blockschaltbild der Audio-Signalkette

Das zentrale Glied der Meßstrecke ist das Audio-Interface, in dem die Digital-Analog- und die Analog-Digital-Wandlungen erfolgen. Handelsübliche Audio-Interfaces sind für den menschlichen Hörbereich von 20 Hz bis 20 kHz ausgelegt und vielfach auch nur für diesen spezifiziert. Da für Modell-Messungen auch höhere Frequenzen benötigt werden, wurden exemplarisch Übertragungseigenschaften einiger Audio-Interfaces vermessen. Abb. 15 zeigt zwei Beispiele.



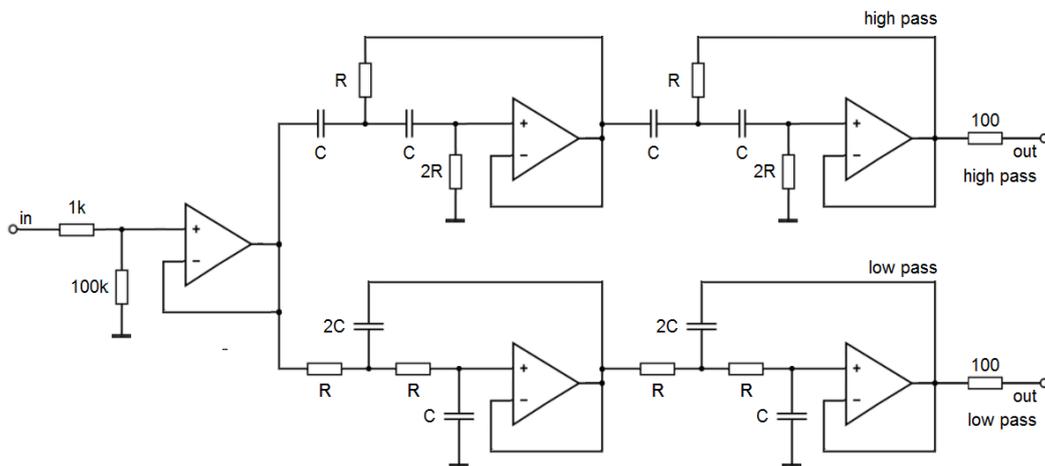
Grafik D. Hennings

Abb. 15 Gemessene Amplituden-Frequenzgänge zweier Audio-Interfaces bei den Abtastfrequenzen 96 kHz und 192 kHz.

Die theoretische Obergrenze ist die halbe Abtastfrequenz (sample rate). Bei den gängigen Abtastfrequenzen 96 kHz und 192 kHz sind das 48 kHz und 96 kHz. Die realen Übertragungseigenschaften hängen von den Filtern ab, die im jeweiligen Audio-Interface verwendet werden um Frequenz-Spiegelungen an der halben Abtastfrequenz zu verhindern. Abb. 15 zeigt exemplarisch die Amplituden-Frequenzgänge zweier Audio-Interfaces. Das im Projekt eingesetzte RME-Interface ist für Messungen bis etwa 90 kHz geeignet. Einige andere Interfaces eignen sich nur für Messungen unterhalb etwa 45 kHz, da die Filter bei Abtastung mit 192 kHz einen für Messungen ungünstigen Verlauf zeigen.

Bei Leistungs-Verstärkern zum Ansteuern der Lautsprecher muß ebenfalls auf hinreichende Übertragungs-Bandbreite geachtet werden. Viele digitale 'Class-D' Verstärker sind unter diesem Aspekt eher nicht geeignet, da diese in der Regel das Ausgangssignal filtern um das Abstrahlen hochfrequenter Anteile der internen Digital-Signale zu verhindern. Diverse, auch ältere, analoge Verstärker aus dem 'HiFi'-Sektor weisen dagegen eine weit über den Hörbereich hinausgehende Bandbreite auf. Allerdings können viele dieser Verstärker auch eine sehr hohe Leistung abgeben, so daß wenig belastbare Lautsprecher vor Zerstörung geschützt werden müssen.

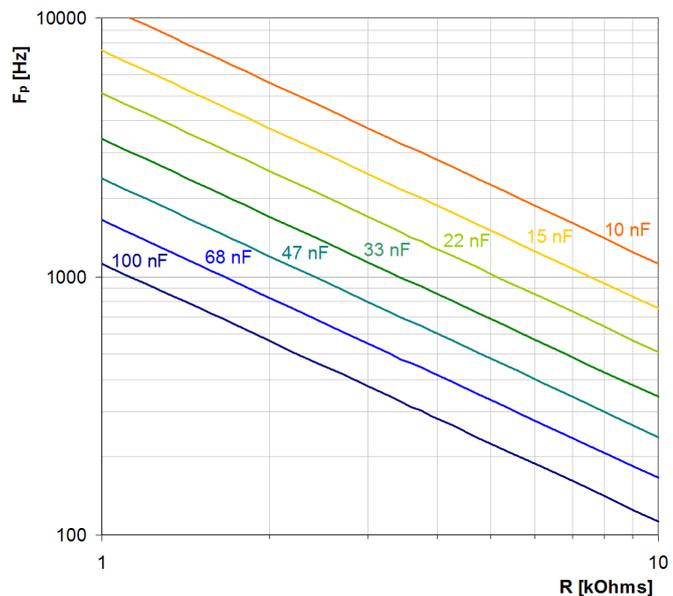
Falls separate Lautsprecher für hohe und für tiefe Frequenzen benötigt werden um den gesamten Meß-Frequenzbereich abzudecken, ist eine Frequenzweiche notwendig, damit jedem der beiden Lautsprecher nur der zugehörige Frequenzbereich zugeführt wird. Frequenzweichen lassen sich auf verschiedene Weise realisieren: passiv zwischen Verstärker und Lautsprechern, aktiv-analog vor separaten Verstärkern für jeden Lautsprecher oder im digitalen Signalweg. Besonders einfach läßt sich die aktiv-analoge Variante mit Linkwitz-Riley-Filtern 4. Ordnung realisieren, da diese nur auf einem Kondensator-Wert und einem Widerstands-Wert beruhen. Abb. 16 zeigt die Schaltung und mit dem Diagramm in Abb. 17 können die Filter dimensioniert werden.



Grafik D. Hennings

Abb. 16 Die Schaltung einer Frequenzweiche mit Linkwitz-Riley-Filtern 4. Ordnung

Abb. 17 Diagramm zur Dimensionierung der Linkwitz-Riley-Filter



Grafik D. Hennings

2.2.4. Temperatur- und Feuchte-Messung

Wegen des Einflusses von Temperatur und Feuchte auf die akustischen Raum-Eigenschaften sollen bei jeder raumakustischen Messung auch diese beiden Größen dokumentiert werden. Die Frequenz-abhängig stark zunehmende Schallabsorption durch Luft begrenzt bereits im hohen Hörbereich die Nachhallzeiten sehr großer halliger Räume (z.B. Kathedralen) auf wenige Sekunden. Bei Messungen im Modell muß im Ultraschall-Bereich auch bei kleineren Räumen die Absorption durch Luft berücksichtigt und werden.

Mit der Wahl der Temperatur- und Feuchte-Sensoren wird zum Einen die mögliche Genauigkeit beeinflusst. Zudem muß, abhängig vom Sensor-Typ, unterschiedlicher Aufwand betrieben werden.

- Eine recht genaue Messung von Temperatur und Feuchte ist mit einem Aspirations-Psychrometer möglich, dessen Luftstrom aus dem Modellraum angesaugt wird. Damit läßt sich die Relative Feuchte mit einer Genauigkeit bis etwa 1% bestimmen, was viele andere Feuchte-Sensoren übertrifft. Allerdings ist der Aufwand recht hoch.
- Eine genaue-Temperaturmessung ist mit Platin-Meßwiderständen (Pt100, Pt1000) möglich, die in verschiedenen Genauigkeits-Klassen verfügbar sind. Platin-Meßwiderstände können auch als Sensoren in Psychrometern verwendet werden. In der Genauigkeitsklasse A (DIN EN 60751) beträgt die Toleranz im Zimmertemperatur-Bereich etwa ± 0.2 K.
- Eine praktikable Lösung mit relativ wenig Aufwand sind präzise mit einer elektronischen Schaltung integrierte Sensoren wie der Typ SHT40, der mit Genauigkeiten von ± 0.2 K in der Temperatur und von $\pm 1.8\%$ in der Feuchte spezifiziert ist. Noch genauere Temperatur-Messungen erlaubt der Typ TMP117 mit ± 0.1 K spezifizierter Abweichung. Diese Sensoren können innerhalb des Modellraums montiert werden und über eine I²C-Schnittstelle von einem Computer ausgelesen werden. Bei sehr hoher Genauigkeits-Anforderung sollten auch diese Sensoren von Zeit zu Zeit mit einem Referenz-Sensor verglichen werden.
- Nicht empfehlenswert sind Temperatursensoren, die direkt ein digitalisiertes Meßsignal mit grober Stufung (z.B. 0.5 oder 1 K) liefern. Das gleiche gilt für Feuchte-Sensoren mit einer Stufung gröber als 1%.

Immer wenn die Schallabsorption durch Luft in Modell-Messungen eine merkliche Rolle spielt, ist bei der Maßstabs-Transformation eine Korrektur dieses Effekts angebracht. Bei Nachhall-Messungen kann dies geschehen, indem zuerst die Absorption durch Luft bezogen auf den Zustand vor der Maßstabs-Transformation mit Hilfe der im Modell gemessenen Temperatur und Feuchte-Werte herausgerechnet wird. Anschließend wird dann die Absorption durch Luft bei dem gewünschten Bezugs-Luftzustand (z.B. 20°C, 50% RF) hineingerechnet.

Bei gut kalibrierten Sensoren und sorgfältig durchgeführter Messung können Temperaturen mit Abweichungen um 0.2 K und die relative Feuchte auf 1-2% genau bestimmt werden. Bei wenig Meßaufwand können die Abweichungen ohne weiteres in der Temperatur auf 0.5 bis 1 K und in der Feuchte auf 5 bis 10% steigen.

Die Auswirkung der Temperatur- und Feuchte-Meßfehler läßt sich nicht pauschal angeben, denn die Schallabsorption der Luft hängt in komplexer Weise von der Frequenz, der Temperatur und der Feuchte ab. Eine praktikable Methode die Auswirkung der Meßfehler zu erkunden ist es, bei der Maßstabs-Transformation sowohl die gemessene Temperatur als auch die gemessene Feuchte um die jeweils angenommene Fehlerbreite nach oben und nach unten zu variieren und die Auswirkung der Variation auf die Ergebnisse zu beobachten.

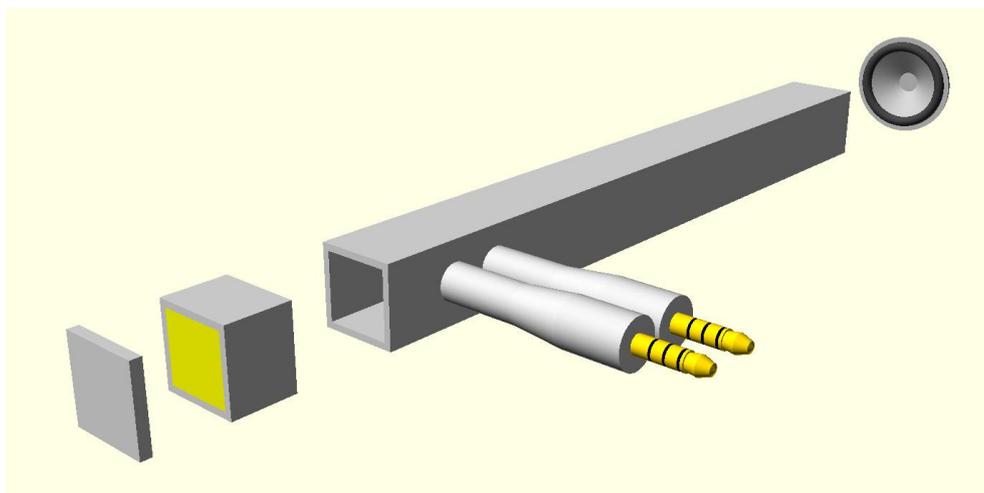
Genauere Meßwerte von Temperatur und Feuchte können nur dann ihren Zweck erfüllen, wenn die an einzelnen Punkten im Raum gemessenen Werte die Verhältnisse im gesamten Raum repräsentieren. Die dazu notwendige Homogenität stellt sich ein, wenn der Raum sich thermisch in einem Gleichgewicht befindet. Deshalb sollen sich so wenig Wärmequellen wie möglich im Raum befinden. Die Verstärker für die Lautsprecher sollten sich außerhalb befinden und falls der Raum eine Innenbeluchtung für eine Kamera besitzt, sollte diese nicht andauernd, sondern nur für kurze Momente eingeschaltet sein. Falls sich nach dem Öffnen und wieder Schließen des Modellraums eine Temperatur-Änderung ergibt, muß vor der nächsten Messung abgewartet werden, bis diese abgeklungen ist.

2.2.5 Messungen an Schallabsorbern

Für eine große Zahl an Schallabsorber-Typen und insbesondere für kommerziell erhältliche Schallabsorber sind Schallabsorptionsgrade in den sechs Standard-Oktavbändern von 125 Hz bis 4 kHz verfügbar, teilweise auch Daten in den entsprechenden Terzbändern von 100 Hz bis 5 kHz. Dagegen stehen Absorptionsdaten oberhalb dieses Frequenzbereichs nur für wenige Absorber-Typen zur Verfügung. Doch solche Daten sind beim Bau skaliertes Modelle für Raumakustik-Messungen von Interesse.

Eine gängige Methode Schallabsorptionsgrade mit relativ geringem Aufwand zu messen, besteht in der Impedanzrohr-Messung. Im Unterschied zur Hallraum-Messung, wo die Schallabsorptionsgrade bei diffusem Schalleinfall gemessen werden, erfolgt die Messung im Impedanzrohr bei senkrechtem Schalleinfall. Das hat zur Folge, daß Meßergebnisse aus beiden Methoden nicht exakt übereinstimmen. Obwohl die Ergebnisse aus Hallraum-Messungen eher der Absorberanwendung in einem Raum entsprechen, sind auch Impedanzrohr-Messungen nützlich, beispielsweise zur schnellen Bestimmung ungefährender Absorber-Eigenschaften oder um die Eigenschaften verschiedener Absorber zu vergleichen.

Impedanzrohre gibt es in verschiedenen Größen, die für verschiedene Frequenzbereiche geeignet sind. Verbreitet sind Impedanzrohre mit oberer Frequenz-Grenze bei 5 bis 6 kHz, die für die sechs Standard-oktaven von 125 Hz bis 4 kHz ausreichen. Für Messungen an Modell-Schallabsorbern sind jedoch auch deutlich höhere Meßfrequenzen wünschenswert. Deshalb wurde ein Impedanzrohr für höhere Frequenzen dimensioniert, als Prototyp aufgebaut und erprobt.



Grafik D. Hennings

Abb. 18 Die funktionalen Impedanzrohr-Komponenten.

In Abb. 18 sind die funktionalen Komponenten des für eine maximale Meßfrequenz von 14 kHz dimensionierten Impedanzrohr-Prototyps dargestellt. Zwecks besserer Erkennbarkeit sind die Komponenten längs der Achse auseinandergezogen und alle Struktur- und Rahmen-Elemente weggelassen. Durch den inneren Querschnitt des Aluminium-Rohres von ca. 12 mm x 12 mm ist die obere Frequenz-Grenze von 14 kHz gegeben. Bei höheren Frequenzen können transversale Moden im Rohr entstehen, die die Messung stören.

Das Meßsignal wird von dem Lautsprecher (rechts oben im Bild) durch zwei (nicht gezeigte) absorbierende Baffeln in das Rohr eingespeist. Die Welle passiert beim Durchlaufen des Rohrs beide Mikrofone, deren Eintrittsöffnungen sich bündig in der Seitenfläche befinden, durchlaufen dann als Meßobjekt den Absorber im Probenträger, werden an der schallharten Endplatte reflektiert und nehmen den gleichen Weg zurück. Durch die Messung mit zwei Mikrofonen an verschiedenen Orten werden hin- und rücklaufende Welle unterscheidbar, so daß der Reflexionsgrad des Absorbers mit dahinter angeordneter Endplatte und damit indirekt auch der Absorptionsgrad bestimmt werden kann. Die Messung und Auswertung erfolgte in der Erprobung mit der hauseigenen Software des Akustikbüros Krämer und Stegmaier und mit weißem Rauschen als Meßsignal. Als Mikrofone dienten zwei Miniatur-Meßmikrofone vom Typ MicW i436. Als Schallquellen wurden Miniatur-Lautsprecher der Typen Visaton K 16 und Visaton K 23 SQ eingesetzt.

Mit dem Impedanzrohr-Prototyp wurden exemplarische Messungen an einer Reihe verschiedener für Modelle geeigneter Schallabsorber durchgeführt. Im Folgenden sind einige Ergebnisse dieser Messungen dargestellt. Da sich diese Messungen nicht auf einen bestimmten Modell-Maßstab beziehen, sind auch die Ergebnisse nicht Maßstabs-transformiert.

Abb. 19 Gemessene Schallabsorptionsgrade eines porösen Absorbers ohne und mit gelochten Abdeckplatten mit zwei unterschiedlichen Lochanteilen.

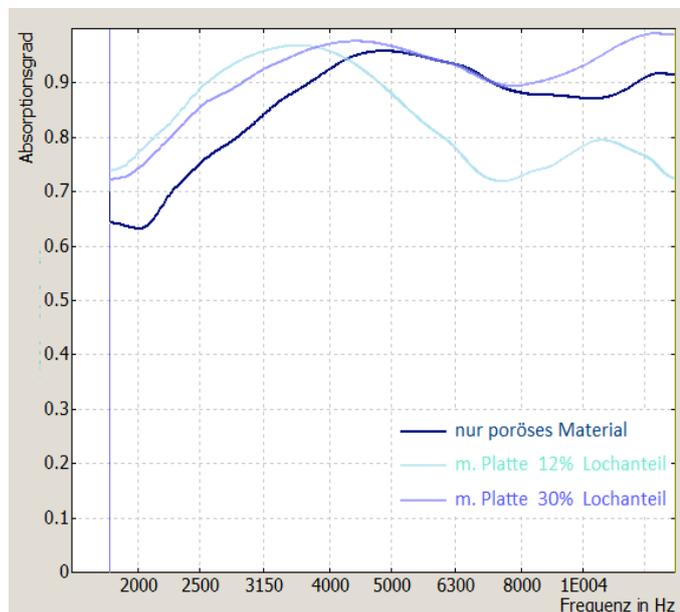


Abb. 19 zeigt als Beispiel gemessene Schallabsorptionsgrade eines 12 mm starken porösen Absorbers aus recycelten PET-Fasern (Hersteller Späh). Die dunkelblaue Kurve bezieht sich auf die Absorberplatte ohne Abdeckung, die mittelblaue Kurve auf die Absorberplatte mit einer Deckplatte mit 30% Lochanteil und die hellblaue Kurve auf die Absorberplatte mit einer Deckplatte mit 12% Lochanteil. Die Deckplatte mit 30% Lochanteil bewirkt im betrachteten Frequenzbereich insgesamt eine Verbesserung der Absorption, während die Deckplatte mit 12% Lochanteil eine schwach ausgeprägte Resonanz zeigt.

Diese ersten Meßergebnisse erscheinen plausibel, jedoch fehlte eine Vergleichs-Möglichkeit um Aussagen über die Genauigkeit zu machen. Auch konnten Artefakte, die eventuell durch mehrfaches Hin- und Her-Reflektieren im Rohr oder durch andere parasitäre Effekte entstehen, noch nicht ausgeschlossen werden. Vor einem verlässlichen Einsatz dieses verkleinerten Impedanzrohres sind daher weitere Untersuchungen angebracht.

Der Schwerpunkt dieser Experimente lag auf einer Erweiterung des Meßbereichs nach oben und der Prototyp markiert ungefähr die Obergrenze des mit Standard-Komponenten Realisierbaren. Wird beispielsweise der Rohr-Querschnitt weiter auf 8 mm x 8 mm verkleinert, dann steigt dessen obere Frequenzgrenze auf etwas über 20 kHz. Der dann erforderliche Abstand zwischen den Mikrofon-Achsen von unter 8 mm ist jedoch mit den verwendeten, bereits sehr kleinen Meß-Mikrofonen wegen des Schaft-Durchmessers nicht möglich. Die untere Grenze des Meßbereichs des Impedanzrohres ist unscharf und u.a. dadurch bedingt, daß die Messungen bei kleinem Mikrofon-Abstand und langer Wellenlänge ungenau werden können. Bei diesen Messungen war die untere Meßgrenze auf 1.8 kHz gesetzt. Eine Erweiterung zu tieferen Frequenzen ist möglich mit Hilfe zusätzlicher Mikrofon-Positionen am Rohr. An dem Prototyp ist diese Option zur Zeit nicht implementiert.

2.3. Die AcouScale-Software

2.3.1. Aufbau und Funktionen der AcouScale-Software

Die AcouScale-Software ist eine Weiterentwicklung von AcouCheck 2 und übernimmt deren Funktionen für die Auswertung und Bewertung der Meß-Signale sowie die Berechnung von Varianten mit zusätzlichen Absorbern. Durch zusätzlich implementierte Algorithmen sind mit der AcouScale-Software auch Messungen in skalierten Modellen möglich. Ein zentraler Teil sind Transformations-Algorithmen, die im Modell-Maßstab gemessene Impulsantworten in die entsprechenden Impulsantworten im Maßstab 1:1 umsetzen. Dieses Verfahren hat zwei Vorzüge: Erstens kann die Auswertung mit den vorhandenen und erprobten Algorithmen von AcouCheck 2 erfolgen und zweitens erfolgt die Ausgabe und Darstellung der Ergebnisse ebenfalls im Maßstab 1:1, was die Interpretation erheblich erleichtert.

Mit der Maßstabs-Transformation wird auch die über-proportional mit der Frequenz ansteigende Schallabsorption durch die Luft transformiert, was zu fehlerbehafteten Ergebnissen führt. Dies wird korrigiert durch Algorithmen, mit denen der Einfluß der bei hohen Frequenzen sehr stark zunehmenden Schallabsorption der Luft aus den Ergebnissen herausgerechnet wird.

Anders als bei AcouCheck 2, wo Messung und Auswertung mit derselben Sample-Frequenz von 44.1 kHz erfolgen, nutzt die AcouScale-Software bei Modell-Messungen zwei separate Sample-Frequenzen für die Messung, wo eine vom Maßstab abhängige hohe Signal-Bandbreite erforderlich ist, und für die Auswertung, wo unnötig hohe Datenmengen vermieden werden sollen.

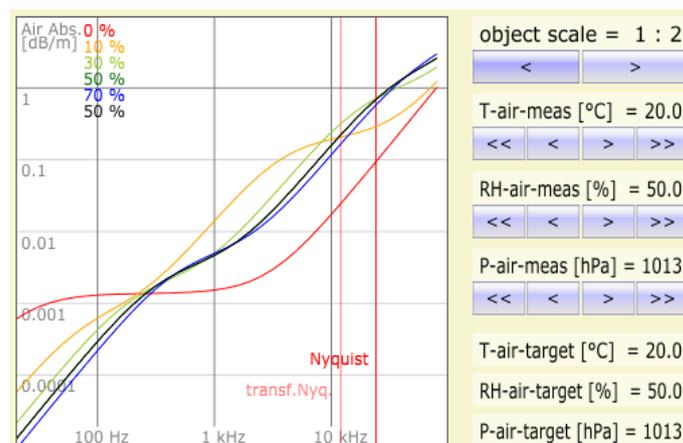


Abb 20 Auf der Oberflächen-Seite 1 der AcouScale-Software können die für eine Messung im skalierten Modell erforderlichen Parameter eingestellt werden. Die Kurven in der Grafik stellen die Schallabsorption der Luft spektral dar.

Als weitere Neuerung gegenüber AcouCheck 2 ist in der AcouScale-Software auch die Verwendung von Audio-Interfaces mit ASIO-Treiber möglich, was unter Anderem das Einstellen der Sample-Frequenzen zuverlässiger macht.

2.3.2 Algorithmen für Modell-Messungen

Modellmessungen werden gemacht, weil im Modell grundsätzlich die gleichen akustischen Vorgänge ablaufen wie im originalen Vorbild und das Modell deshalb ein gutes Abbild ergibt. Daher können im Modell auch die gleichen Algorithmen für die Auswertung der Messungen verwendet werden. Damit erhält man Werte akustischer Meßgrößen für das Modell, obwohl in der Regel auf das originale Vorbild bezogene Meßwerte erwünscht sind. Um auf den Maßstab 1:1 bezogene Meßwerte zu erhalten, ist eine Maßstabs-Transformation integriert.

Eine weitere Besonderheit bei Messungen in skalierten Modellen ergibt sich aus der bei hohen Frequenzen stark zunehmenden Schallabsorption der Luft. Diese muß bei der Transformation der Meßwerte in den Maßstab 1:1 korrigiert werden. Die Algorithmen sind im Folgenden beschrieben.

Maßstabs-Transformation

Die Maßstabs-Transformation erfolgt, indem jede gemessene Raum-Impulsantwort vor der Auswertung in eine äquivalente Impulsantwort für den Maßstab 1:1 transformiert wird. Dies wird verbunden mit einer Umsetzung auf die Sample-Frequenz 44.1 kHz. Nach diesem Prozeß kann die Auswertung wie bei Messungen aus eine 1:1 Raum erfolgen. Die gesamte Transformation besteht aus folgenden zwei kombinierten Prozessen:

- Die eigentliche Maßstabs-Transformation der gemessenen Impulsantwort besteht in einer Streckung der Zeit um den Maßstabsfaktor m (bei einem Maßstab 1: m). Praktisch kann dies erfolgen, indem die Audiodaten unverändert bleiben und mit einer geänderten Sample-Frequenz SR_{trans} (SR von engl. 'sample rate') interpretiert werden, die sich aus der Sample-Frequenz der Messung SR_{mess} und dem Maßstabsfaktor m ergibt:

$$SR_{\text{trans}} = SR_{\text{mess}} / m \quad \text{Gl. 1}$$

Dabei entstehen oft ungewöhnliche Sample-Frequenzen, wie beispielsweise $SR_{\text{trans}} = 38.4$ kHz beim Maßstab 1:5 und $SR_{\text{mess}} = 192$ kHz.

- Im Zweiten Schritt erfolgt ein Re-Sampling des Meß-Signals hin zur Auswerte-Sample-Frequenz SR_{calc} (z.B. 44.1 kHz). Damit verbunden ist eine Tiefpass-Filterung um Artefakte des Re-Sampling zu verhindern. Der gesamte zweite Schritt ist in die bewährte und erprobte Software-Bibliothek 'LibSampleRate' ausgelagert. Nach erfolgter Maßstabs-Transformation können die Impulsantworten mit den Algorithmen für die '1:1-Welt' ausgewertet werden.

Allerdings muß beachtet werden, daß, vom Maßstab und von SR_{mess} abhängig, der mögliche Meß-Frequenzbereich beschnitten sein kann. In Abb. 21 ist dies anhand der verschobenen Oktavbänder und der Nyquist-Grenzen dargestellt. Beim Maßstab 1:8 und einer Sample-Frequenz von 96 kHz kann beispielsweise die 8 kHz-Oktave nicht ausgewertet werden, da die verschobene Oktave (64 kHz) größtenteils oberhalb der Nyquist-Grenze liegt. Mit einer Sample-Frequenz von 192 kHz ist dies dagegen möglich.

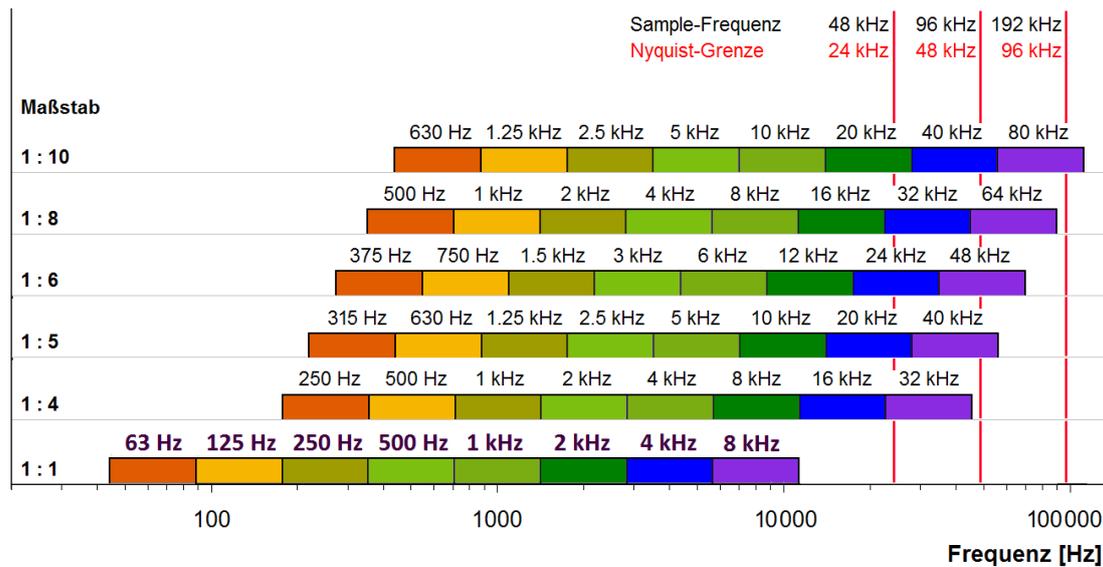


Abb. 21 Die Lage der (verschobenen) Standard-Oktavbänder bei verschiedenen Maßstäben. Zusätzlich sind die Nyquist-Grenzen zu den drei Sampling-Frequenzen 48 kHz, 96 kHz und 192 kHz eingezeichnet. Der tatsächlich nutzbare Übertragungsbereich reicht bei steiler Filterung bis etwa 5 .. 10% unterhalb der Nyquist-Grenze.

Korrektur der Schallabsorption durch Luft

Bei der Transformation der im Modell gemessenen Raum-Impulsantworten in den Vorbild-Maßstab 1:1 muß berücksichtigt werden, daß die Schallabsorption durch die Luft bei hohen Frequenzen stark zunimmt. Das kann zur Folge haben, daß eine aus einer Modell-Messung transformierte Raum-Impulsantwort schneller zeitlich abklingt, als es dem Vorbild entspricht. Um diesen Effekt zu korrigieren, müssen die Schallabsorptions-Eigenschaften der Luft bekannt sein.

Die Mehrzahl der Untersuchungen über die Schallabsorption der Luft beziehen sich auf den hörbaren Spektralbereich. Das gilt auch für die Norm ISO 9613 bzw. deren deutsche Fassung DIN EN ISO 9313. Der für AcouScale besonders relevante Bereich des Ultraschalls bis 100 kHz wurde Mitte der 1970er Jahre an der University of Mississippi für die NASA vermessen (NASA CR-2760). Algorithmen auf dieser Datengrundlage werden in AcouScale für die Korrektur der Schallabsorption durch Luft verwendet. Grafik 3.3 zeigt beispielhaft den spektralen Verlauf für drei verschiedene Werte der relativen Feuchte.

Infolge der Schallabsorption der Luft ergeben sich auch maximal mögliche Nachhallzeiten für Innenräume, die nicht von der Raumgröße abhängen, sondern nur von der jeweiligen Luft-Absorptions und damit indirekt von Frequenz, Luft-Feuchte und -Temperatur. Beipielsweise beträgt die Abschwächung des Schalls bei 7.5 kHz, 20°C und 40% relativer Feuchte 0.1 dB pro zurückgelegtem Meter (vgl. Abb 22). Nach 600 m Wegstrecke ist der Schall also um 60 dB abgeschwächt, was der Definition der Nachhallzeit entspricht. Bei 20°C beträgt die Schallgeschwindigkeit 343 m/s und damit ergibt sich eine Nachhallzeit allein aufgrund der Schallabsorption der Luft von 1.75 Sekunden.

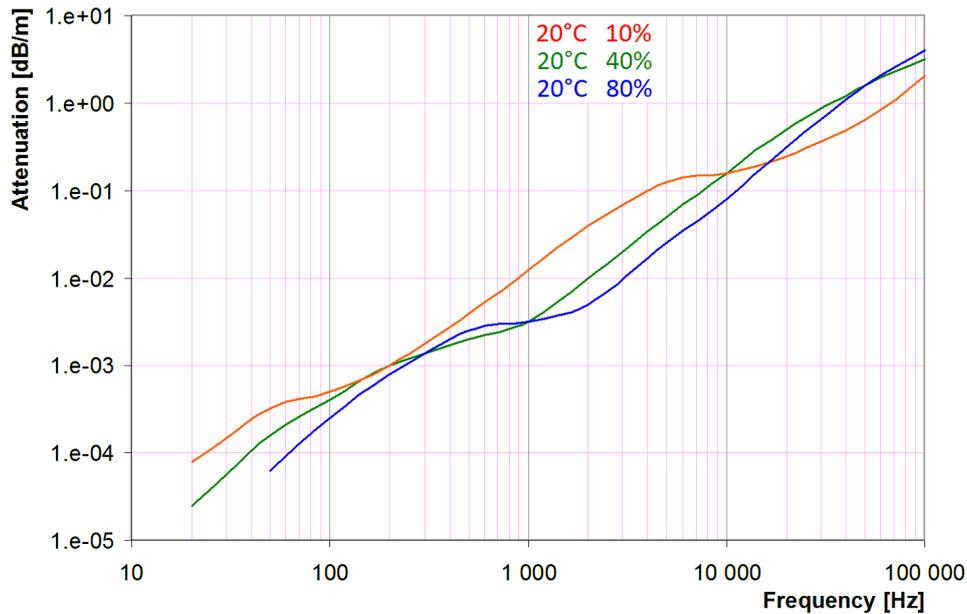


Abb 22 Die Abschwächung des Schalls pro zurückgelegtem Meter infolge der Absorption durch die Luft bei Frequenzen bis 100 kHz. Hier die Abhängigkeit des Kurvenverlaufs von der relativen Feuchte bei 20°C (Berechnet analog NASA CR-2760).

Das gilt auch für sehr große Räume wie beispielsweise den Kölner Dom mit einem Innenvolumen von ca. 220 000 m³, dessen Nachhallzeiten bei tiefen Frequenzen mehr als 10 Sekunden betragen. In einem (fiktiven) Modell des Kölner Doms im Maßstab 1:10 (Innen-Volumen 220 m³) beträgt die Abschwächung durch die Luft bei der transformierten Frequenz 75 kHz und bei gleicher Temperatur und Feuchte 2.5 dB/m, so daß 60 dB Abschwächung bereits nach 24 Metern erreicht werden, woraus sich eine Nachhallzeit von 0.07 Sekunden ergibt. Zurücktransformiert nach 1:1 entspricht das 0.7 Sekunden, einem deutlich niedrigeren Wert als die 1.75 Sekunden im Original.

Mit einem einfachen Korrektur-Ansatz lassen sich die unterschiedlichen Wirkungen der Schallabsorption der Luft im Modell und im Original kompensieren. Mit der Sabine'schen Formel läßt sich der durch Luft-Absorption bedingten maximalen Nachhallzeit T_{air} einer fiktiven Schallabsorptionsfläche A_{air} zuordnen, die zusätzlich vom Raumvolumen abhängt:

$$T_{\text{air}} = 0.163 * V / A_{\text{air}} \quad \text{Gl. 2}$$

umgeformt:

$$A_{\text{air}} = 0.163 * V / T_{\text{air}} \quad \text{Gl. 3}$$

In einem Raum mit gesamter äquivalenter Schallabsorptionsfläche der Oberflächen im Raum von A_{surf} ergibt sich die Nachhallzeit dann aus:

$$T_{\text{room}} = 0.163 * V / (A_{\text{surf}} + A_{\text{air}}) \quad \text{Gl. 4}$$

Mit der fiktiven Nachhallzeit ohne absorbierende Luft:

$$T_{\text{surf}} = 0.163 * V / A_{\text{surf}} \quad \text{Gl. 5}$$

läßt sich die Nachhallzeit aus zwei Anteilen zusammensetzen:

$$\frac{1}{T_{\text{room}}} = \frac{1}{T_{\text{surf}}} + \frac{1}{T_{\text{air}}} \quad \text{Gl. 6}$$

Wenn nun in einem Modell-Raum eine Nachhallzeit gemessen wird:

$$T_{\text{room,M}} = T_{\text{meas,M}} \quad \text{Gl. 7}$$

und die maximal mögliche Nachhallzeit $T_{\text{air,M}}$ für die Feuchte- und Temperatur-Werte im Modell bestimmt wird, kann mit Gl. 6 die Nachhallzeit ohne Einfluß der absorbierenden Luft errechnet werden:

$$T_{\text{surf,M}} = 1 / (1/T_{\text{meas,M}} - 1/T_{\text{air,M}}) \quad \text{Gl. 8}$$

Nun kann $T_{\text{surf,M}}$ durch Multiplikation mit dem Maßstabs-Faktor in den entsprechenden Wert $T_{\text{surf,O}}$ im Original-Maßstab 1:1 transformiert werden. Mit den den Feuchte- und Temperatur-Werten für das Original, die von denen im Modell abweichen können, wird nun $T_{\text{air,O}}$ bestimmt. Aufgrund der Modell-Messung ergibt sich nun mit Gl. 6 für den Original-Raum eine korrigierte Nachhallzeit

$$T_{\text{room,O}} = 1 / (1/T_{\text{surf,O}} + 1/T_{\text{air,O}}) \quad \text{Gl. 9}$$

Der hier beschriebene Korrektur-Algorithmus ist in der Auswertung in der AcouScale-Software zuschaltbar, so daß keine manuelle Korrektur der Ergebnisse vorgenommen werden muß. Abb. 23 zeigt ein Beispiel gemessener Werte mit und ohne Korrektur.

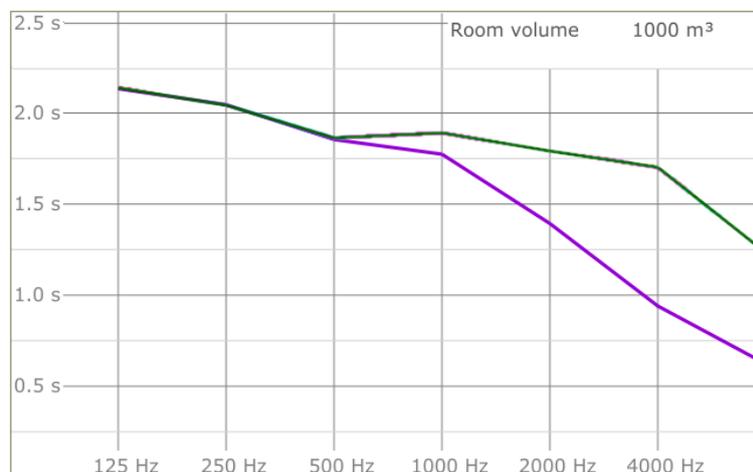


Abb. 23. Ein Beispiel für gemessene Nachhallzeiten eines Raums ohne (violette Kurve) und mit 'Luft-Absorptions-Korrektur' (grüne Kurve), die hier bei hohen Frequenzen etwa die Hälfte der resultierenden Werte ausmacht..

Wie in Abb. 23 zu erkennen ist, kann die Korrektur einen großen Teil des resultierenden Werts ausmachen. Das zeigt auch, daß Ungenauigkeiten in der Korrektur sich in den Resultaten fortpflanzen. Angesichts des komplexen Verlaufs der Absorptionskurven, wie in Abb. 22 exemplarisch zu sehen, ist eine allgemeingültige Fehlerabschätzung kaum möglich.

Statt dessen können in der AcouScale-Software die Eingangs-Parameter der Korrektur, Temperatur und Feuchte in kleinen Intervallen variiert werden, um die Auswirkungen fehlerhafter Temperatur- und Feuchte-Messungen auf die Ergebnisse im Einzelfall erkennbar zu machen. Die Empfindlichkeit der Korrektur für abweichende Temperatur- und Feuchte-Werten ist in Abb. 24 dargestellt. In die Abschätzung des Fehlers der Korrektur geht zusätzlich die Genauigkeit der Temperatur- und Feuchte-Messungen ein.

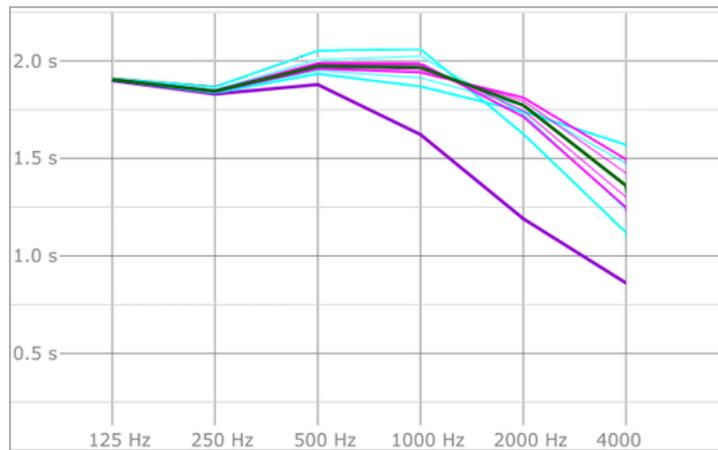


Abb. 24 Die Auswirkungen fehlerhafter Temperatur- und Feuchte-Messungen auf die 'Luft-Absorptions-Korrektur'. Die hell-violetten Kurven zeigen die Wirkung von Temperatur-Fehlern von ± 1 K und ± 2 K, die hellblauen Kurven die Wirkung von Feuchte-Fehlern von $\pm 5\%$ und $\pm 10\%$.

2.3.3 Installation und Benutzung der AcouScale Software

Systemvoraussetzungen und Installation

Die AcouScale-Software ist als Weiterentwicklung von AcouCheck 2 zugleich die dritte AcouCheck-Version. 'AcouCheck 3 - AcouScale' ist eine 32-bit-Software und ist geeignet für Windows ab Version 7. AcouCheck 3 ist wie die Vorgänger-Versionen ein portables Programm, das keine Installation benötigt, sondern einfach an einen Ort der eigenen Wahl auf einem Speichermedium kopiert werden kann, wie beispielsweise 'C:\Programme(86)\AKU\' oder 'D:\Messungen\Akustik\''. Die herunterladbare Datei 'AcouCheck3.zip' enthält alle benötigten Komponenten in einem Verzeichnisbaum, der als Ganzes an den gewählten Speicherort des Programms kopiert werden muß (Abb. 25).

Anschließend kann die Datei 'AcouCheck3.exe' gestartet werden. Wenn beim Programmstart eine Verbindung mit dem Internet besteht, wird die Schallabsorber-Datenbank aktualisiert, was bis zu einer Minute beanspruchen kann. Anderenfalls geschieht die Aktualisierung bei einer späteren Gelegenheit mit Verbindung zum Internet. Dabei heruntergeladene zusätzliche Absorberdaten werden im Unterverzeichnis 'absdata' abgelegt und sollten auf keinen Fall verändert werden. Bei der ersten Messung mit AcouCheck 3 wird ein Unterverzeichnis 'imp' angelegt und in diesem wiederum für jede Meßreihe ein Unterverzeichnis mit dem Startzeitpunkt im Format 'YYYYMMDD_hhmm' als Namen, zum Beispiel '20221004_1545' bei einer am 4.10.2022 um 15:45 Uhr gestarteten Meßreihe. In diesem Verzeichnis werden die Raumimpulsantworten der Meßreihe im verlustfrei komprimierenden Format 'FLAC' gespeichert.

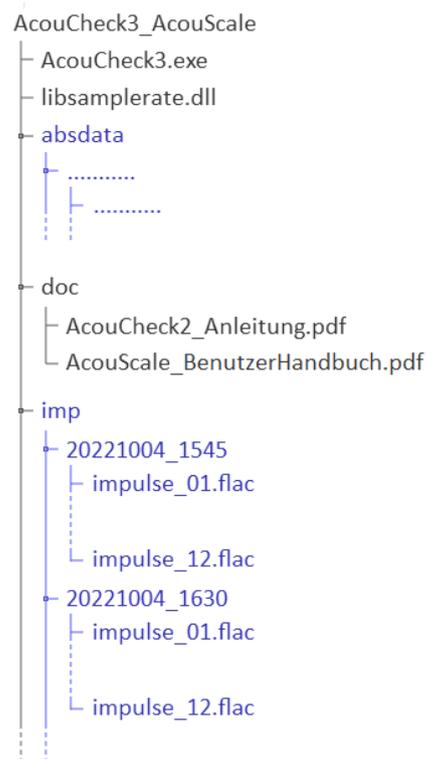


Abb. 25. Der Verzeichnisbaum der Software. Die Unterverzeichnisse in blauer Schrift werden erst beim Programmbetrieb hinzugefügt.

Die Benutzeroberfläche der AcouCheck 3 - AcouScale Software

Es folgt eine kompakte Übersicht über die Benutzeroberfläche der AcouScale-Software. Für Einsteiger, denen die Grundfunktionen der Software noch nicht vertraut sind, ist als Ergänzung die weiterhin gültige Benutzer-Anleitung zur AcouCheck 2 Software geeignet.

Vorbereiten

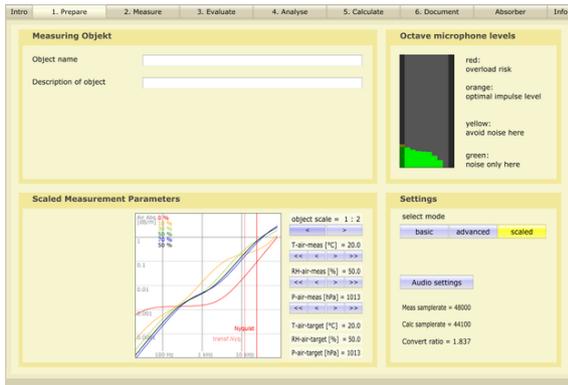


Abb. 26.

Auf der Programm-Seite 'Vorbereiten' können Einstellungen vorgenommen werden:

- Info zum Meßobjekt
- Programm-Modus wählen
- Audio-Einstellungen
- Maßstab eines Modell-Raums
- Temperatur und Feuchte im Meßobjekt

Auswerten



Abb. 28.

Die Programm-Seite 'Auswerten' dient der Qualitäts-Beurteilung der Meßergebnisse:

- Darstellung Echogramme in Oktavbändern
- Darstellung Echogramm eines Oktavbandes
- Darstellung des Rückwärts-Integrals

Messen

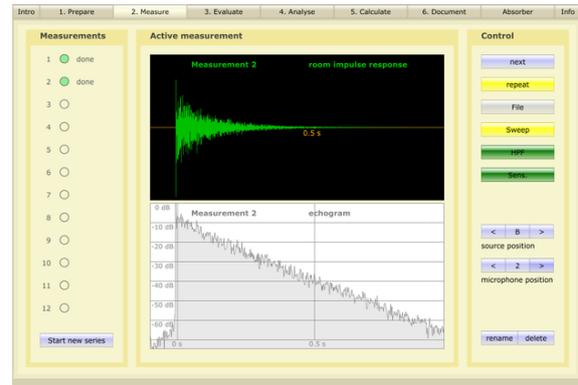


Abb. 27.

Die Programm-Seite 'Messen'. Diese Seite enthält die folgenden Funktionen:

- Quellen- und Mikrofon-Positionen eingeben
- Meß-Sweep starten
- Messung wiederholen
- Raumimpulsantwort aus Datei laden
- Hochpaßfilter einschalten
- Triggerschwelle senken (Impuls-Anregung)

Bewerten

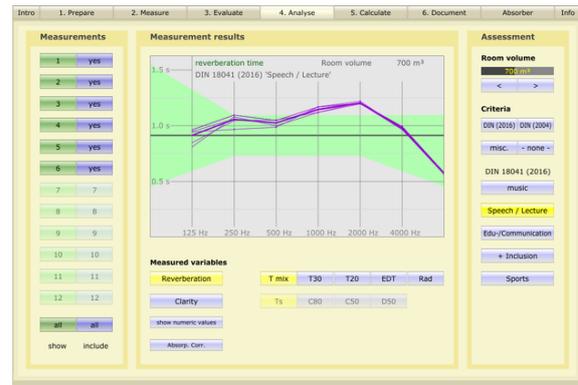


Abb. 29.

Auf der Programm-Seite 'Bewerten' werden die Meßergebnisse dargestellt und können bewertet werden:

- Darstellung einzelne / mehrere Messungen
- Darstellung Nachhallzeiten / Qualitätsmaße
- Nachhallzeit-Bewertung nach DIN 18041

Berechnen

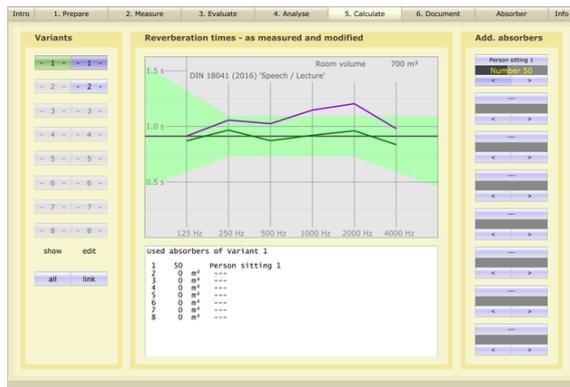


Abb. 30.

Ausgehend von den Meßergebnissen kann auf der Programm-Seite 'Berechnen' die Wirkung zusätzlicher Schallabsorber prognostiziert werden. Dazu dienen die Funktionen:

- Schallabsorber auswählen
- Fläche bzw Zahl der Objekte wählen
- Varianten-Rechnung

Schallabsorber-Datenbank



Abb. 31.

In der auf dieser Seite zugänglichen Schallabsorber-Datenbank werden für die Berechnungen Schallabsorber in verschiedenen Kategorien bereitgestellt.

2.3.4 Alternative Meßsoftware

Die in AcouScale beschriebenen Techniken und Methoden für die Modell-Meßtechnik sind nicht zwingend gebunden an die AcouScale-Software. Allerdings bietet alternative Meß-Software nicht unbedingt eine vergleichbar komfortable Handhabung wie beispielsweise die integrierte Maßstabs-Transformation.

Ein triftiger Grund für den Einsatz alternativer Software kann sein, daß Meß-Parameter benötigt werden, die in der AcouScale-Software nicht zur Verfügung stehen. Das Einbinden alternativer Software kann auf zwei unterschiedlichen Wegen geschehen:

- Die Raum-Impulsantworten werden wie beschrieben mit der AcouScale-Software gemessen. Die dabei im Unterverzeichnis 'imp/YYYYMMDD_hhmm' der AcouScale-Software automatisch abgelegten Impuls-Dateien werden anschließend an eine andere Software für die weitere Auswertung übergeben. Die im verlustfrei komprimierenden Format 'FLAC' gespeicherten Dateien müssen ggf. in ein anderes Format wie 'WAV' konvertiert werden.
- Der gesamte Meßprozess erfolgt mit einer alternative Meß-Software. In diesem Fall stehen alle Funktionen der gewählten alternativen Software zur Verfügung. Eine Maßstabs-Transformation muß ggf. manuell vorgenommen werden.

Kostengünstige Software-Alternativen für Raumakustik-Messungen in skalierten Modellen sind z.B.:

- ARTA von Ivo Mateljan ist mit einer Vielzahl von Meßfunktionen ausgestattet. Da die Software komplex und nicht besonders übersichtlich ist, bedarf es einer Einarbeitung. Mehr Information ist unter 'www.artalabs.hr' zu finden. Dort sind auch Lizenzen für ca. 80 /150 € erhältlich.
- AURORA von Angelo Farina ist eine Sammlung von Meß-Plugins für die Audio-Editor-Software 'CoolEdit' bzw. 'Audition' (nur bis Version 3.0). Für Nutzer, die nicht über die älteren Versionen von 'CoolEdit' / 'Audition' verfügen, empfiehlt sich eine kostenfreie Version von AURORA für die Audio-Editor-Software 'Audacity'. Auch diese Software benötigt etwas Einarbeitung. Weitere Information und der Download sind unter 'www.angelofarina.it' zu finden.

2.4. Modell-Räume

2.4.1. Raumgröße und Maßstab

Größe und Maßstab

Das im Kapitel 2.1.1 abgebildete Modell der Düsseldorfer Tonhalle benötigt eine kleine Industriehalle für die Aufstellung, da es für normale Laborräume zu groß ist. Für Modelle großer Konzertsäle ist dies eher die Regel, denn bei einer weiteren Verkleinerung spielen immer höhere Meß-Frequenzen eine Rolle. Zum Einen wird die Messung damit technisch schwieriger, zum Anderen wird die Schallabsorption durch Luft bei sehr hohen Frequenzen zu einem dominierenden Faktor, der die Meßgenauigkeit reduziert.

Bei kleineren Räumen sind dagegen auch Maßstäbe um 1:5 in Laborräumen realisierbar. Die nachfolgende Tabelle gibt zur Orientierung einige Beispiele für Räume sehr unterschiedlicher Größe.

Tabelle

Beispiele für die Größe fiktiver Modelle verschiedenen Maßstabs (alle Abmessungen sind Innenmaße).

Boston Symphony Hall		Großer Konzertsaal in Quader-Form ('shoebox')		
Maßstab	Länge	Breite	Höhe	
Original	ca. 53 m	ca. 23 m	ca. 19 m	
1 : 12	ca. 4.4 m	ca. 1.9 m	ca. 1.6 m	
1 : 10	ca. 5.3 m	ca. 2.3 m	ca. 1.9 m	
1 : 8	ca. 6.7 m	ca. 2.9 m	ca. 2.4 m	
Berliner Philharmonie		Großer Konzertsaal mit 'Weingarten'-Terrassen		
Maßstab	Länge	Breite	Höhe	
Original	ca. 62 m	ca. 53 m	ca. 22 m	
1 : 12	ca. 5.2 m	ca. 4.4 m	ca. 1.8 m	
1 : 10	ca. 6.2 m	ca. 5.3 m	ca. 2.2 m	
1 : 8	ca. 7.8 m	ca. 6.6 m	ca. 2.8 m	
Pierre Boulez Saal Berlin		Kammermusiksaal mit elliptischer Anordnung des Publikums		
Maßstab	Länge	Breite	Höhe	
Original	ca. 27 m	ca. 24 m	ca. 14 m	
1 : 10	ca. 2.7 m	ca. 2.4 m	ca. 1.4 m	
1 : 8	ca. 3.4 m	ca. 3.0 m	ca. 1.8 m	
1 : 5	ca. 5.4 m	ca. 4.8 m	ca. 2.8 m	

Forts. nächste Seite

Tabelle (Forts.)

Auditorium Maximum der Universität Hamburg		Großer Hörsaal mit ca. 1700 Sitzplätzen	
Maßstab	Länge	Breite	Höhe
Original	ca. 54 m	ca. 50 m	ca. 15 m
1 : 12	ca. 4.5 m	ca. 4.2 m	ca. 1.3 m
1 : 10	ca. 5.4 m	ca. 5.0 m	ca. 1.5 m
1 : 8	ca. 6.8 m	ca. 6.3 m	ca. 1.9 m

Hörsaal		mit ca. 150 Sitzplätzen	
Maßstab	Länge	Breite	Höhe
Original	ca. 14 m	ca. 12 m	ca. 4 m
1 : 10	ca. 1.4 m	ca. 1.2 m	ca. 0.4 m
1 : 8	ca. 1.8 m	ca. 1.5 m	ca. 0.5 m
1 : 5	ca. 2.8 m	ca. 2.4 m	ca. 0.8 m

Unterrichtsraum oder Seminarraum			
Maßstab	Länge	Breite	Höhe
Original	ca. 9 m	ca. 7 m	ca. 3 m
1 : 10	ca. 0.9 m	ca. 0.7 m	ca. 0.3 m
1 : 8	ca. 1.3 m	ca. 0.9 m	ca. 0.4 m
1 : 5	ca. 1.8 m	ca. 1.4 m	ca. 0.6 m

Studio-Regieraum für Audio-Produktionen			
Maßstab	Länge	Breite	Höhe
Original	ca. 6 m	ca. 5 m	ca. 3 m
1 : 10	ca. 0.6 m	ca. 0.5 m	ca. 0.3 m
1 : 8	ca. 0.8 m	ca. 0.6 m	ca. 0.4 m
1 : 5	ca. 1.2 m	ca. 1.0 m	ca. 0.6 m

Konstruktion und Stabilität

Aus den Innen-Abmessungen des Vorbilds und dem Maßstab ergeben sich zunächst Innenabmessungen des Modells. Die umhüllende Konstruktion des Modells ist jedoch in der Regel völlig anders aufgebaut als diejenige des Vorbilds. So muß bei einem Raum innerhalb massiven Mauerwerks, das wenig zum Schwingen neigt, die Umschließung eines Modells schwingungssteif konstruiert werden. Im Folgenden werden Konstruktionsweisen beschrieben, mit denen unerwünschte Schwingungen verhindert werden können und die den Modellen Stabilität verleihen.

2.4.2 Modellraum-Konstruktion

Material

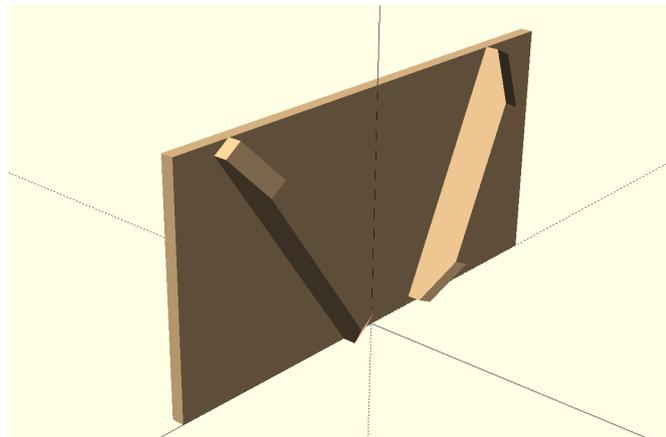
Für den Bau von Modellen kommen neben Holzwerkstoffen auch diverse andere Materialien für den Innenausbau und für den Modellbau in Frage. Dabei zeichnen sich viele Holzwerkstoffe durch Stabilität, aber auch dadurch aus, daß sie sich gut bearbeiten lassen. Wegen ihrer guten Verfügbarkeit, Stabilität und Verarbeitbarkeit beziehen sich die weiteren Betrachtungen vorwiegend auf Konstruktionen aus Holzwerkstoffen.

Struktur und Steifigkeit

Die Stabilität einer räumlichen Struktur kann mit zwei konstruktiven Ansätzen erreicht werden, einem Gerippe oder Gerüst, das beplankt wird oder mit einem selbsttragenden Aufbau. Mit Hybriden aus beiden Ansätzen können die Vorteile beider kombiniert werden, beispielsweise geringes Gewicht und gute Steifigkeit.

Wenn jeweils drei Platten, beispielsweise aus MDF, in rechten Winkeln fest zu einer Raumecke verbunden werden, ergibt sich allein dadurch eine recht gute Steifigkeit, die bei kleineren Modellen für die Formstabilität bereits ausreichen kann. Allerdings ist bei einer solchen selbsttragenden Bauweise jede Platte nur am Rande befestigt und kann im inneren Bereich frei schwingen und es können Eigenschwingungen auftreten. Dies spielt eine umso größere Rolle, je größer die frei schwingungsfähigen Flächensegmente sind. Verringern läßt sich dieser Effekt daher durch unterteilen größerer Flächen in kleinere Segmente. Dies kann durch von außen angebrachte und fest verbundene Versteifungs-Elemente geschehen.

Abb. 32. Beispiel für eine Wandplatte mit zwei unter verschiedenen Winkeln montierten Versteifungen..



Eigenschwingungen in Platten zeigen in der Regel symmetrische Muster bezüglich der Platten-Geometrie. Deshalb lassen sich die Schwingungen eher 'stören' und damit unterbinden, wenn Versteifungen unsymmetrisch und nicht rechtwinklig montiert sind. Ähnliche Methoden werden auch eingesetzt um Schwingungen der Gehäuseflächen bei Lautsprecher-Boxen zu verhindern. Allerdings befinden sich bei Lautsprechern die Versteifungen innen im Gehäuse, wogegen sie bei Modell-Räumen auf der Außenseite angebracht sein müssen.

Verbindungstechnik

Eine stabile Konstruktion setzt auch voraus, daß die einzelnen Teile fest miteinander verbunden sind. Ein feste Verbindung zwischen Platten aus Holzwerkstoffen ist durch Verkleben möglich. Wenn allerdings zwei Platten im rechten Winkel stumpf verklebt werden, besteht die Gefahr, daß bei Belastung die oberste Holzschicht einschließlich der Verklebung abreißt. Belastbarer sind Verbindungen, die in die Tiefe der Bauteile reichen, wie Nut- und Feder- oder Dübel-Verbindungen oder Verzinkungen.

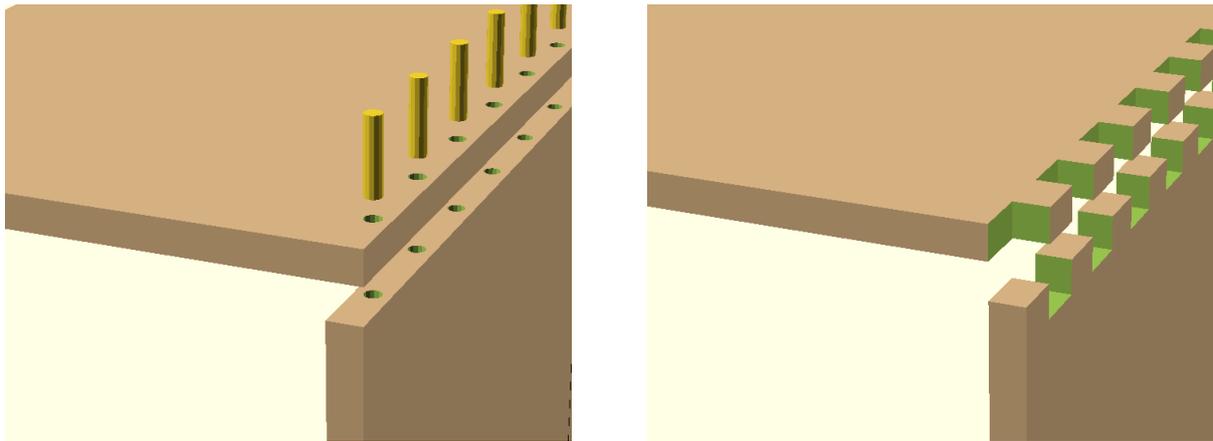


Abb. 33. Zwei Beispiele für die rechtwinklige Verbindung zweier Platten: Eine Verdübelung (links) ist einfach herzustellen. Belastbarer, aber auch aufwendiger in der Herstellung ist eine Verzinkung (rechts).

Ein Nachteil aller Verklebungen ist es, daß sie sich in der Regel nicht mehr lösen lassen ohne die verklebten Teile zu beschädigen. Daher können Verschraubungen von Teilen von Vorteil sein, wenn nachträgliche Veränderungen eines Modells in Betracht kommen oder wenn ein Modell zerlegbar sein soll. Eine Verschraubung zweier Platten im rechten Winkel ähnelt der in Abb. 33 gezeigten Verdübelung, wobei die Bohrlöcher in der oberen Platte dem Gewinde-Durchmesser und in der unteren Platte dem Kern-Durchmesser der verwendeten Holzschrauben entsprechen müssen.

Zugänglichkeit

Das Innere eines Modellraums muß auch nach dem Zusammenbau zugänglich bleiben, um den Meßaufbau einrichten und modifizieren zu können. Bei kleineren Modellen ist es nützlich die Deckenplatte abnehmbar oder aufklappbar zu machen. Bei sehr großen Modellen sind Türen oder Klappen erforderlich, durch die Experimentatoren ins Innere gelangen können.

Transportierbarkeit

Modelle werden nicht unbedingt an dem Ort verwendet an dem sie hergestellt wurden, oder sie sollen an verschiedenen Orten zu Demonstrations- oder Lehrzwecken eingesetzt werden. In diesen Fällen muß ein Modell zusätzliche, beim Transport auftretende Belastungen ohne Schaden überstehen können. Größere Modelle müssen eventuell zerlegbar sein um Türen passieren zu können und in Fahrzeugen oder Aufzügen transportierbar zu sein.

2.4.3 Reflexion, Streuung und Absorption

In Innenräumen trifft der Schall unweigerlich auf Oberflächen. Dabei wird ein kleinerer oder größerer Anteil des Schalls absorbiert. Der Anteil des absorbierten Schalls beschreibt der Absorptionsgrad mit Werten von minimal 0 (keine Absorption) bis maximal 1 (vollständige Absorption).

Der nicht absorbierte Anteil des Schalls wird in den Raum reflektiert. In welcher Weise das geschieht, hängt von der Wellenlänge des Schalls, den Abmessungen der reflektierenden Fläche und der Struktur der reflektierenden Fläche ab.

- Eine ebene Fläche, deren Abmessungen groß gegen die Wellenlänge des Schalls sind, bewirkt eine annähernd spiegelnde Reflexion, ähnlich einen Spiegel, der Licht reflektiert. Bei einer Wand von 4 m x 3 m und der Schallfrequenz 1 kHz, also einer Wellenlänge von 34 cm, ist dies näherungsweise der Fall.
- Wenn die Abmessungen der reflektierenden Fläche und die Wellenlänge in der gleichen Größenordnung sind, wird der Schall bei der Reflexion in verschiedene Richtungen gestreut. Dies geschieht beispielsweise, wenn Schall der Frequenz 1 kHz auf eine Fläche von 40 cm x 30 cm fällt.

Eine Streuung tritt ebenfalls auf, wenn eine Oberfläche Strukturen in der Größenordnung der Wellenlänge aufweist. Wenn an der Beispiel-Wand ein ungleichmäßig gefülltes Bücherregal angebracht ist, wird diese auch bei 1 kHz streuend wirken.

- Strukturen oder Objekte, deren Abmessungen klein gegen die Wellenlänge sind, haben dagegen nur geringe oder keine Wirkung auf den Schall. So bewirkt die Körnung des Putzes an einer Wand auch bei 10 kHz mit ca. 3.4 cm Wellenlänge nur wenig Streuung.

Die absorbierenden, reflektierenden und streuenden Eigenschaften der Oberflächen bewirken zusammen mit der Geometrie eines Raumes dessen akustische Eigenschaften. Daher müssen sie für Messungen in skalierten Modellen hinreichend genau nachgebildet werden.

Reflexion und Streuung spielen besonders bei wenig absorbierenden Oberflächen eine Rolle. Um dies im Modell wiederzugeben, müssen die relevanten geometrischen Strukturen skaliert nachgebildet werden, wobei für die Relevanz die zuvor genannten Kriterien auch im Modell gelten.

Bei absorbierenden Oberflächen spielen neben der Geometrie auch Material-Eigenschaften eine wichtige Rolle. Wie dies im Modell abgebildet werden kann, wird im nachfolgenden Kapitel über Schallabsorber behandelt.

2.4.4 Schallabsorber

Ein Modell-Schallabsorber soll zwei Anforderungen erfüllen:

- Die Abmessungen eines Modell-Schallabsorbers müssen in den Modell-Maßstab skaliert sein, so daß der Absorber geometrisch korrekt ins Modell integriert werden kann.
- Das Absorptions-Spektrum eines Modell-Schallabsorbers soll dem Spektrum des Vorbilds gleichen, jedoch in den Frequenzen um den inversen Skalierungs-Faktor verschoben, wie beispielhaft in Abb. 34 gezeigt.

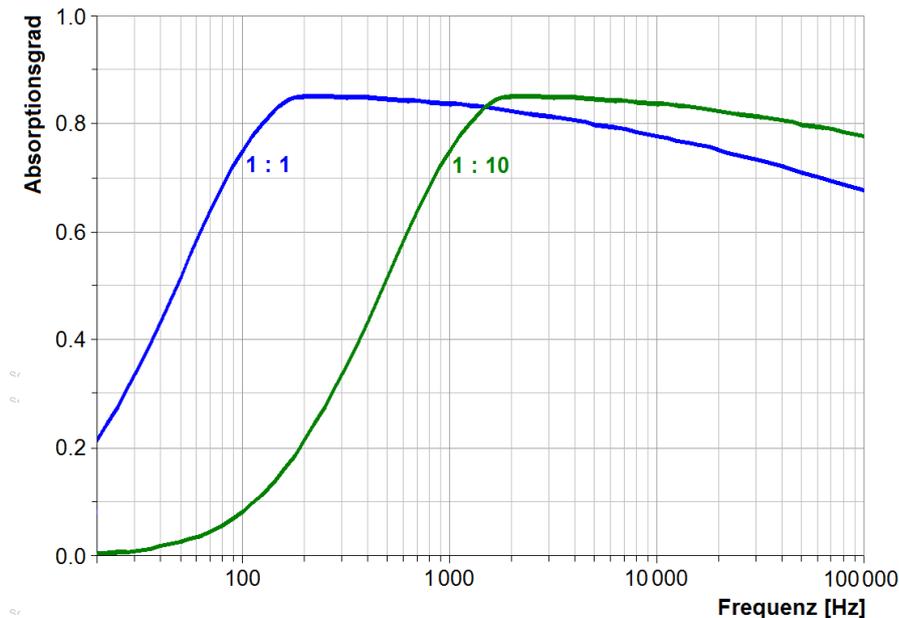


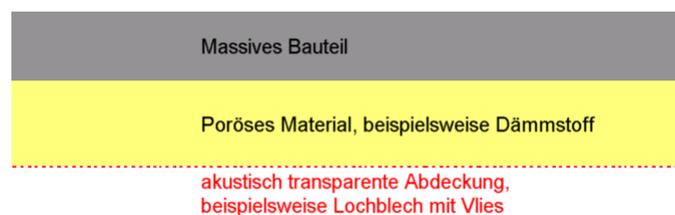
Abb. 34. Ein Beispiel für die spektralen Verläufe der Schallabsorptionsgrade eines Schallabsorbers (1:1) und des entsprechenden, korrekt in den Maßstab 1:10 skalierten Absorbers.

Um die Anforderung des gleichartigen spektralen Verlaufs zu erfüllen, müssen ggf. Material-Eigenschaften gegenüber dem 1:1-Vorbild modifiziert werden. Dies wird in den nachfolgenden Abschnitten für verschiedene Absorbertypen beschrieben.

Die Skalierung poröser Absorber

Poröse Schallabsorber bestehen meist aus einer Schicht porösen Materials vor einer schweren, den Schall reflektierenden Schicht. Das poröse Material kann fasrig sein, wie Mineral- oder Textil-Wolle oder ein offenporiger Schaumstoff oder auch ein körniges poröses Material. Empfindliche poröse Schichten können mit einer akustisch transparenten Abdeckung versehen werden, beispielsweise einem Lochblech mit hohem Lochflächen-Anteil.

Abb. 35. Der Schnitt durch einen porösen Schallabsorber in Schematischer Darstellung



Poröse Schallabsorber wirken als Breitband-Absorber mit einer unteren Frequenz-Grenze, unterhalb derer der Absorptionsgrad abfällt. Die untere Frequenz-Grenze ist umgekehrt proportional der Dicke der porösen Schicht. Die Wirksamkeit eines porösen Schallabsorbers wird vom Strömungswiderstand der porösen Schicht bestimmt.

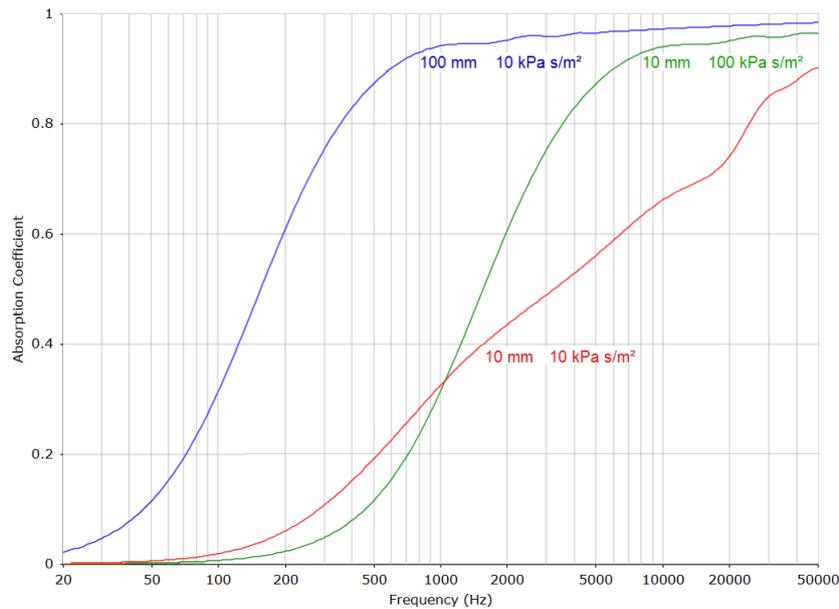


Abb. 36. Der spektrale Verlauf des Absorptionsgrads eines 100 mm starken porösen Absorbers mit längenbezogenem Strömungswiderstand mit 10 kPa s/m^2 im optimalen Bereich (blau). Ein im Maßstab 1:10 mit dem gleichen Material auf 10 mm Stärke skaliertes Absorber zeigt einen ungünstigen spektralen Verlauf des Absorptionsgrades (rot), denn der Strömungswiderstand ist nun weitab des optimalen Bereichs. Bei einem Material mit 10-fach höherem längenbezogenem Strömungswiderstand ist der spektrale Verlauf des Absorptionsgrades wie beim Vorbild, nur in der Frequenz um einen Faktor 10 nach oben verschoben (grün). Damit wird ist Absorber korrekt im Modell nachgebildet.

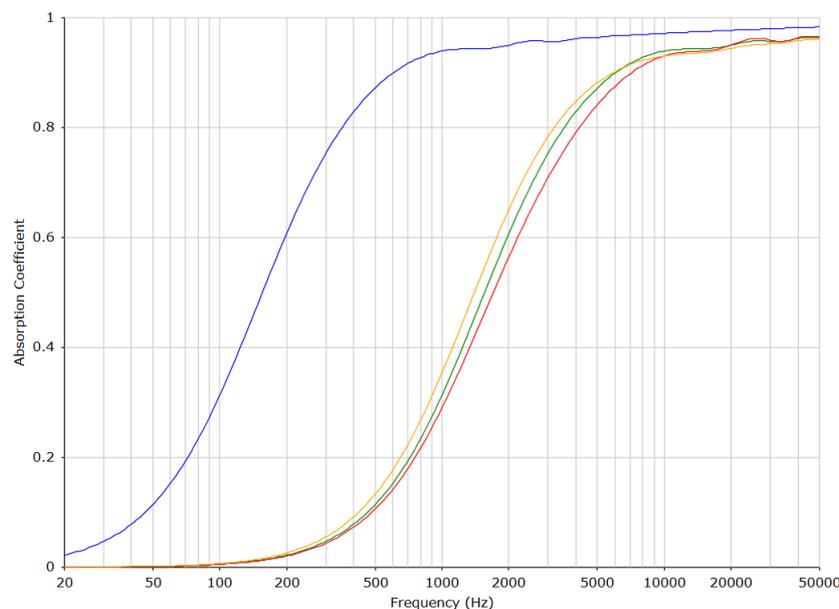


Abb. 37. Wie Abb. 36 - Wenn der Strömungswiderstand des skalierten Absorbers von 70% bis 140% des korrekten Werts variiert wird, ergeben sich nur kleinere Abweichungen.

In der Literatur wird ein optimaler Bereich des Strömungswiderstands der Schicht von etwa 1 kPa s/m bis 2 kPa s/m angegeben. Das bedeutet, je dünner die Schicht ist, umso höher muß der längenspezifische Strömungswiderstand des porösen Materials sein. Wird beispielsweise eine 10 cm dicke poröse Absorberschicht in den Maßstab 1:10 auf 1 cm Dicke skaliert, so muß zugleich ein Material mit um einen Faktor 10 höherem längenspezifischen Strömungswiderstand gewählt werden, wie in Abb. 36 an einem Beispiel gezeigt. Wie in der Grafik ebenfalls zu sehen ist, ergibt sich bei nicht angepaßtem längenspezifischen Strömungswiderstand ein völlig anderer spektraler Verlauf des Absorptionsgrades. Kleine Abweichungen vom idealen Wert sind dagegen unkritisch (Abb. 37).

Die Skalierung von Lochplattenschwingern

Anders als die breitbandig wirkenden beschriebenen porösen Absorber sind Lochplattenschwinger ein resonantes System, das aus einer gelochten oder geschlitzten Platte besteht, die mit einem Abstand (d) vor einem massiven Bauteil montiert ist (siehe Abb. 39). Die schwingende Masse ist die Luft in den Öffnungen und deren direkter Umgebung, die 'Feder' ist die Luft im Hohlraum. Eine Dämpfungsschicht aus porösen Material ist hinter der Lochplatte angeordnet oder füllt den gesamten Hohlraum aus.

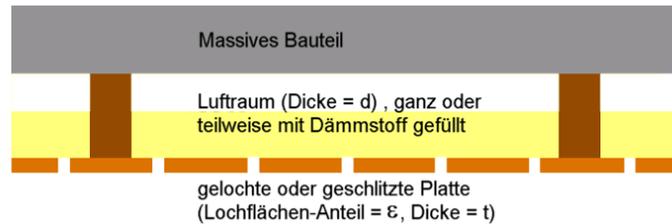


Abb. 38. Der Schnitt durch einen Lochplattenschwinger in schematischer Darstellung

Die Eigenfrequenz wird primär bestimmt durch den Lochflächen-Anteil in der Abdeckplatte und den Wandabstand der Platte. Plattendicke, Größe und Form der Löcher spielen ebenfalls eine Rolle. Ein Lochplattenschwinger wird skaliert, indem alle Abmessungen einschließlich der Plattendicke und Lochgröße im Maßstabsfaktor verkleinert werden. Der Lochflächenanteil bleibt gleich. Ein so bemessener Modell-Absorber zeigt die korrekte, um den inversen Maßstabsfaktor erhöhte Eigenfrequenz. Beim Skalieren der Schichtdicke einer porösen Schicht muß der Stömungswiderstand wie bei porösen Absorbieren angepaßt werden. Abb. 39 zeigt den spektralen Absorptionsverlauf eines Lochplattenschwingers im Maßstab 1:1 und dessen im Maßstab 1:10 skalierte Version mit und ohne Anpassung der Dämpfungsschicht.

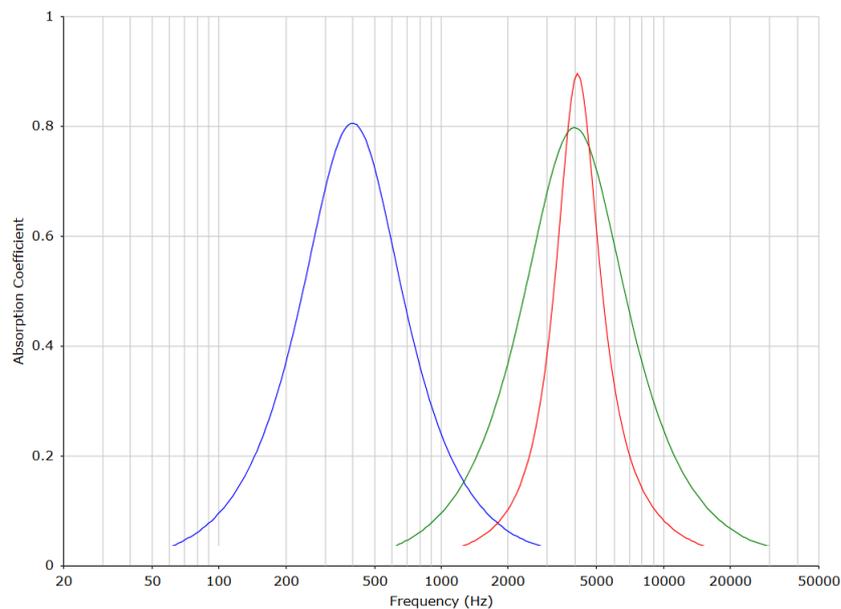


Abb. 39. Die spektrale Absorption eines Lochplattenschwingers im Maßstab 1:1 (blau) und im Maßstab 1:10 skaliert, (grün) mit und (rot) ohne angepaßter Dämpfungsschicht.

Die Skalierung von Plattenschwingern

Plattenschwinger oder auch Membranabsorber bezeichnen ebenfalls resonante Absorber deren Eigenschwingung auf einer geschlossenen Platte oder Membran vor einem bedämpften Hohlraum beruht (Abb. 40). Die Resonanzfrequenz wird von der flächenbezogenen Masse (m') der Platte oder Membran und der Dicke der eingeschlossenen Luftschicht (d) bestimmt und ergibt sich näherungsweise aus

$$f_{\text{res}} \approx 600 \cdot \sqrt{d \cdot m'}$$

Bedingt durch die Masse einer schwingenden Platte oder Membran liegt die Resonanz bei Plattenschwingern meist bei tieferen Frequenzen. Bei steifer Platte kann sich je nach Aufhängung oder Einspannung eine zusätzliche Rückstellkraft bei der Verbiegung ergeben.

Abb. 40. Der Schnitt durch einen Plattenschwinger in schematischer Darstellung



Plattenschwinger lassen sich ebenfalls durch verkleinern der Abmessungen skalieren, wobei insbesondere die flächenbezogene Masse der Platte korrekt skaliert werden muß. Auch hier muß der Stömwiderstand angepaßt werden. Abb. 41 zeigt den spektralen Verlauf der Absorption eines Plattenschwingers im Maßstab 1:1 und dessen im Maßstab 1:10 skalierte Version in Varianten mit und ohne angepaßte Dämpfungsschicht dargestellt.

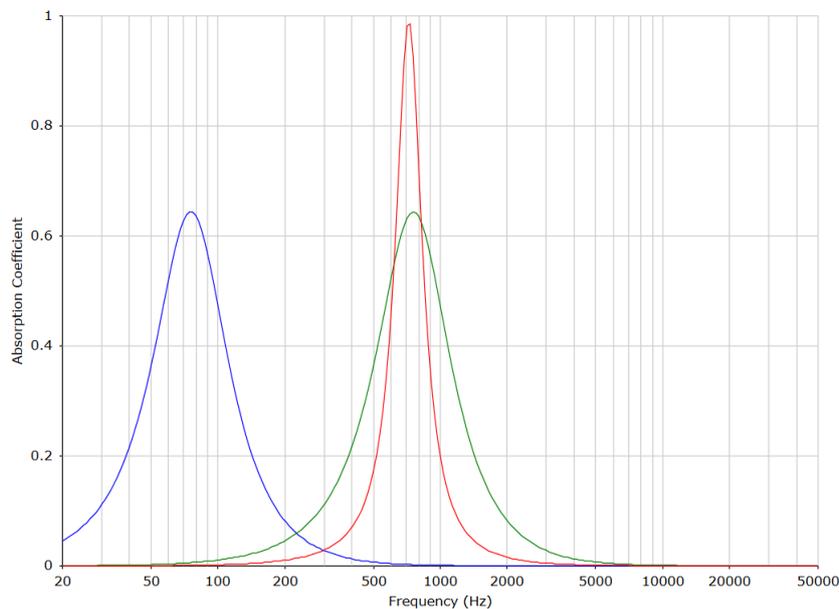


Abb. 41. Der spektrale Absorptions-Verlauf eines Plattenschwingers im Maßstab 1:1 (blau) und im Maßstab 1:10 skaliert, mit angepaßter Dämpfungsschicht (grün) und ohne angepaßte Dämpfungsschicht (rot).

Allgemeines zur Skalierung von Schallabsorbern

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Methoden für die maßstäbliche Skalierung verschiedener Schallabsorber-Typen vorgestellt. Zur Veranschaulichung dienten dabei Grafiken, die mit Absorber-Berechnungsmodellen erzeugte Werte zeigen. Auf diese Weise lassen sich grundlegende Zusammenhänge in einer reinen Form darstellen, die bei realen Absorbern häufig nicht gegeben ist. Dies kann an zusätzlichen, im Modell nicht enthaltenen Effekten liegen, wie beispielsweise der Steifigkeit der Platte bei Plattenschwingern. Aber auch die in einfachen Berechnungen nicht berücksichtigte Einbau-Situation von Absorbern spielt eine Rolle, beispielsweise wegen Rand- und Kanten-Effekten. Deshalb bleibt bei vorherberechneten raumakustischen Eigenschaften immer ein Rest an Unsicherheit und es ist empfehlenswert, das Resultat nach der Realisierung meßtechnisch zu überprüfen. Dies gilt sowohl in der '1:1-Welt' als auch in Modellen, so daß auch die Eigenschaften gut gemachter Modelle nicht unbedingt die Eigenschaften des Vorbilds exakt wiedergeben. Auf der anderen Seite sind skalierte Modelle die einzige Art der Nachbildung, die alle physikalischen Phänomene des Vorbilds ebenfalls enthält.

2.4.5 Möblierung und Personen

In einem leeren Raum kann der Schall sich ungehindert zwischen den Umschließungsflächen ausbreiten, was dazu führen kann, daß der Schall mehrfach zwischen parallelen Flächen hin- und her-reflektiert wird, ohne die Richtung zu ändern. Wenn bei einem quaderförmigen Raum auf einem der drei Paare paralleler Flächen wenig Absorption stattfindet, kann der geringe Austausch zwischen verschiedenen Richtungen dazu führen, daß zwischen dem ungedämpften Flächenpaar hin- und her-reflektierter Schall langsamer abklingt als der übrige Schall im Raum. Ein solches Phänomen war beobachtbar bei einer Probe-Messung in einem noch unmoblierten Unterrichtsraum mit schallharter Decke, schallhartem Boden und Absorbern an den Wänden. In den gemessenen Nachhallzeiten zeigte sich ein ausgeprägtes Maximum bei 500 Hz, das aufgrund der Breitband-Schallabsorber im Raum nicht hätte entstehen sollen und sich bei hoher spektraler Auflösung als ein Linien-Spektrum aus zwischen Boden und Decke resonanten Frequenzen herausstellte (Abb. 42). Nach der Möblierung verschwand dieses Phänomen vollständig. Dieses Beispiel zeigt, daß Möbel die akustischen Eigenschaften eines Raums einschließlich der Nachhallzeiten deutlich verändern können, auch wenn die Möbel kaum Schall absorbieren. Der wesentliche Einflußfaktor der Möbel ist es, daß sie die gradlinige Schallausbreitung stören, den Schall streuen und damit zu einem diffuseren Schallfeld führen.



Foto: H.-M. Schmid

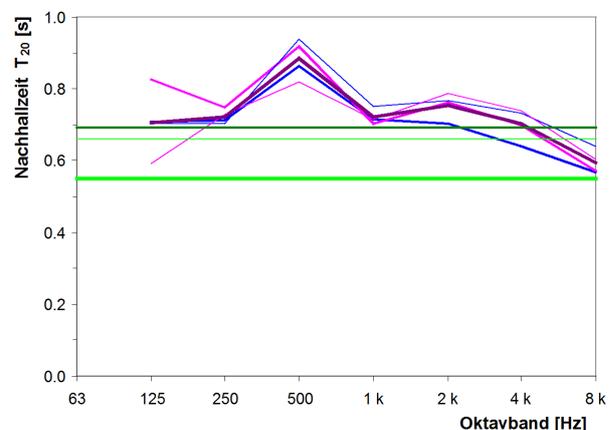


Abb. 42. Probe-Messung im unmoblierten Unterrichtsraum (L) und resultierende Nachhallzeiten mit Maximum bei 500 Hz (R).

Neben der streuenden können Möbel auch eine absorbierende Wirkung haben, besonders bei Polstermöbeln. Wegen deren streuenden und absorbierenden Eigenschaften muß eine realistische Raum-Nachbildung im Modell die Möblierung einschließen.

Welcher Detaillierungsgrad in der Nachbildung der Möbel angemessen ist, hängt von den Zielen der jeweiligen Untersuchung ab.

- Wenn es primär um die Eigenschaften des Raums geht und dieser dazu einer Nutzungsart entsprechend möbliert sein soll, kann eine Möblierung in realistischer Größe und Aufstellung ausreichen, die eine typische streuende und absorbierende Wirkung hat.
- Geht es dagegen um die Wirkung einer bestimmten Möblierung, ist eine detailliertere Nachbildung mit einzelnen reflektierenden und absorbierenden Flächen angemessen.

Die nicht absorbierenden Teile von Möbeln sind meist aus schallhartem Material wie Holz oder Metall gefertigt. Im Modell kann es daher genügen, diese ebenfalls aus schallhartem, aber nicht unbedingt dem gleichen Material maßstäblich nachzubilden. Polster sind oft poröse Absorber und können dann wie zuvor beschrieben nachgebildet werden.

Personen wirken im Raum in ähnlicher Weise als Streukörper und als Absorber wie die Möblierung, wobei die Absorption in vielen Fällen stärker im Vordergrund steht. Im Gegensatz zur Möblierung, die sich auf bestimmte Eigenschaften festlegen läßt, sind die Personen im Raum eine variable Größe. Die Anzahl der Personen im Raum kann variieren, deren Bekleidung und Größe und auch die Positionen im Raum. All diese Variablen können das Schallfeld beeinflussen. In der Regel kommt es daher weniger darauf an, eine bestimmte Personen-Konstellation genau zu modellieren, als vielmehr die Bandbreite der zu erwartenden-Konstellationen nachzubilden. Mit Messungen bei unterschiedlichen Besetzungen und mit verschiedenen Personen-Typen kann der Einfluß der Personen erkundet werden.

Bei der Nachbildung einzelner Personen ist die richtige Größe Voraussetzung für realistische Streueigenschaften. Die Bekleidung als absorbierende Oberfläche kann angenähert werden, indem Textil auf die Oberfläche des Modells aufgebracht wird.



Foto: D. Hennings

Abb. 43. Ein Beispiel für Modell-Schulkinder mit realistischen Eigenschaften, die aus Rundholz und Jeansstoff hergestellt sind. Durch Wahl des Stoffes und den Anteil der damit belegten Oberfläche lassen sich die Eigenschaften variieren.

2.5 Der Ablauf von Modell-Messungen

2.5.1 Voraussetzungen, Ausstattung

Meß-Ziele und Umsetzung

Ausgangspunkt jeder Messung oder Meßreihe sind die Meß-Aufgabe und die Meß-Ziele. Von diesen hängt ab, welche Ausstattung geeignet ist und in welcher Weise Messungen durchgeführt werden können. Dabei kann es verschiedene Ausstattungs-Varianten für die gleiche Meßaufgabe geben. Sollen beispielsweise Messungen in den Oktaven bis 4 kHz (bezogen auf 1:1) erfolgen, kann dies in einem Modell des Maßstabs 1:4 geschehen, wobei es wenig Einschränkungen in der Wahl der Audio-Komponenten gibt, da nur Frequenzen bis ca. 22 kHz übertragen werden müssen. Wird jedoch aus Platz-Gründen ein Maßstab von 1:8 gewählt, müssen die Audio-Komponenten bis 44 kHz übertragen, was die Auswahl einsetzbarer Komponenten reduziert und erhöhten Aufwand bedeutet. Der Zusammenhang zwischen benötigtem Frequenzbereich und geeigneter Ausstattung wird in den nachfolgenden Abschnitten beispielhaft betrachtet.

Im Sinn der einfachen technischen Lösung ist es meist günstig das Modell so groß zu erstellen, wie es die jeweiligen Umstände erlauben. Das reduziert zum Einen die Ansprüche an den zu übertragenden Frequenzbereich der Audio-Komponenten und vergrößert damit die Auswahl der nutzbaren Komponenten. Zum anderen sinkt der Einfluß der Schallabsorption durch die Luft und dadurch verursachter Ungenauigkeiten.

Frequenzbereiche und Ausstattungen:

- Messungen bis ca. 20 kHz

Audio-Geräte mit guter Übertragungsqualität übertragen in der Regel bis mindestens 20 kHz und reichen meist auch darüber hinaus. Bei digitaler Übertragung mit 44.1 kHz muß allerdings direkt oberhalb 20 kHz 'abgeschnitten' werden, bei Übertragung mit 48 kHz spätestens oberhalb 22 kHz. Diese Grenzen bedeuten, daß im Maßstab 1:4 die 4 kHz-Oktave und im Maßstab 1:8 die 2 kHz-Oktave nahezu vollständig übertragen werden. Insgesamt gibt es in diesem Bereich wenig Einschränkungen in der Nutzbarkeit von Audio-Komponenten.

- Messungen bis ca. 30 kHz

Hier ist eine Digitalisierung mit mindestens 88.2 kHz bzw. 96 kHz erforderlich. Da die Nyquist-Grenzen mit 44.1 kHz bzw. 48 kHz weit oberhalb 30 kHz liegen, gibt es hier keine scharfe obere Grenze. Viele analoge Audio-Komponenten übertragen in diesem Bereich, was allerdings nicht immer spezifiziert ist und deshalb ggf. durch Tests erkundet werden kann. In diesem Frequenz-Bereich wird im Maßstab 1:6 die 4 kHz-Oktave noch knapp erfaßt.

- Messungen bis ca. 45 kHz

Hier ist eine Digitalisierung mit mindestens 96 kHz zwingend erforderlich. Die Filterfunktion des Audio-Interfaces muß geprüft werden, soweit nicht spezifiziert (vgl. Kap. 2.4). Es ist angebracht, alle Komponenten auf die benötigte Bandbreite hin zu überprüfen. Das 4 kHz-Oktavband reicht z.B. im Maßstab 1:8 bis 45 kHz.

- Messungen bis ca. 90 kHz

In diesem Bereich sind Audio-Interfaces mit 192 kHz Sample Rate und steiler Filterfunktion wie beispielsweise das RME FireFace UCX erforderlich. Als Schallquellen kommen einige Bändchen-Lautsprecher und die (ausgebauten) Treiber einiger Mangetostaten-Kopfhörer in Frage. Als Meßmikrofon sind nur wenige Typen wie das MTG MK 301E geeignet. Zudem steigt der Einfluß der Schallabsorption der Luft stark an, was hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Feuchte- und Temperatur-Messung bedeutet.

2.5.2 Vorbereiten, Einstellen

In diesem Kapitel wird die Vorbereitung zu einer Meßreihe in Form einer kommentierten Checkliste dargestellt. Diese Liste kann für konkrete Anwendungsfälle nach Bedarf modifiziert, ergänzt oder auch gekürzt werden.

- Den Modellraum aufbauen und vorbereiten wie zuvor beschrieben
- Den Modellraum nach Bedarf möblieren und mit Personen besetzen.
- Schallquellen und Mikrofone im Modellraum positionieren und verkabeln. Es ist vorteilhaft so viele Schallquellen und Mikrofone zu verwenden, daß eine Meßreihe mit einer Raum-Konfiguration ohne Öffnen des Modellraums zwischen den Einzel-Messungen erfolgen kann. Bei der Wahl der Positionen für Schallquellen und Mikrofone kann man sich von typischen Quellen- und Hör Positionen bei der Nutzung des Vorbild-Raums leiten lassen. Die Positionen sollten im Raum verteilt sein. Günstige Abstände zwischen Paaren aus Schallquelle und Mikrofon liegen jeweils im Bereich von etwa $\frac{1}{4}$ bis $\frac{3}{4}$ der Raumdiagonale. Falls besondere Effekte wie Eigenschwingungen, Flatterechos, Fokussierungen, etc. untersucht werden sollen, ist es vorteilhaft Positionen zu wählen, an denen diese Effekte besonders gut erfaßbar sind.
- Temperatur- und Feuchte-Sensoren im Modellraum an einer für das Rauminnere repräsentativen Position anbringen. Bei Räumen mit einfacher Geometrie (z.B. Quader) kann dies der mittlere Bereich sein. Bei Räumen mit komplexer Geometrie wie beispielsweise Unterteilungen können mit mehreren Sensoren in verschiedenen Teilbereichen Unterschiede in Temperatur und Feuchte erkennbar werden. Die Temperatur- und Feuchte-Messungen sollen ohne Öffnen des Modellraums möglich sein.
- Wärmequellen wie Verstärker, Meßelektronik oder Beleuchtung im Modellraum vermeiden und, falls unvermeidlich, deren Einschaltzeiten klein halten.
- Den Modellraum verschließen und sich akklimatisieren lassen, bis an den Temperatur- und Feuchte-Sensoren keine zeitliche Veränderung mehr zu beobachten ist.
- Die AcouScale-Software starten und auf der Seite '1. Vorbereiten' der Programm-Oberfläche den Maßstab des Modells einstellen.
- Auf der Seite '1. Vorbereiten' der AcouScale-Software die Taste 'Audio-Einstellungen' betätigen und in dem sich öffnenden Fenster das Audio-Interface auswählen und dann die gewünschte Sampling-Frequenz einstellen. Mit der Sampling-Frequenz wird zugleich deren halber Wert als oberste Grenzfrequenz für die Messungen.
- Temperatur und Feuchte messen, dokumentieren und auf der Seite '1. Vorbereiten' der AcouScale-Software einstellen. Dort kann auch der aktuelle Luftdruck eingegeben werden, was allerdings in der Regel nicht erforderlich ist.
- Nun kann die Meßreihe beginnen

2.5.3 Meßvorgang

Der Ablauf einer Meßreihe mit der AcouScale-Software

1. Temperatur- und Feuchte-Werte im Modellraum dokumentieren und auf Seite '1. Vorbereiten' der AcouScale-Software einstellen.
2. Die Kombination aus Schallquelle und Mikrofon für die anstehende Einzelmessung auswählen und dokumentieren. Das Anschließen der gewählten Schallquelle und des gewählten Mikrofons kann im einfachsten Fall durch umstecken von Kabeln erfolgen, oder falls möglich durch Umschalten. Eine besonders komfortable Möglichkeit besteht in mehrkanaligen Audio-Interfaces, in denen die Signalwege per Software-Interface verändert werden können.
3. Geräuschquellen, die die Messung beeinträchtigen könnten, beseitigen oder ausschalten.
4. Mit der Taste 'sweep' auf der Seite '2. Messen' der AcouScale-Software die Messung starten und die Verarbeitung des gemessenen Signals abwarten. Dies kann, je nach Leistungsfähigkeit des Meß-PCs, einige Sekunden bis etwa eine Minute dauern.
5. Auf den Seiten '3. ...' und '4. ...' der AcouScale-Software die Qualität der gerade erfolgten Messung überprüfen. Bei unzureichender Qualität auf der Seite '2. Messen' der AcouScale-Software die Taste 'wiederholen' betätigen und dann die Messung ab Punkt 3. wiederholen. Anderenfalls mit dem nächsten Punkt weiter.
6. Falls weitere Messungen der Meßreihe erfolgen sollen, auf der Seite '2. ...' der AcouScale-Software die Taste 'next' betätigen und dann die Punkte ab 2. (oder bei hoher Genauigkeits-Anforderung ab 1.) wiederholen. Anderenfalls mit dem nächsten Punkt weiter.
7. Bei hoher Genauigkeits-Anforderung als letzte Messung einer Meßreihe mit gleicher Raum-Konstellation die erste Messung dieser Reihe wiederholen, so daß ein Driften infolge geänderter Temperatur- oder Feuchte-Werte (oder etwaiger anderer Veränderungen im Raum) erkennbar wird.
8. Temperatur- und Feuchte-Werte im Modellraum dokumentieren und auf Seite '1. Vorbereiten' der AcouScale-Software einstellen.

In den folgenden Kapiteln wird die Auswertung der Messungen beschrieben und die zu erwartende Genauigkeit betrachtet. Weitere Einzelheiten zur Meßmethodik und zur Auswertung sind in der Benutzer-Anleitung zu AcouCheck 2 enthalten.

2.5.4 Auswerten

Nachdem der eigentliche Meßvorgang einer Einzelmessung abgeschlossen ist, wird eine automatisierte Verarbeitung des Signals gestartet. Darin wird der Maßstab transformiert einschließlich des Resampling, die Raumimpulsantwort wird erzeugt und anschließend in Oktavbändern spektral zerlegt und schließlich werden daraus Nachhallzeiten und andere raumakustische Parameter abgeleitet.

Auf der Seite '2. Messen' wird die Raumimpulsantwort als Signalform und als Echogramm angezeigt. Anhand des Echogramms ist eine erste Einschätzung der Meßqualität möglich.

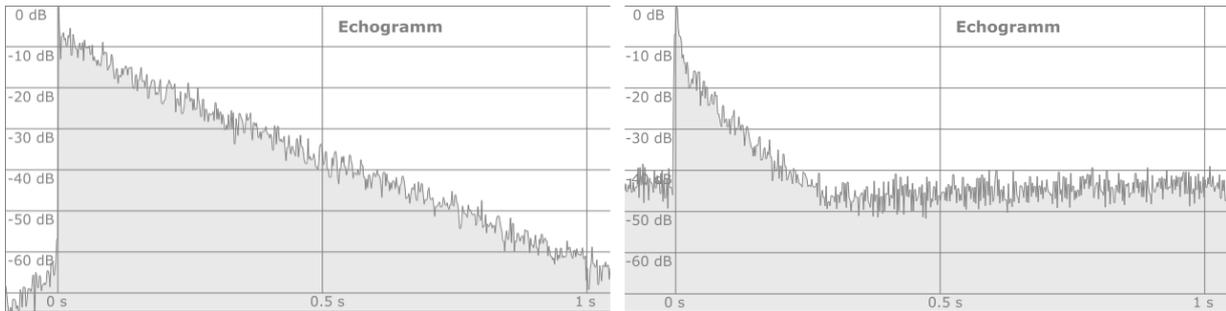


Abb. 44. Zwei Beispiel-Echogramme mit unterschiedlicher Signalqualität. Links ein Meßergebnis mit gutem Signal-Rausch-Abstand (SNR), rechts eins mit geringem SNR.

Auf der Seite '3. Auswerten' werden die Echogramme der in Oktaven zerlegten Raumimpulsantwort dargestellt. Damit kann die Qualität der Messung in den einzelnen Oktaven visuell bewertet werden. Abb. 45. zeigt die Echogramme der-selben Messung für die Oktaven 125 Hz und 4 kHz. In der 4 kHz-Oktave verläuft das Abklingen sehr gleichmäßig und das überlagerte Rauschen wird durch die Rückwärts-Integration nahezu vollständig geglättet, was eine geringe Meßunsicherheit bewirkt. Im Gegensatz dazu verläuft das Abklingen in der 125 Hz-Oktave sehr ungleichmäßig und mit großen Schwankungen, die die Rückwärts-Integration nur teilweise glätten kann. Das bedeutet deutlich mehr Meßunsicherheit.

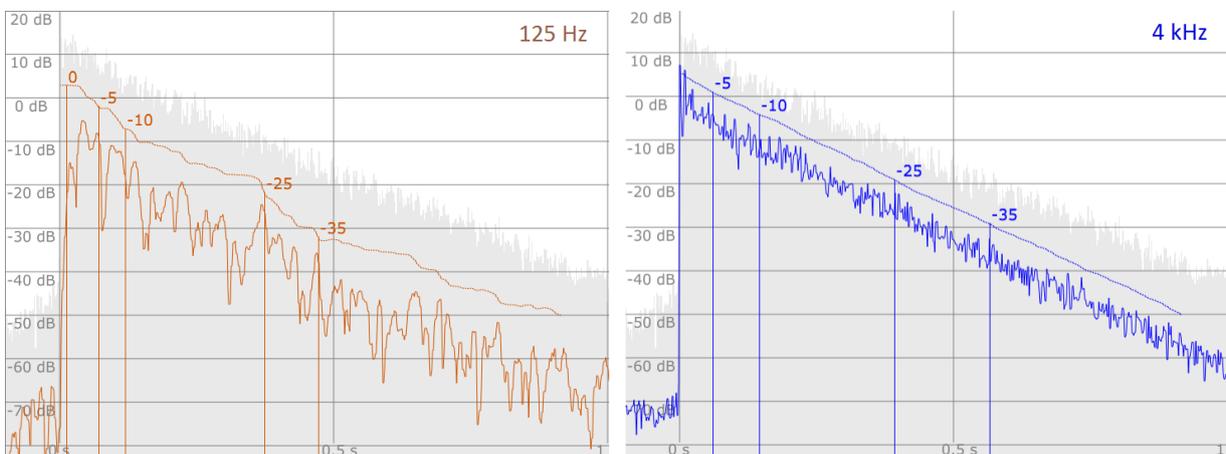


Abb. 45. Oktav-Echogramm und Rückwärts-Integral bei 125 Hz und bei 4 kHz.

Meßergebnisse

Sobald die Signalverarbeitung einer Einzelmessung beendet ist, werden auf Software Seite 4 die Oktav-Nachhallzeiten dargestellt. Dabei besteht die Möglichkeit, entweder die Ergebnisse einer Einzelmessung anzuzeigen (Abb. 46, links) oder alle Einzel-Ergebnisse überlagert und die Mittelwerte daraus (rechts). In der Einzelmessungs-Darstellung ist den Meßergebnissen ein Schatten hinterlegt, der die geschätzte Meßunsicherheit anzeigt. Auch in diesem Beispiel ist gut zu erkennen, daß die Meßunsicherheit in den tiefen Oktaven gegenüber den hohen Oktaven zunimmt. Dem entspricht auch, daß die Einzelmessungen in den tiefen Oktaven weniger gut übereinstimmen als in den hohen Oktaven.

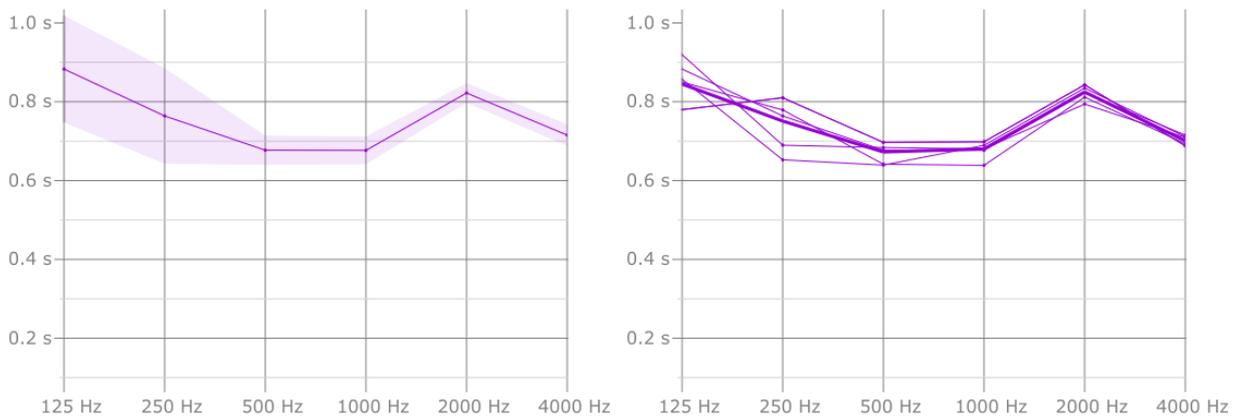
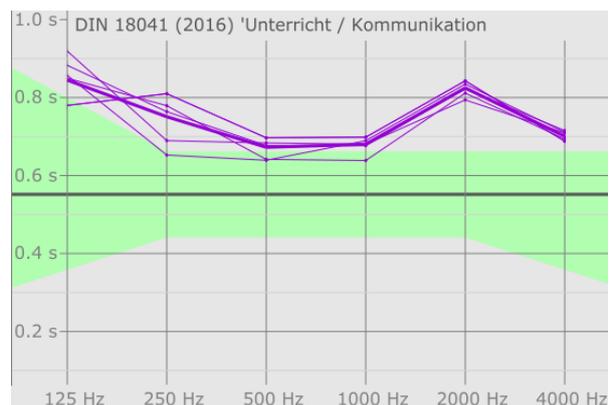


Abb. 46. Gemessene Nachhallzeiten eines Seminarraums. Links das Ergebnis einer Einzelmessung mit Meßunsicherheit. Rechts mehrere Einzelmessungen und Mittelwerte daraus als fette Kurve.

Bewertung der Ergebnisse

Zusätzlich zur Darstellung können die Meßergebnisse auf der Seite 4 der Software-Oberfläche auch anhand von Qualitäts-Kriterien bewertet werden. In erster Linie dienen dazu die vom Raumvolumen abhängig empfohlenen Nachhallzeiten für verschiedene Nutzungsarten aus DIN 18041. In Abb. 47 ist als dunkelgrüne Linie die empfohlene Nachhallzeit für die Nutzungsart Unterricht eingezeichnet. Das hellgrüne Feld zeigt den Toleranzbereich an.

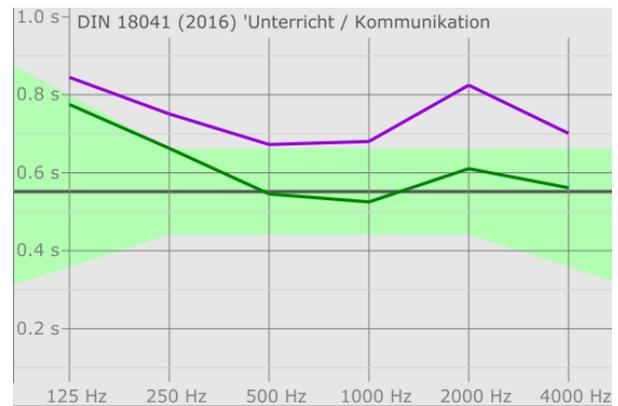
Abb. 47. Gemessene Nachhallzeiten eines Seminarraums, hinterlegt mit der DIN-Empfehlung für Unterricht



Berechnung modifizierter Raum-Varianten

Ausgehend von gemessenen Nachhallzeiten besteht auf der Software Seite 5 die Möglichkeit, die Wirkung zusätzlicher Schallabsorber zu berechnen. Die Absorber können absorbierende Flächen, Personen oder Objekte wie Möbelstücke sein und können aus der integrierten Datenbank ausgewählt werden. Das Resultat der Berechnung ist dann ein Hybrid aus Meßergebnis und Prognose. (Abb. 48)

Abb. 48. Die berechnete Wirkung von 25 Personen auf die Nachhallzeiten eines Seminarraums (blau: ohne, grün: mit Personen)



2.5.5 Genauigkeit

Die Genauigkeit akustischer Messungen wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst und läßt sich daher in der Regel auch nicht mit einer pauschalen Angabe wie beispielweise $\pm 1\%$ vom Meßwert beziffern. Ringversuche in der '1:1-Welt' - mehrere erfahrene Akustiker messen unabhängig voneinander Eigenschaften desselben Raums - haben gezeigt, daß raumakustische Messungen mit Unsicherheiten behaftet sind. Bei Nachhallzeiten reicht die typische Streubreite der Ergebnisse verschiedener Experimentatoren bis etwa 10% der Meßwerte. Um die Meß-Unsicherheit so gering wie möglich zu halten, lohnt es die einzelnen Einflußfaktoren zu betrachten.

Auswerte-Algorithmen

Raumakustik-Messungen sind indirekte Messungen, bei denen die gewünschten Meßgrößen aus anderen gemessenen Parametern abgeleitet werden. So wird beispielsweise eine Raumimpulsantwort, also der zeitliche Verlauf des Schalldrucks an einer Meßposition, gemessen. Aus dem Zeitverlauf der Raumimpulsantwort werden dann die gewünschten raumakustischen Größen wie Nachhallzeiten oder Klarheitsmaße abgeleitet. Die dazu verwendeten Algorithmen entscheiden also mit über die Meßgenauigkeit.

Die in der AcouScale-Software eingesetzten Auswerte-Algorithmen sind aus AcouCheck 2 übernommen und entsprechen den Empfehlungen der Norm ISO 8832. Die Fehlerbetrachtung aus dem AcouCheck-Projekt (vgl. Abb. 49) ist also auf AcouScale übertragbar. Der zusätzliche Algorithmus für die Maßstabs-Transformation nutzt intern eine vielfach erprobte und bewährte Resampling-Software-Bibliothek.

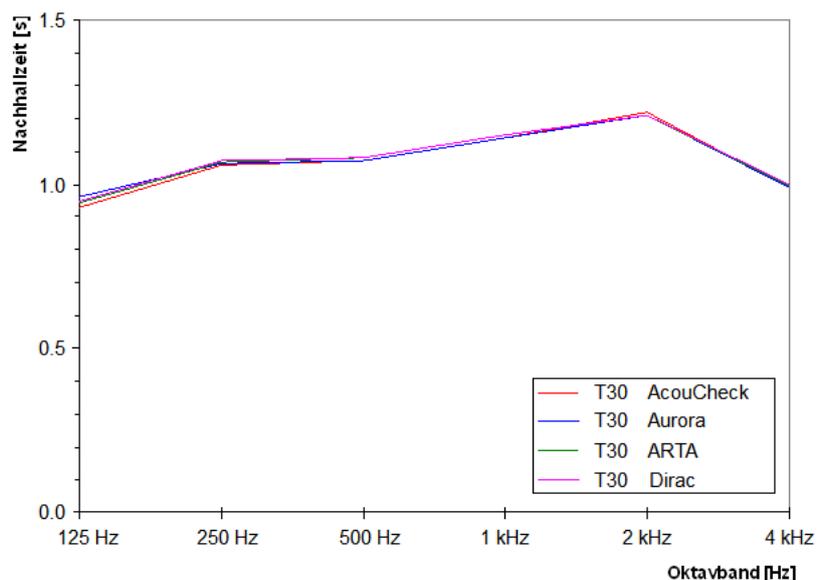


Abb. 49. Im Algorithmen-Vergleich wurden identische Raum-Impulsantworten von 'AcouCheck' und von anderer etablierter Meßsoftware ausgewertet. Der Vergleich lieferte durchweg geringe Abweichungen. Hier als Beispiel Nachhallzeiten eines Hörsaals der Universität Wuppertal.

Positionen der Schallquellen und Mikrofone

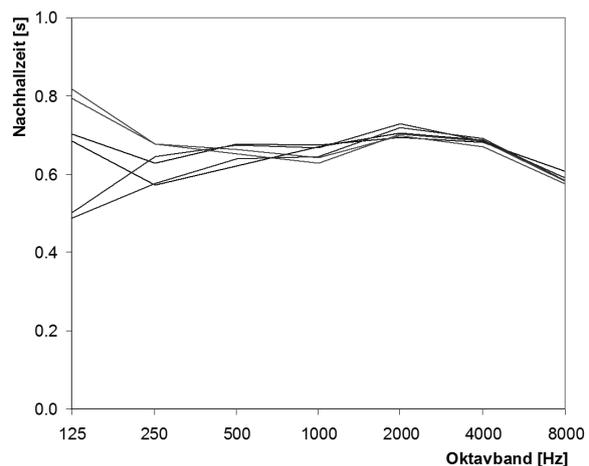
Die Positionen der Schallquellen und Mikrofone müssen bei Nachhallzeit-Messungen variiert werden, da die Nachhallzeit eine statistische Eigenschaft des gesamten Raums ist und lokale Variationen sich mit zunehmender Zahl der Einzel-Messungen an verschiedenen Positionen 'heraus-mitteln'. Bei hohen Frequenzen liegen die bei verschiedenen Positionen gemessenen Werte häufig nahe beieinander, wogegen bei tiefen Frequenzen oft ausgeprägte lokale Variationen auftreten, denn hier spielen Eigenschwingungen des Raums eine wesentlich größere Rolle (siehe das Beispiel in Abb. 50).

Die Quellen- und Mikrofon-Positionen sollen einigermaßen gleichmäßig im Raum verteilt sein, um den gesamten Raum mit den Messungen zu erfassen. Dabei sollen zusätzliche Bedingungen beachtet werden.

- Der Abstand zwischen Quelle und Mikrofon soll bei einer Messung nicht zu klein sein (zur Orientierung: $> \frac{1}{4}$ der Raumdiagonale).
- Sowohl Quelle als auch Mikrofon sollen nicht zu nahe an Umschließungsflächen positioniert sein. Bei einem Mindest-Abstand von 1 m ist ab dem 125-Hz-Oktavband die Bedingung erfüllt, daß dieser mehr als $\frac{1}{4}$ der Wellenlänge betragen soll. In Modellen gelten die Maßstab entsprechend skalierten Werte.

Die Meßergebnisse repräsentieren die Verhältnisse bei der normalen Raumnutzung besonders gut, wenn die Positionen der Meß-Quellen an typischen Positionen von Schallquellen bei der Nutzung und die Positionen der Mikrofone an typischen Hör-Positionen orientiert sind.

Abb. 50. Ein Beispiel für an verschiedenen Positionen gmessene Oktav-Nachhallzeiten eines Unterrichtsraums (aus dem EnOB-Projekt: Grundschule Hohen Neuendorf)



Signalqualität und Störquellen

Bei Messungen mit Impulsanregung wird vom Mikrofon die Impulsantwort empfangen und wird dann direkt der Auswertung zugeführt. Jedes Störgeräusch während der Messung wird der Impulsantwort überlagert und dann als deren Bestandteil mit ausgewertet. Deshalb erfordern Messungen mit Impulsanregung entweder eine sehr ruhige Umgebung oder sehr laute Meßsignale.

Wesentlich weniger empfindlich für Störgeräusche sind dagegen Messungen mit Anregung durch einen Sinus-Sweep. Dem Meßsignal überlagerte Störungen werden durch die Faltung des im Raum übertragenen Sweeps mit dem inversen Auswerte-Sweep weitgehend unwirksam gemacht.

Unabhängig von der Robustheit der einzelnen Meßverfahren bezüglich Störgeräuschen führt ein zu geringer Pegel-Abstand zwischen dem Nutz-Signal und verbleibenden Störungen (SNR - signal-to-noise ratio) zu Unsicherheiten im Ergebnis der Messung. Bei Nachhallzeit-Messungen macht sich dies bemerkbar in einem vergrößerten Residuum der Geraden-Anpassung nach der Rückwärts-Integration. Eine aufgrund des Residuums abgeschätzte Fehlerbreite als Maß für die Unsicherheit der Messung ist in Abb. 51 dargestellt.

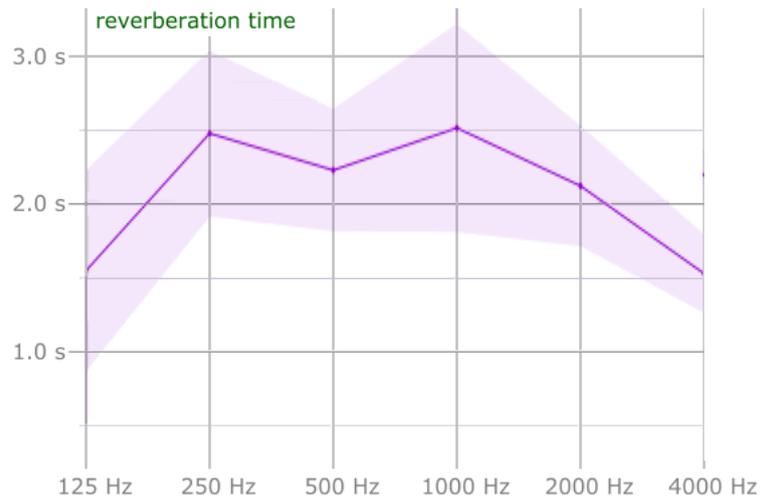


Abb. 51. Ein Beispiel für ein Meß-Ergebnis mit infolge Störungen insgesamt sehr hoher Fehlerbreite. Ein solches Meßergebnis sollte nach Möglichkeit nicht verwendet werden.

2.6 Anwendungs-Beispiele

2.6.1 Erprobung als Planungswerkzeug

Für die Erprobung der einzelnen Komponenten und Techniken des AcouCheck-Projekts wurde unter anderem ein Modell-Unterrichtsraum im Maßstab 1:10 verwendet. Dieser Modellraum ist eine näherungsweise Nachbildung eines Unterrichtsraums der Grundschule Niederheide in Hohen-Neuendorf nördlich Berlins, die als Plusenergie-Schule konzipiert ist. Im Rahmen des EnOB-Monitorings wurde der Unterrichtsraum auch akustisch vermessen.



Foto: IBUS

Abb. 52. Blick in einen Unterrichtsraum der Grundschule Niederheide in Hohen-Neuendorf, der als Modell-Vorbild diente.

Anhand dieses Raums wurde die Eignung des AcouScale-Systems als raumakustisches Planungswerkzeug erprobt. Dazu wurde von dem Planungsstadium ausgegangen, in dem das raumakustische Konzept entwickelt wurde. Die Geometrie der Räume stand weitgehend fest, aber viele Details waren noch offen. Die Randbedingungen für die raumakustische Planung waren zu diesem Zeitpunkt:

- Das Gebäude ist passiv klimatisiert. Deshalb sollen die Betondecken sehr guten thermischen Kontakt zum Innenraum haben und frei von Schallabsorbern sein. Auch abgehängte Absorber-Elemente stören den thermischen Kontakt. Lediglich ein am Rand abgehängter Installations-Koffer kann auch zur Schallabsorption genutzt werden.
- Die Fensterwand ist von einer niedrigen Brüstung bis zur Decke nahezu vollständig verglast.
- Auch die Flurwand ist zu mehr als 70% verglast und die übrige Fläche wird von Einbauten beansprucht.
- Die hintere Stirnwand ist oberhalb der Türhöhe für Schallabsorber verfügbar.
- Die vordere Stirnwand kann bis auf den von der Tafel beanspruchten Teil mit Schallabsorbern belegt werden.

Die für Schallabsorber verfügbare Fläche war insgesamt sehr knapp. Einer Sabine-Berechnung zufolge waren mit DIN 18041 konforme Nachhallzeiten kaum erreichbar, auch wenn alle verfügbaren Flächen mit total absorbierenden Breitband-Absorber belegt werden. Zusätzliche Absorptionswirkung durch Rand- und Kanten-Effekte wurden in der Rechnung nicht berücksichtigt.

Für die Erprobung wurde in dem Modellraum im Maßstab 1:10 den Vorgaben entsprechend nur die Tafelwand und der obere Bereich der hinteren Stirnwand mit Breitband-Absorbern belegt. Um ein diffuses Schallfeld zu erzeugen, wurde der Raum mit Tischen möbliert. Versuche in dem Modell haben gezeigt, daß anders als nach der Sabine'schen Berechnung nur etwas weniger als 80% der verfügbaren Fläche mit hochwirksamen Breitband-Absorbern belegt werden müssen, um der DIN-Empfehlung zu entsprechen. Dies entspricht auch etwa dem in der Schule realisierten Belegungsgrad der verfügbaren Flächen. Damit hat in diesem Beispiel die Modell-Messung eine deutlich bessere Prognose für die gebaute Realität geliefert als die übliche einfache Berechnung.

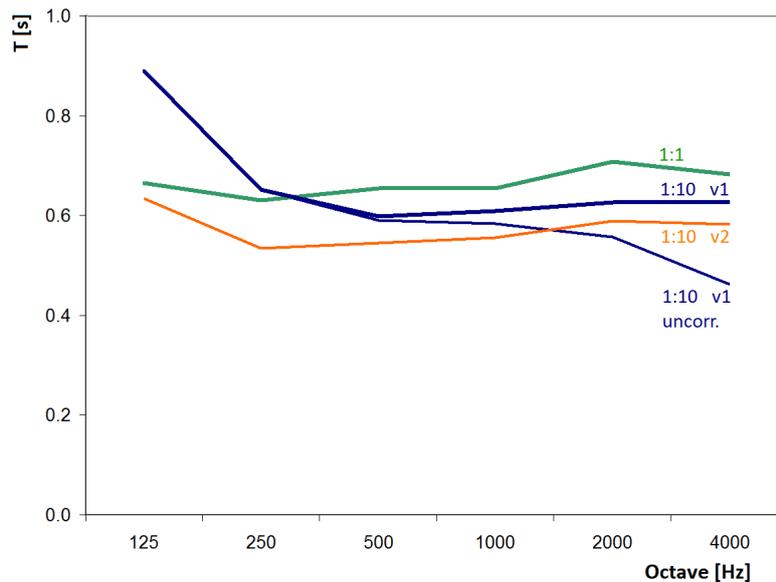


Abb. 53. Gemessene Nachhallzeiten im 1:10 Prognose-Modell (transformiert nach 1:1) und im realisierten Vorbild-Raum. Modell-Variante 1 (blaue Kurven, dünn unkorrigiert, dick für Luft-Absorption korrigiert) mit ca. 75% Absorber-Belegung der verfügbaren Flächen. Modell-Variante 2 (orange Kurve, korrigiert) mit zusätzlichem Kantenabsorber unter der breiten Fensterbank. Im realisierten Vorbild-Raum (grüne Kurve) konnte durch eine modifizierte Anordnung der Absorber auch ohne explizite Kantenabsorber der Kanteneffekt genutzt und so der Raum bei tiefen Frequenzen gut bedämpft werden (1:1-Messung aus dem EnOB-Projekt: Grundschule Hohen Neuendorf)

2.6.2 Kantenabsorber

Der Kantenefekt, daß Schallabsorber insbesondere bei tiefen Frequenzen eine erhöhte Absorptions-Wirkung zeigen, wenn sie nahe den Raum-Kanten angeordnet sind, ist mit der Wellenlänge verknüpft. Bei hohen Frequenzen und damit kleinen Wellenlängen wird die Wirkung für den Raum sehr klein und tritt nicht in Erscheinung. In der herkömmlichen raumakustischen Berechnung wird die Wellen-Eigenschaft des Schalls nicht berücksichtigt und daher ist diese für die Prognose von Kantenefekten wenig geeignet.

In skalierten Modellen wird jedoch auch die Wellen-Natur des Schalls nachgebildet, was die Modelle als Prognose-Instrument für die Wirkung von Kantenabsorbern prädestiniert. Um dies zu erproben, wurde eine von Lamprecht und Fuchs (DAGA 2012) publizierte Messung an einem Kantenabsorber in einem analogen Modell-Experiment wiederholt.

In einem ansonsten unbedämpften Raum wurde entlang einer Raumkante ein poröser Absorber mit einem Querschnitt von 50 cm x 40 cm angeordnet. Im 1:10 Modellraum wurde die Wirkung des nachgebildeten Kantenabsorbers auf die Nachhallzeiten gemessen. Zum Vergleich wurde mittels der publizierten Absorber-Daten die Wirkung in das Ergebnis der Modell-Messung ohne Absorber 'hinein-gerechnet'. Der Vergleich beider Ergebnisse zeigt eine recht gute Übereinstimmung (Abb. 54).

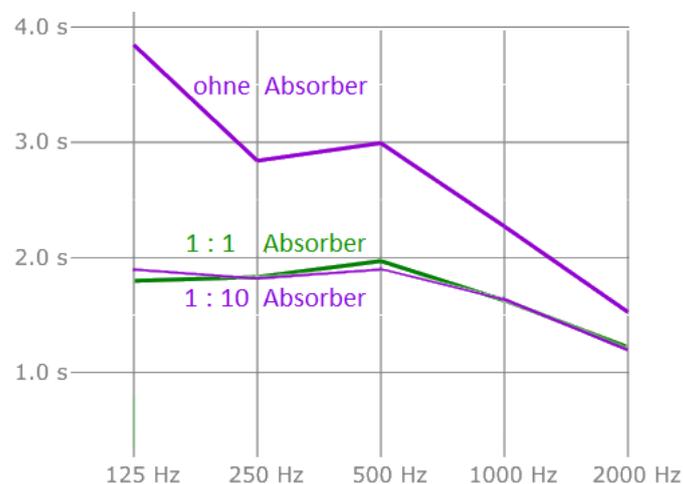


Abb. 54. Messungen im Modell-Unterrichtsraum 1:10.
 a) Kurve 'ohne Absorber': Messung im Modellraum ohne Kantenabsorber
 b) Kurve '1:10 Absorber': Messung im Modellraum mit Kantenabsorber
 c) Kurve '1:1 Absorber': Messung im Modellraum ohne Kantenabsorber mit hineingerechnetem 1:1 Kantenabsorber (Lamprecht und Fuchs)

3. Kommunikation und Publikation

3.1 Projekt-Meetings

Am 3. Mai 2021 fand das 1. AcouScale-Projekt-Meeting mit Vertretern der unterstützenden Unternehmen in Form einer Videokonferenz statt.

Am 10. Februar 2022 fand das 2. AcouScale-Projekt-Meeting mit Vertretern der unterstützenden Unternehmen statt, ebenfalls in Form einer Videokonferenz.

Der Termin des dritten und abschließenden AcouScale-Projekt-Meeting ist der 7. Februar 2023.

3.2 Publikation

Die Resultate des Vorhabens sind im 'AcouScale Handbuch' umfassend dokumentiert.

Das 'AcouScale Handbuch' sowie die 'AcouScale Software' stehen ab Januar 2023 zum kostenfreien Download bereit und sind unter der Internet-Adresse 'www.acouscale.de' erreichbar.

Für die nächste DAGA-Tagung der Deutschen Gesellschaft für Akustik ist ein Beitrag geplant. Weitere Publikationen zum Projekt sind vorgesehen.

4. Fazit

In dem Vorhaben 'AcouScale - Entwicklung und Erprobung eines raumakustischen Modellmeßsystems für Forschung, Entwicklung und Planung' wurde ein System für raumakustische Messungen in skalierten Modell-Räumen unter dem besonderen Gesichtspunkt der einfachen und kostengünstigen Realisierbarkeit entwickelt.

Als Resultate stehen eine zur 'AcouScale-Software' weiterentwickelte Version der Raumakustik-Meßsoftware 'AcouCheck' sowie ein Handbuch mit Beschreibungen der für Messungen in Modellen erforderlichen Komponenten und Erläuterungen der Vorgehensweisen zur Verfügung. Software und Handbuch werden zum kostenfreien Download bereitgestellt.

Der Maßstab eines Modells hat wesentlichen Einfluß auf den für eine Meßaufgabe erforderlichen technischen Aufwand. Mit zunehmender Verkleinerung schrumpfen einerseits die Dimensionen eines Modells, andererseits bewirken die dabei zunehmenden Schall-Frequenzen, daß die Messungen technisch anspruchsvoller werden. Das betrifft sowohl die stark ansteigende Schallabsorption der Luft als auch höhere Anforderungen an die Meß-Elektronik und die Wandler.

Die Meß-Elektronik ist das zentrale technische Element und entscheidend für die nutzbare Bandbreite der Meßsignale. Meßmikrofone mit nahezu optimalen Eigenschaften sind erhältlich, wobei die obere Frequenzgrenze den Preis bestimmt. Bei Lautsprechern muß ein von der Meßaufgabe abhängiger Kompromiß zwischen Eigenschaften wie Bandbreite, Richtwirkung und den geometrischen Abmessungen getroffen werden, da in allen Eigenschaften optimale Lautsprecher nicht erhältlich sind. Auch das Audio-Interface mit der Wandlung zwischen analogen und digitalen Meßsignalen und der zugehörigen Filterung muß entsprechend der Meßaufgabe ausgewählt werden.

Die AcouScale-Software ist mit zusätzlichen Algorithmen für die Messung in Modellen erweitert. Dies ist zum Einen eine integrierte automatisch ablaufende Maßstabs-Transformation, mit der gemessene Raum-Impulsantworten vor der Auswertung in entsprechende Impulsantworten für 1:1 umgewandelt werden. So können die bisherigen, bereits erprobten Auswerte-Algorithmen verwendet werden. Zudem erleichtert eine Darstellung der Ergebnisse in '1:1' deren Interpretation. Des weiteren können die Auswirkungen der bei hohen Frequenzen zunehmenden Schallabsorption der Luft korrigiert werden, wobei Algorithmen auf der Basis von NASA-Daten zum Einsatz kommen.

Beim Bau von Modellen werden wie alle Bauteile auch akustisch wirksame Elemente im Maßstab skaliert. Insbesondere bei den auf Reibung beruhenden porösen Schallabsorbern muß für eine korrekte Skalierung zusätzlich durch die Wahl eines geeigneten absorbierenden Materials der Strömungswiderstand der porösen Schicht erhalten bleiben.

Mit einer Vielzahl an Tests wurde die Eignung einzelner Komponenten überprüft und mit Anwendungs-Beispielen wurde die Funktion des gesamten Systems erprobt. Insbesondere konnte anhand eines am Bauprojekt 'Plusenergie-Grundschule Hohen Neuendorf' durchgespielten Einsatzes des AcouScale-Systems als Planungs-Instrument eine gute Prognose-Qualität der Messungen am Modell gezeigt werden.

Insgesamt wurden die Ziele des Vorhabens mit der erfolgreichen Entwicklung und Erprobung des AcouScale-Systems für raumakustische Messungen in Modellen erreicht. Lediglich die geplante Erprobung des Systems in der Lehre wurde angesichts des Pandemie-bedingt eingeschränkten Lehrbetriebs aufgeschoben und soll außerhalb der Projektlaufzeit nachgeholt werden. Im Laufe des Vorhabens wurden zahlreiche Erkenntnisse zur praktischen Umsetzung gewonnen, die in diesem Bericht zusammenfassend beschrieben sind. Auch die zu erwartenden Kosten für die meßtechnische Ausrüstung lassen sich veranschlagen auf einen Bereich von 5000 € bis 10000 € bei hohen Anforderungen auf dem Niveau der Projekt-Referenzen bis herunter zu etwa einem Zehntel dieser Kosten für ein gut funktionsfähiges System, mit dem nur bei Frequenzen unterhalb 30 kHz gemessen werden soll.

5. Literatur

- T.J. Cox, P. D'Antonio Acoustic Absorbers and Diffusers, 3rd Ed. 2017.
- A. Farina Advancements in Impulse Response Measurements by Sine Sweeps; 122th AES Convention, Vienna, 2007.
- D. Hennings Raumakustik in der Plusenergie-Schule Hohen Neuendorf; EnOB-Bericht, 2011.
- D. Hennings, K. Voss A new tool for quick room acoustic assessment in architectural education; CESBP Vienna, 2013.
- M. Kleiner, J. Tichy Acoustics of Small Rooms, 2014.
- H. Kuttruff Room Acoustics; 5th Ed. 2009.
- J. Lamprecht, H. V. Fuchs Zur Wirkungsweise von Kanten-Absorbern in kleinen bis mittelgroßen Räumen; DAGA, Darmstadt, 2012.
- F.D. Shields, H.E. Bass Atmospheric Absorption of High Frequency Noise and Application to Fractional Octave Bands. NASA CR-2760, 1977.