

# Versuch 6

## Raumakustik



Die Vorbereitungsfragen finden Sie auf den beiden letzten Seiten des Skripts.

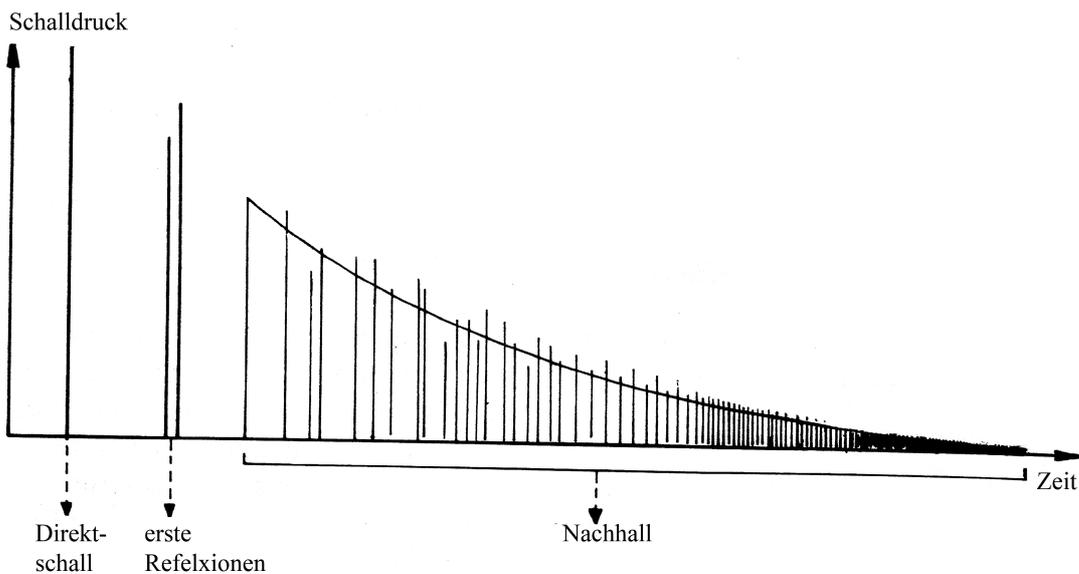
## 1. Theorie

### 1.1 Das Schallfeld in Räumen

#### 1.1.1 Der zeitliche Aufbau des Schallfeldes

Die Schallausbreitung in Räumen wird durch die Begrenzungsflächen und andere Hindernisse beeinflusst. Der Schall wird an den Oberflächen des Raumes gebeugt, reflektiert oder absorbiert, ein gewisser Teil verlässt den Raum auch durch die Wände. In der Praxis handelt es sich meist um eine Mischform dieser Möglichkeiten. Welche Form dominiert hängt im konkreten Fall von der Wellenlänge des Tones und den Ausmaßen, der Form und den Materialeigenschaften des Hindernisses ab.

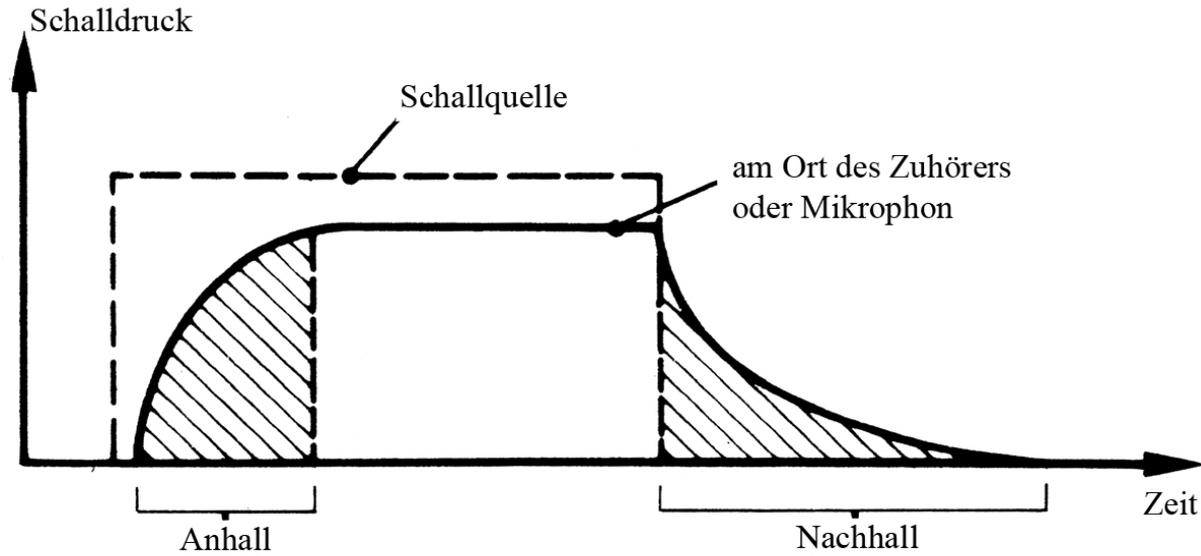
Kurz nach dem Direktschall baut sich durch die Reflexionen ein diffuses Schallfeld auf, das im Idealfall keine Vorzugsrichtung der Schallausbreitung kennt und sich gleichmäßig über den Raum verteilt. Dieses Ideal stellt sich jedoch nur bei Anregung mit breitbandigen, impulsartigen Schall ein. Dabei treffen nach dem Direktschall am Hörort zeitlich versetzt erst einzelne starke Reflexionen ein (die Erstreflexionen), danach bildet sich durch die Häufung der Reflexionen der sog. Nachhall. [Dickreiter, Handbuch der Tonstudioteknik, 1997, 25f]



**Abb. 1:** Zeitliche Folge der Reflexionen in einem Raum bei Anregung mit Impulsschall. [Dickreiter, Handbuch der Tonstudioteknik, 1997, S. 26]

Bei einer dauerhaften Anregung des Raumes ergibt sich ein anderer Aufbau des diffusen Schallfeldes. Der Schalldruckpegel im Diffusfeld steigt zuerst kontinuierlich durch die Häufung der Reflexionen an und stagniert dann an einem Punkt bei dem sich die Verluste durch Absorption und die zusätzlich in den Raum abgegebene Schallenergie ausgleichen. [Everest, The Master Handbook of Acoustics, 1993, S. 109 f.] Verebbt die Schallquelle klingt das diffuse Schallfeld wie bei impulsartiger Anregung mit dem Nachhall ab. Bei Anregung des Raumes mit Dauerschall ist das diffuse Feld oft nicht über den Raum gleichverteilt. Durch die Überlagerung von Reflexionen mit hinlaufender Welle entstehen bei tiefen Frequenzen stehende Wellen (Raummoden), die ortsfeste Schalldruckminima und -maxima aufweisen und damit ortsabhängig die Klangfarbe beeinflussen können.

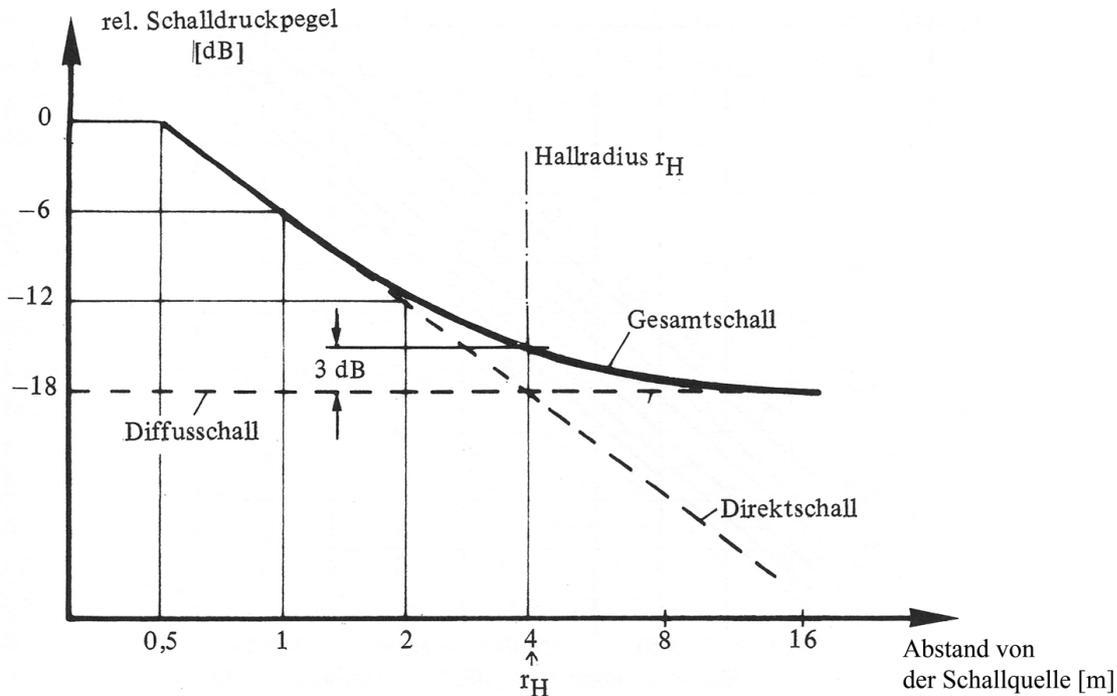
Das Diffusfeld als die Summe aller Reflexionen überlagert sich am Hörort mit dem Direktschallfeld und ist damit mit diesem klangprägend.



**Abb. 2:** Zeitlicher Auf- und Abbau des Schalldrucks im diffusen Schallfeld bei Dauerschall. [Dickreiter, Handbuch der Tonstudioteknik, 1997, S. 26]

### 1.1.2 Schallverteilung in Räumen

Bei der Schallausbreitung im Freien sinkt der Schalldruckpegel nach dem Entfernungsgesetz um 6 dB je Abstandsverdoppelung von der Schallquelle ( $p \sim 1/r$ ). In geschlossenen Räumen ist eine derartige Abnahme nur in einem kleinen Bereich um die Schallquelle beobachtbar. Außerhalb dieses Bereichs ist der Schalldruckpegel nahezu konstant.



**Abb. 3:** Die Überlagerung von Direkt- und Diffusschall, Hallradius. [Dickreiter, Handbuch der Tonstudioteknik, 1997, S. 37]

Wie aus obigem Diagramm ersichtlich ist, dominiert in der Nähe der Schallquelle der Direktschall mit seiner Richtungsinformation, während bei größeren Abständen der Diffusschall überwiegt. Die Grenze zwischen beiden Bereichen markiert der Hallradius, bei dem Diffus- und Direktschall den gleichen Schalldruckpegel besitzen.

Der Hallradius ist abhängig vom Raumvolumen und der Nachhallzeit. Durch gerichtete Schallabstrahlung oder -aufnahme vergrößert sich der Hallradius um die Wurzel des Bündelungsgrads. Die Korrekturen des Hallradius aus gerichteter Schallstrahlung und gerichtetem Schallempfang multiplizieren sich also.

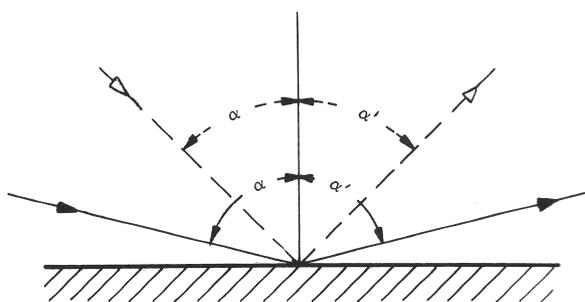
Hallradius:  $r_H = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}}$  [m]      effektiver Hallradius:  $r_{Heff} = 0,057 \sqrt{LS} \sqrt{Mikro} \sqrt{\frac{V}{T}}$  [m]

mit:

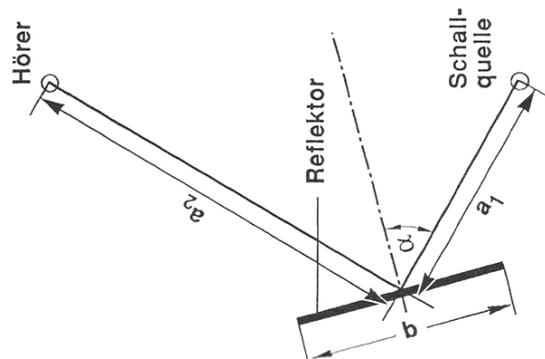
- V      Raumvolumen [m<sup>3</sup>]
- T      Nachhallzeit [s]
- LS*      Bündelungsgrad des Lautsprechers
- Mikro*      Bündelungsgrad des Mikrofons

### 1.1.3 Schallreflexion

Eine Reflexion nach den Gesetzen wie wir sie aus der Optik kennen, tritt bei Schall auf, wenn die Wellenlänge des Tones kleiner als die Abmessungen des Hindernisses ist. Unter dieser Bedingung kann der Schall als Strahl angesehen werden; dieser verlässt die Reflexionsfläche unter dem gleichen Winkel zur Mittelsenkrechten der Fläche unter dem er aufgetroffen ist (Gesetz: Einfallswinkel = Ausfallswinkel). Entsprechend kann Schall an Hohlflächen auch gebündelt oder gestreut werden; aus Ecken wird er parallel versetzt zurückgeworfen.



**Abb. 4:** Geometrische Reflexion [Dickreiter, Handb. der Tonstudiot. S. 12]



**Abb. 5:** schematische Darstellung einer Reflexion. [Fasold, Schallschutz u. Raumakust. 1998, S. 111]

Die untere Grenzfrequenz für die komplette Reflexion lässt sich berechnen:

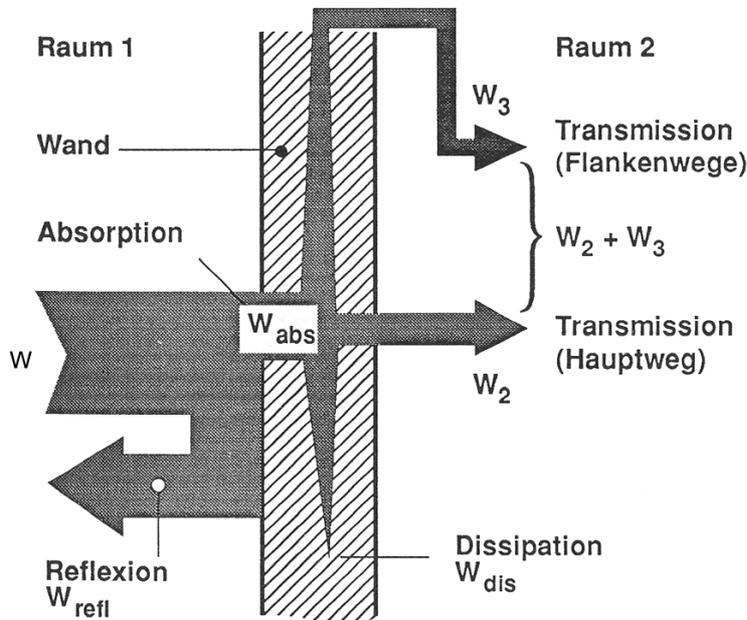
$$f_u = 700 \frac{a_1 a_2}{(b \cos \alpha)^2 (a_1 + a_2)} \quad [\text{Hz}]$$

mit:

- a*<sub>1</sub>      Schallquellenabstand [m]
- a*<sub>2</sub>      Hörerabstand [m]
- b*      Breite der Reflexionsfläche [m]
- Schalleinfallswinkel

Die tiefste noch reflektierte Frequenz liegt umso tiefer, je größer die Reflektionsfläche ist, je steiler der Schallstrahl auftrifft und je kleiner die Entfernungen des Reflektors zu Schallquelle und Empfänger sind. [Fasold, Veres, Schallschutz und Raumakustik in der Praxis, 1998, S. 110]

Trifft der Schall auf eine Begrenzungsfläche, wird ihm in den meisten Fällen auch Energie entzogen. Abb. 6 zeigt alle bei der Reflexion an Wänden auftretenden Vorgänge.



**Abb. 6:** Prinzipdarstellung zu Absorption, Reflexion und Transmission bei Schalleinfall auf eine Wand. [Fasold, Veres, Schallschutz und Raumakustik in der Praxis, 1998, S. 65]

Ein Teil der auf die Oberfläche treffenden Schallenergie gelangt demnach nicht mehr in den Raum zurück, er wird in der Wand in Wärme umgesetzt (Dissipation) oder gelangt durch die Wand hindurch in den Nachbarraum (Transmission). Der andere Teil wird in den Raum zurückgeworfen bzw. reflektiert.

Der Absorptionsgrad gibt an, welcher Teil der auftreffenden Schallenergie nicht in den Raum zurückgelangt.

$$= \frac{W}{W_{abs}} \quad [\text{dimensionslos}]$$

Umso größer der Absorptionsgrad der Begrenzungsflächen ist, desto weniger Schall wird in den Raum zurückreflektiert, was einen niedrigeren Pegel des Diffusfeldes bewirkt. Die beiden Extreme bilden die totale Reflexion ( $\alpha = 0$ ) und Absorption ( $\alpha = 1$ ).

### 1.1.4 Reflexionen zwischen parallelen Wänden

In Räumen mit parallelen Wänden führen Reflexionen, die immer wieder von den Begrenzungsflächen reflektiert werden, zu unangenehmen Beeinträchtigungen des Schallfeldes.

#### 1.1.4.1 Flatterechos

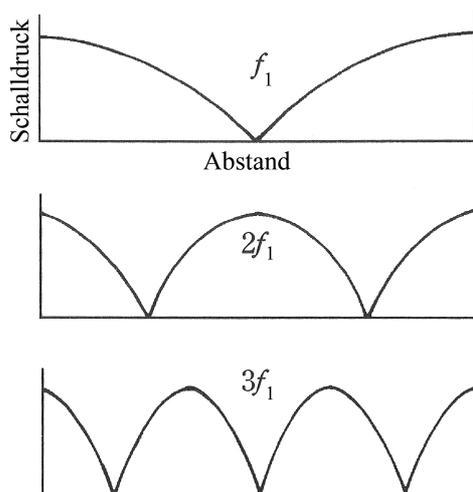
Flatterechos entstehen, wenn impulsartiger Schall zwischen zwei reflektierenden Oberflächen hin und her geworfen wird. Ist der Abstand zwischen den Flächen groß, wird eine Vielzahl diskreter Echos bemerkbar, bei kleinen Abständen verschmelzen diese Echos und bilden eine Art Nach-

hall, das sog. „Klangecho“. Dieses hat eine eigene Frequenz, welche vom Abstand der Oberflächen und dem Hörort abhängig ist. [Dickreiter, Handbuch der Tonstudioteknik, 1997, S. 13] Flatterechos beeinträchtigen die Übertragungsqualität eines Raumes beträchtlich. Sie können durch an den richtigen Stellen angebrachtes Absorptionsmaterial bedämpft werden oder durch eine Streuung des Schalls mit Hilfe von Diffusoren verhindert werden.

### 1.1.4.2 Raummoden

#### Entstehung von Raummoden

Treffen zwei Schallwellen mit gleicher Wellenlänge, aber entgegengesetzter Ausbreitungsrichtung aufeinander, löschen sich diese an bestimmten Punkten gegenseitig aus, an anderen verstärken sie sich. Zwischen zwei parallelen Wänden eines Raumes kommt es zu einer Überlagerung der senkrecht reflektierten Schallwellen mit sich selbst. Entspricht die halbe Wellenlänge des Tones dem Abstand zwischen den Wänden, entsteht eine stehende Welle (auch Raummode oder Raumresonanz genannt), die ortsfeste Schalldruckminima und -maxima besitzt. Am Reflexionspunkt ist die Schallschnelle gleich Null (Teilchen stoßen an Wand und werden abgebremst), der Schalldruck maximal, in der Raummitte ist die Schallschnelle am größten, entsprechend der Schalldruck gleich Null. Weitere Druckbäuche (hoher Schalldruck) und Druckknoten (niedriger Schalldruck) bilden sich bei ganzzahligen Vielfachen dieser Eigenfrequenz des Raumes aus.



**Abb. 7:** Stehende Wellen zwischen zwei parallelen Begrenzungsflächen. [Everest, The Master Handbook of Acoustics, 1993, S. 270]

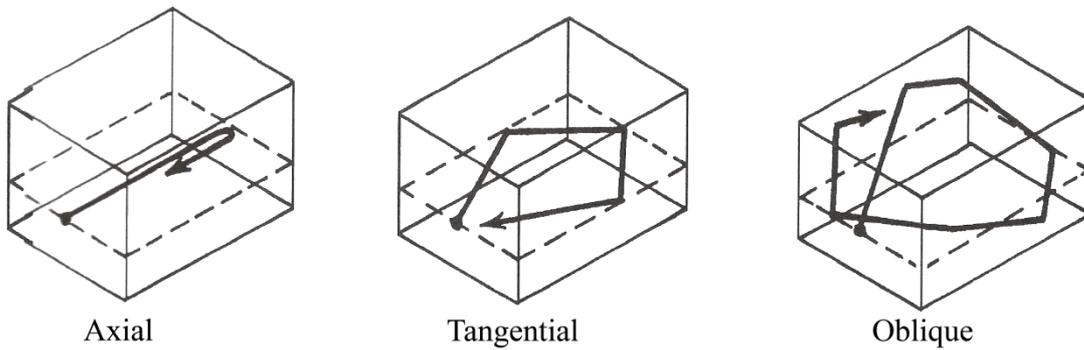
Die Frequenzen der Grundmode  $f_1$  und deren Harmonischen lassen sich wie folgt berechnen:

$$f_n = n \frac{c}{2L} \quad [\text{Hz}]$$

mit:

- n Ordnungszahl der Mode
- c Schallgeschwindigkeit [m/s]
- L Abstand zwischen den Begrenzungsflächen [m]

Zusätzlich zu den durch je ein Wandpaar auftretenden Raummoden existieren in rechteckigen Räumen zwei weitere Formen von stehenden Wellen: Tangentiale Moden, sie bilden sich zwischen vier Begrenzungsflächen aus und oblique (schräge) Moden, sie beziehen alle Raumflächen ein.



**Abb. 8:** In rechteckigen Räumen auftretende Typen von Raummoden. [Everest, The Master Handbook of Acoustics, 1993, S. 271]

In der Raumakustik finden die axialen Moden die höchste Aufmerksamkeit, da sie den höchsten Energiegehalt besitzen. Tangentiale und oblique Moden werden öfter reflektiert, wobei ihnen jedes Mal Energie entzogen wird, zur Bedämpfung von axialen Moden tragen jedoch nur zwei Wände bei.

**Kennzeichnung von Moden:**

Zur Identifikation von Raummoden wird ein Tupel aus drei Ziffern gebildet, z.B. (1 | 0 | 1). Die Kennziffern geben Auskunft über die Anzahl an Schalldruckminima je Raumachse (Länge | Breite | Höhe).

Bsp.:

Mode	Indizes
Axiale Grundmode der Raumhöhe	(0   0   1)
Axiale zweite Mode der Raumlänge	(2   0   0)
Tangentiale Mode zwischen Raumlänge und Raumbreite	(1   1   0)

**Tab. 1:** Kennzeichnung von Raummoden.

Über die Anzahl der Nullen im Tupel können axiale (2 x 0), tangentiale (1 x 0) und oblique Moden (keine 0) einfach unterschieden werden.

**Berechnung der modalen Frequenzen**

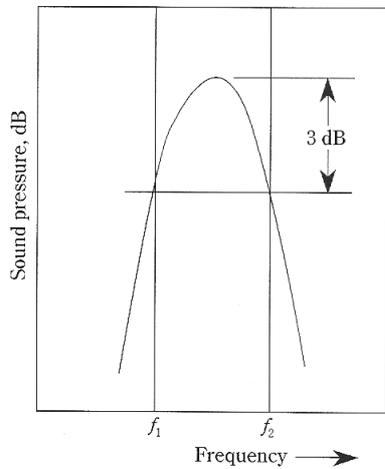
Die Indizes finden ebenso Anwendung bei der Berechnung aller modalen Frequenzen:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} + \frac{n_z^2}{L_z^2}} \quad [\text{Hz}]$$

mit:

- f            Resonanzfrequenz
- c            Schallgeschwindigkeit
- $L_x, L_y, L_z$     Abmessungen des Raumes
- $n_x, n_y, n_z$     Kennziffern der Moden

Jede der mit obiger Formel berechneten Moden, erzeugt im Spektrum eine Resonanzkurve (Abb. 9) mit einer bestimmten Bandbreite  $f$ . Zur Bestimmung der Bandbreite wird der 3 dB Abfall zu tiefen und hohen Frequenzen herangezogen. Die Güte der Resonanzkurve ist dabei abhängig von der Nachhallzeit  $T_N$ .



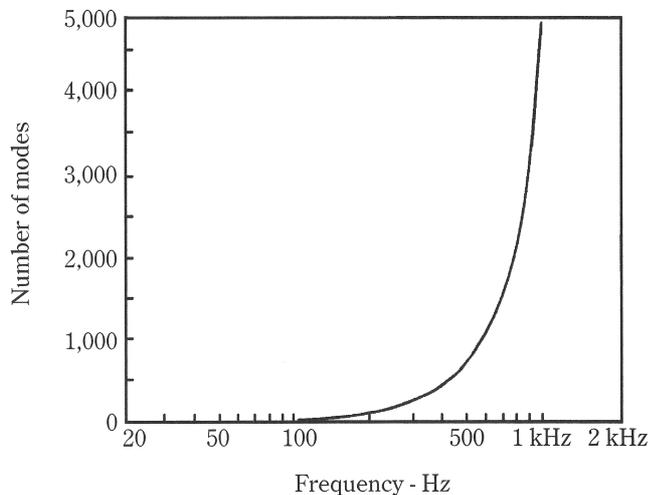
**Abb. 9:** Bandbreite von Raummoden. [Everest, The Master Handbook of Acoustics, 1993, S.281]

$$\text{Bandbreite: } f = f_2 - f_1 = \frac{2,2}{T_N}$$

Überlappende Moden regen sich gegenseitig an und bewirken damit eine breitere Anhebung des Spektrums. Die einzelnen resonanten Überhöhungen werden dann nicht mehr so stark wahrgenommen, was von Vorteil ist. Negativ wirken sich Moden aus, die bei einer Frequenz zusammenfallen. Sie tendieren dazu, das Signal bei dieser Frequenz zu sehr zu betonen und damit die Klangfarbe zu ändern.

### Verteilung der Moden

Die Frequenzen der Grundmoden und damit auch die ihrer Vielfachen stehen in direktem Zusammenhang mit den Abmessungen des Raumes. Die tiefste Eigenresonanz des Raumes liegt umso höher, je kleiner der Raum ist. Mit zunehmender Frequenz steigt die Anzahl der Moden an, sodass sie irgendwann, je nach Größe des Raums, so eng beisammen liegen, dass eine einzelne Anregung oder Wahrnehmung nicht mehr möglich ist.



**Abb. 10:** Zunahme der Moden mit der Frequenz. [Everest, The Mast. Handb. of A., 1993, S. 287]

Der kritische Bereich bei der Betrachtung von Raummoden liegt daher bei tiefen Frequenzen mit einer niedrigen Modendichte. Hier entscheidet die Verteilung der Moden, ob ein Raum ausgewogen klingt oder nicht. Lange Strecken ohne Moden, einzelne, von anderen Moden separierte Moden sowie dichte Anhäufungen von Moden führen zu einem unharmonischen Klangbild.

Kriterien für eine günstige Verteilung der Moden bis 200 Hz wurden u.a. von Bonello erarbeitet. Nach ihm soll die Anzahl der Moden je Terzband mit zunehmender Frequenz steigen oder zumindest gleich bleiben. Des Weiteren werden bei einer Frequenz zusammenfallende Moden nur toleriert, wenn sich mindestens fünf Raummoden in diesem Frequenzband befinden. Damit soll eine Eigenfrequenzdichte sichergestellt werden, die die Wahrnehmung einzelner Moden unmöglich macht.

## **Beeinflussung des Schallfeldes durch Raummoden**

Bei der Anregung des Raumes mit einem statischen Schallsignal entstehen also zwischen den drei parallelen Wandpaaren sich gegenseitig überlagernde stehende Wellen, die ein dreidimensionales Gebilde aus ortsfesten Druckbäuchen und Druckknoten formen. „Wenn man einen Raum mit mehreren für diesen Raum resonanten Sinustönen beschallt (im Extremfall ein Musiksignal) und im Folgenden durchschreitet, wandert man quasi durch einen statischen Kammfilter innerhalb des Raumes und hört die frequenzspezifischen Beeinflussungen durch Raummoden je nach Raumposition.“ [Jungebluth, Raumakustik in Regieräumen, 2003, S. 15]

In Aufnahmerräumen können die Auswirkungen von Raummoden durch die Positionierung der Instrumente und Mikrofone an geeigneten Stellen im Raum minimiert werden. In Regieräumen ist die Abhörposition jedoch meist fix. Bei der Festlegung des Hörplatzes ist daher unter anderem darauf zu achten, dass das Schallfeld am Hörort ein ausgeglichenes Verhalten besitzt.

Bei der Planung von Studioräumen gibt eine Raummodenkalkulation Aufschluss über die Verteilung der Moden, die von den Verhältnissen der Raumdimensionen und der Größe des Raums abhängt. Durch das Vermeiden von parallelen Wänden kann die Übertragungsqualität des Raumes erheblich gesteigert werden.

## **1.2 Die einzelnen Komponenten des Schallfelds**

### **1.2.1 Der Direktschall**

Der Direktschall trifft beim Empfänger immer als erstes ein, da er den kürzesten Weg zurücklegt. Eine Beeinflussung des Signals durch den Raum findet nicht statt. Laufzeit und Schalldruckpegel sind lediglich von der Entfernung Schallquelle-Schallempfänger abhängig (Schallgeschwindigkeit, Entfernungsgesetz).

In der Tonregie ist für eine gute Hörsamkeit von Sprache und Musik eine ausreichende Versorgung mit Direktschall notwendig. Der „Anteil von Direktschall im Schallfeld muss denjenigen an Diffusschall übertreffen [...], um ein klares Klangbild vor dem Hintergrund des Diffusklangs zu bilden.“ [Dickreiter, Handbuch der Tonstudioteknik, 1997, S. 28] Daraus lässt sich folgern, dass sich die Abhörposition innerhalb des effektiven Hallradius um die Lautsprecher befinden muss.

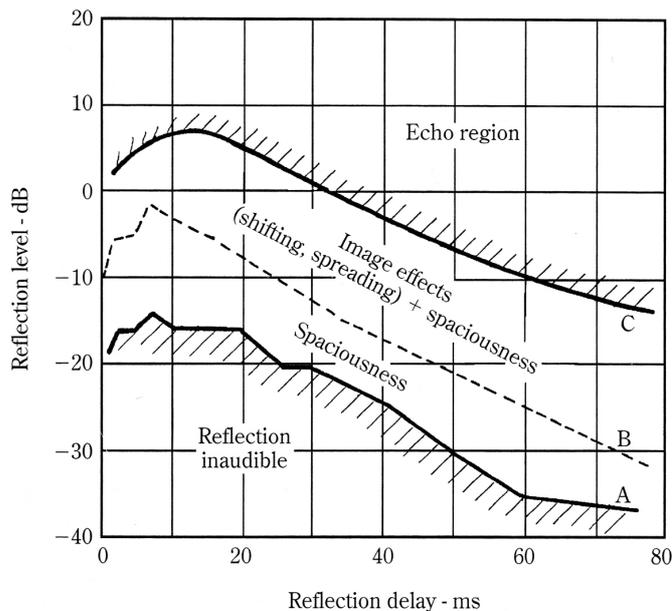
Bei der Tonaufnahme im Studio hängt es vom Musikstil und der Art der Mikrofonierung ab, welche Bedeutung der Direktschall hat. Bei der Einzelmikrofonierung - sie ist gängig bei der Pop- und Rockproduktion - wird das Mikrofon so nah an der Schallquelle angebracht, dass der Raumanteil völlig überdeckt wird, er ist hier auch nicht erwünscht.

Bei Orchesteraufnahmen (Aufnahme durch Stereomikrofonie und Stützmikrofonen) trägt auch der Raumklang zum gewünschten Klangbild bei. Hier ist ein höherer Diffusfeldanteil erlaubt bzw. erwünscht. [Ederhof, Das Mikrofonbuch, 2004, S. 328-330]

### 1.2.2 Erste Reflexionen

Die ersten Reflexionen an Wänden, Decke und Boden bewirken eine Erhöhung der Lautstärke des Direktschalls und haben außerdem je nach Stärke und Verzögerung Einfluss auf die Ortung, die Deutlichkeit und die Wahrnehmung der Raumgröße.

Folgendes Diagramm stellt eine Zusammenfassung der Untersuchungen von Sean E. Olive und Floyd E. Toole dar. In ihrem Artikel „The Detection of Reflections in Typical Rooms“ aus dem Jahr 1989 untersuchten sie die Auswirkungen von zeitlicher Verzögerung (x-Achse) und Pegel von Reflexionen (y-Achse) auf ihre Hörbarkeit in einem reflexionsarmen Raum mit Sprache als Testsignal und mittels eines Lautsprechers simulierten Reflexionen.



**Abb. 11:** Ergebnisse einer Untersuchung bzgl. des Effekts von simulierten, seitlich einfallenden Reflexionen in einem reflexionsfreien Raum mit Sprache als Testsignal. [Everest, The Master Handbook of Acoustics, 1993, S. 298]

Der Pegel (Reflection level) und die Verzögerung (Reflection delay) der Reflexion sind auf Pegel und Zeitpunkt des Direktschalls bezogen.

Kurve A zeigt den Pegel, der in Abhängigkeit von der Verzögerung nötig ist, um die Reflexionen überhaupt wahrzunehmen. Unterhalb dieser Linie werden Rückwürfe nicht festgestellt.

In dem Bereich zwischen den Kurven A und B ändert sich die Wahrnehmung bezüglich des Raums. Dieser wird nun nicht mehr als reflexionsarm empfunden. Die Reflexionen werden zwar nicht als diskrete Ereignisse wahrgenommen, man ist sich jedoch des Vorhandenseins von Diffusschall, der nicht als Wiederholung des Direktschalls empfunden wird, bewusst.

Oberhalb der Linie B, also ca. 10 dB über der absoluten Hörschwelle der Reflexionen, werden weitere Effekte hörbar. Es kommt zu Veränderungen der offensichtlichen Größe und der Position der Schallquelle; bei größeren Verzögerungen „verwischt“ die exakte Position und verschiebt sich in Richtung des Spiegelbildes der Reflexion.

In der „Echo Region“ werden die Reflexionen als einzeln wahrnehmbare Überlagerungen über dem eigentlichen Klangbild bemerkt. Diese diskreten Echos beeinträchtigen die Klangqualität erheblich und müssen beim praktischen Arbeiten auf jeden Fall vermieden werden.

„Frühe Reflexionen mit einer Verzögerung von 0,8 ms bis etwa 20 ms (entsprechend 0,3 m bis 7 m Umweg) verursachen bei der Tonaufnahme eine unangenehme Klangfärbung, die durch Summierung und Auslöschung zwischen Direktschall und Reflexionen entsteht.“ [Dickreiter, Handbuch der Tonstudioteknik, 1997, S. 28] Um Klangfärbungen zu vermeiden, müssen frühe Reflexionen in ihrem Pegel stark gesenkt werden.

### 1.2.3 Der Nachhall

Unter Hall versteht man allgemein den diffusen Schall in Räumen. Der Nachhall im Speziellen bezeichnet das Abklingen des diffusen Schallfeldes, nachdem eine Schallquelle versiegt. Zur Beschreibung des Nachhalls ist, neben anderen Aspekten wie Frequenzgang und Gleichmäßigkeit, dessen Dauer üblich. Man unterscheidet dabei die Nachhalldauer und die Nachhallzeit.

#### Nachhalldauer

Die Nachhalldauer ist die Zeitspanne, die verstreicht, bis subjektiv kein Nachhall mehr wahrgenommen wird. Sie ist im Gegensatz zur Nachhallzeit stark abhängig von dem raumeigenen Störgeräuschpegel und dem Schallpegel der Schallquelle. Mit zunehmender Lautstärke der Schallquelle steigt die Nachhalldauer, der Raum wirkt halliger.

#### Nachhallzeit

Die Nachhallzeit ist dagegen eine durch Messung oder Berechnung bestimmbare Größe. Sie ist definiert als die Zeit, in der der Schalldruckpegel in einem Raum nach Abschalten einer Schallquelle um 60 dB abfällt bzw. die Schallintensität um den Faktor  $10^{-6}$  sinkt. Die Nachhallzeit ist abhängig von der Größe des Raums, den Absorptionseigenschaften der Begrenzungsflächen und der darin befindlichen Körper. Aufgrund der unterschiedlichen Absorptionswirkung der Materialien bei versch. Frequenzen ist die Nachhallzeit auch frequenzabhängig.

#### Berechnung

Die Nachhallzeit ist ein Parameter der statistischen Raumakustik. Man geht davon aus, dass ein diffuses Schallfeld mit einer über den Raum gleichverteilten Energiedichte vorliegt. Die Geometrie des Raumes spielt dann keine Rolle mehr. Außerdem wird bei der Berechnung vorausgesetzt, dass das Absorptionsmaterial gleichmäßig über den Raum verteilt ist.

Nachhallzeit nach Sabine:

$$T = 0,163 \frac{V}{A} \quad [\text{s}]$$

mit:

- T Nachhallzeit [s]
- V Raumvolumen [ $\text{m}^3$ ]
- A Absorptionsvermögen = offene Fensterfläche [ $\text{m}^2$ ]

Das Absorptionsvermögen A entspricht der Summe der Teilabsorptionsvermögen im Raum.

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots \quad [\text{m}^2]$$

mit:

- $\alpha$  Absorptionsgrad [dimensionslos]
- S absorbierende Oberfläche [ $\text{m}^2$ ]

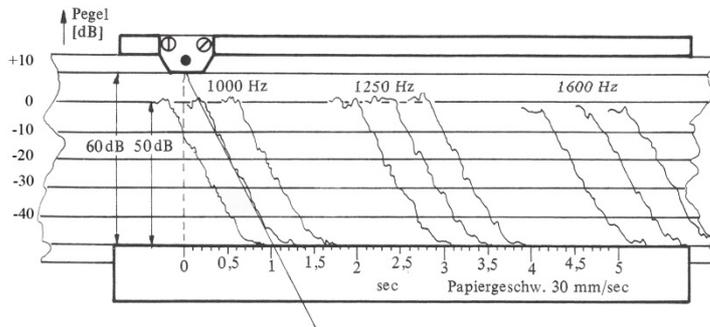
Der Absorptionsgrad ist das Verhältnis aus absorbierter Schallenergie und auftreffender Schallenergie. Ein Absorptionsgrad von 1 steht für eine totale Absorption, ein Absorptionsgrad von 0 für eine komplette Reflexion.

#### Messung der Nachhallzeit

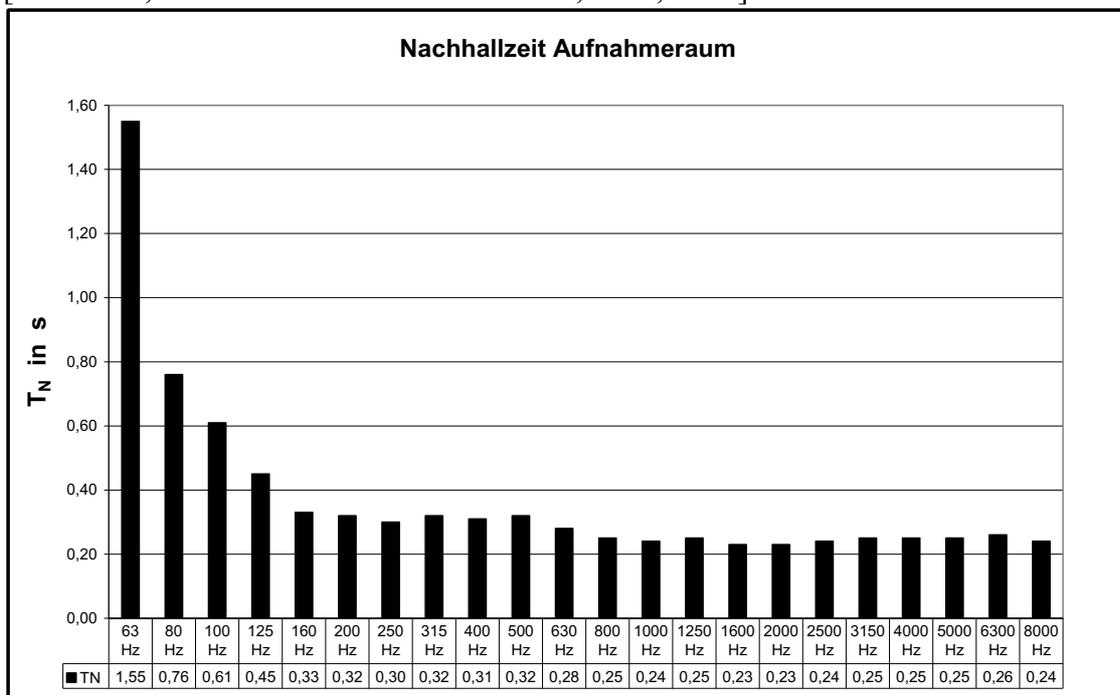
Für die Messung der Nachhallzeit existieren verschiedene Verfahren. Die Bestimmung der Nachhallzeit mittels Pegelschreiber ist das ursprünglichste und deshalb hier beschriebene Verfahren. Dabei wird ein Messsignal über einen Lautsprecher in den Raum abgegeben. Nach dem Abschalten der Schallquelle wird mit einem Messmikrofon der Pegelabfall aufgezeichnet. Anhand des

Pegelabfalls über die Zeit kann dann die Nachhallzeit bestimmt werden. Bei modernen, computerbasierten Messsystemen erfolgt die Auswertung automatisch, außerdem können alle interessierenden Frequenzbänder simultan gemessen werden.

Zur Veranschaulichung des Prinzips zeigt Abb. 12 die „manuelle“ Auswertung einer Messung mit Pegelschreiber und Auswertschiene:



**Abb. 12:** Nachhallkurven aus einer praktischen Messung und Auswertschiene nach W. Gerber. [Dickreiter, Handbuch der Tonstudioteknik, 1997, S. 33]



**Abb. 13:** Nachhallzeit bei verschiedenen Terzbändern eines guten Studioraumes.

Als Testsignal werden Terzrauschen (zur separaten Messung der Nachhallzeit bei einzelnen Terzbändern), breitbandiges Rauschen (Rosa Rauschen oder Weißes Rauschen), Sinus Sweeps und bei sehr großen Räumen impulsartige Knallgeräusche (Pistolenschuss, zerplatzender Luftballon) verwendet. Rosa-Rauschen hat den Vorteil, dass es bei tiefen Frequenzen (hier ist meist der Störgeräuschpegel im Raum am höchsten) einen hohen Signal-Störgeräusch-Abstand bietet und gleichzeitig den Lautsprecher im Hochtonbereich, anders als Weißes Rauschen, nicht übermäßig beansprucht.

Bei der praktischen Messung der Nachhallzeit ist es i.A. schwierig, einen Schalldruckpegel zu erzeugen, der 60 dB über dem Störgeräuschpegel des Raumes liegt. Daher wird in den meisten Fällen nur ein Pegelabfall von 30 dB gemessen und das Ergebnis auf einen Abfall von 60 dB extrapoliert. Normgemäß wird dazu der Bereich zwischen -5 dB und -35 dB verwendet.

Ein weiteres Problem tritt bei der Messung in kleinen Räumen auf. Bei Frequenzen, deren Wellenlängen in etwa den Abmessungen des Raumes entsprechen, kann sich die Schallenergie naturgemäß durch Reflexionen nicht gleichmäßig über den Raum verteilen; den Extremfall bilden die ortsfesten Raummoden. Eine axiale Raummode zwischen Decke und Boden wird z.B. nur durch

das dort angebrachte Absorptionsmaterial bedämpft. Ihr Abklingvorgang wird daher länger dauern als der einer tangentialen Mode im selben Frequenzband, die durch immerhin vier Begrenzungsflächen bedämpft wird. Die durch Messung bestimmte Nachhallzeit in den unteren Terzbändern hängt daher stark davon ab, welche Moden im Moment des Abschaltens der Schallquelle angeregt wurden. Um zu vermeiden, nur die charakteristische Nachhallzeit einer bestimmten Mode zu messen, muss der Messvorgang mehrmals wiederholt werden. Der Mittelwert der erhaltenen Messungen gibt Aufschluss über die tatsächliche Nachhallzeit. Durch die ungleichmäßige Verteilung des Diffusfeldes ist es notwendig über mehrere Positionen im Raum zu messen.

Bei Anregung mit Lautsprecher wird meist ein Dodekaeder verwendet, bei dem 12 Lautsprecher nach 12 Seiten abstrahlen, um auch bei hohen Frequenzen ungerichtet anzuregen.

Bei der normgemäßen Messung (DIN 52216 Bauakustische Prüfung; Messung der Nachhallzeit in Zuhörerräumen) werden die Nachhallzeiten für die Terzbänder von 125 Hz bis 4 kHz ermittelt, in Rundfunkanstalten wird der Bereich von 50 Hz bis 10 kHz betrachtet. Wird nur ein Wert angegeben, handelt es sich um den Wert bei 1 kHz.

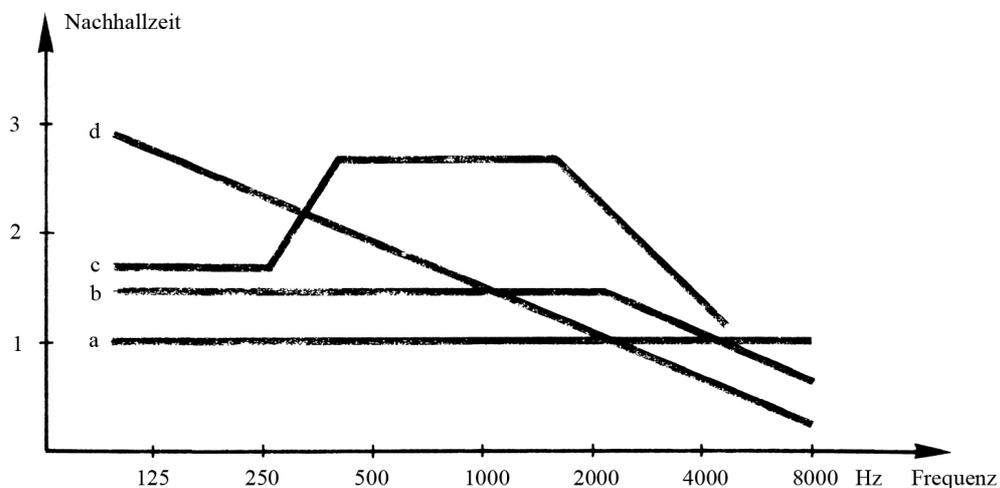
### Auswirkungen des Nachhalls

Dauer und Frequenzgangkurve des Nachhalls beeinflussen die Akustik eines Raumes in mehrerlei Hinsicht.

Zum einen steigt mit der Nachhallzeit bei gleich bleibendem Raumvolumen der Pegel des Diffusfeldes an. Das bewirkt einen kürzeren Hallradius und ein kleineres Nahfeld.

Zum anderen färbt ein nichtlineares Abklingverhalten des Nachhalls das Diffusfeld und kann, sofern der Diffusanteil groß ist, eine allgemeine Klangfärbung der Darbietung zur Folge haben.

Typische Nachhallkurven und deren Klangcharakteristiken zeigt Abb. 14.



**Abb. 14:** Nachhallkurven mit verschiedenen Frequenzabhängigkeiten [Dickreiter, Handbuch der Tonstudioteknik, 1997, S. 36]

a: Nachhall unnatürlich spitz – nur mit elektronischen Hallgeräten realisierbar

b: Nachhall klangneutral – Aufnahmestudios und moderne Konzertsäle

c: Nachhall mittenbetont und warm – historische Säle mit Holzvertäfelung

d: Nachhall dumpf – große Kirchen mit großen Steinflächen

Lange Nachhallzeiten, insbesondere bei tiefen Frequenzen, können außerdem Verdeckungseffekte bewirken. Bei Musik sinkt dadurch die Durchsichtigkeit, bei Sprache die Verständlichkeit. In Räumen zur Aufzeichnung von Sprache findet man aus diesem Grund die kürzesten Nachhallzeiten. In Räumen zur Darbietung von Musik kann man solche pauschalen Aussagen nicht treffen. Hier hängt es wesentlich von der Art der Musik ab, welche Nachhallzeit als optimal angesehen wird. Langsame, feierliche Musik (z. B. Orgelmusik) klingt am besten bei langen Nachhallzeiten

(Kirche), schnellere, rhythmische Musik dagegen bei kürzeren. Soll ein Raum universell nutzbar sein, wird man daher einen Kompromiss zwischen den verschiedenen Anforderungen finden müssen.

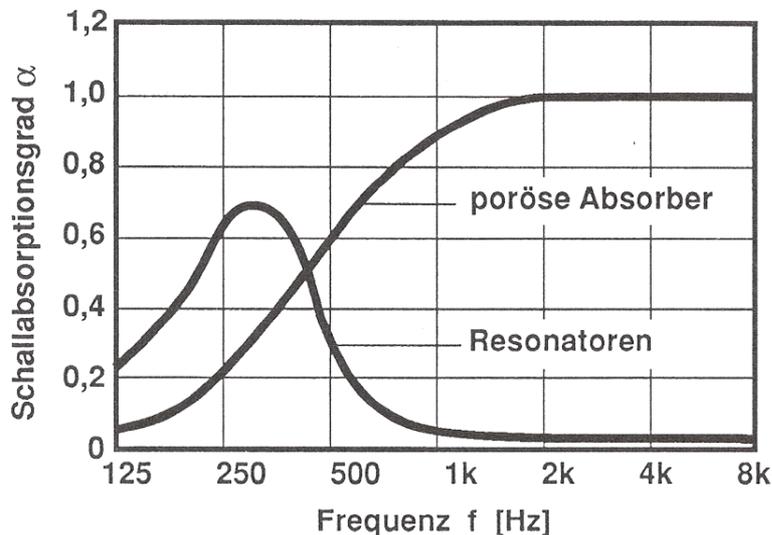
Bei der Wiedergabe von aufgezeichneten Audioprogrammen setzt sich der Nachhall aus dem des Aufnahmerraums und dem des Hörraumes zusammen. Die kombinierte Nachhallzeit ist länger als die der einzelnen Räume. Daraus folgt, dass die Klangqualität sowohl vom Aufnahmerraum als auch vom Wiedergaberaum abhängt. Laut einer Untersuchung des IRT zur Eignung von Regieräumen zur Musikwiedergabe muss ein Regieraum, in dem klassische Musik und Orgelmusik (also Musik, die in einer halligen Atmosphäre aufgenommen wurde) beurteilt und bearbeitet werden soll, halliger sein als ein Regieraum zur Abmischung von trocken aufgenommener Musik wie z. B. Pop, Disko oder Rock. [Völker, Regieräume für Musikwiedergabe, 1982, S. 112-120]

Da vom Konsumenten die Sprach- oder Musikaufnahmen jedoch meist im Wohnzimmer angehört werden und nicht in extra präparierten Räumen, existiert daneben die Forderung, die Akustik des Regieraumes der eines durchschnittlichen Wohnzimmers anzupassen.

### 1.3 Beeinflussung der Akustik durch Schallabsorber

Zur Beeinflussung der Raumakustik werden Schallabsorber verwendet. Mit ihnen ist eine frequenzselektive Erhöhung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche im Raum möglich. Dadurch wird die Nachhallzeit auf den gewünschten Wert gedrückt und Unregelmäßigkeiten im Frequenzgang werden ausgeglichen, sodass ein linearer Frequenzgang der Nachhallzeit entsteht.

Technische Schallabsorber, die an Wänden und Decke sowie in Raumecken angebracht werden, können in zwei Gruppen eingeteilt werden: in poröse Absorber (dazu zählen Faserstoffe und offenporige Kunststoffe) und in Resonatoren in Form von Plattenschwingern und Helmholtzresonatoren. Den prinzipiellen Frequenzverlauf des Schallabsorptionsgrades beider Absorberarten zeigt folgende Abbildung:



**Abb. 15:** Prinzipieller Frequenzverlauf des Schallabsorptionsgrades von porösen Absorbieren und von Resonatoren. [Fasold, Veres, Schallschutz und Raumakustik in der Praxis, 1998, S. 70]

Resonatoren absorbieren demnach vornehmlich in einem relativ schmalen Frequenzband bei tiefen Frequenzen, poröse Absorber weisen ein zu hohen Frequenzen hin zunehmendes Absorptionsverhalten auf. Durch eine Kombination verschiedener Absorber lässt sich der gesamte Frequenzbereich abdecken.

### 1.3.1 Poröse Absorber

Die schallabsorbierende Wirkung poröser Absorber entsteht durch die Transformation von Schallenergie in Wärme aufgrund der Reibung der sich in den Poren des Materials bewegend Luftteilchen der Schallwelle. Grundvoraussetzung dafür ist, dass die Schallwelle in den Stoff eindringen kann; die Poren müssen nach außen offen und untereinander verbunden sein. Die Energieumwandlung findet ferner nur statt, wenn Struktur und Größe der Poren den Luftteilchen hinreichend Widerstand bieten.

Die Porosität und der Strömungswiderstand  $R$  eines Stoffes bestimmen also, ob sich ein Material als Absorber eignet.

#### Porosität

Die Porosität ist das Verhältnis zwischen dem offenen Luftvolumen  $V_L$  der Poren und dem Gesamtvolumen  $V_{Ges}$ .

$$= \frac{V_L}{V_{Ges}}$$

Eine ausreichende Porosität des Stoffes ist gegeben, wenn der Anteil des offenen Luftvolumens mindestens 50 % beträgt.

#### Strömungswiderstand $R$

Der spezifische Strömungswiderstand  $R_S$  gibt an, wie leicht eine Schallwelle das Material durchdringen kann. Dazu wird das Verhältnis aus der Druckdifferenz  $p$  zwischen Vorder- und Rückseite des Absorbers und der Strömungsgeschwindigkeit der Luft  $u$  betrachtet.

$$R_S = \frac{p}{u} \quad [\text{Pa s / m}]$$

mit:

$p$  Druckdifferenz [Pa]  
 $u$  Geschwindigkeit der durchströmenden Luft [m/s]

Der längenbezogene Strömungswiderstand  $r$  ist unabhängig von der Schichtdicke und eignet sich damit als Materialkenngröße.

$$r = \frac{R_S}{t} \quad [\text{Pa s / m}^2]$$

mit:  $t$  Schichtdicke [m]

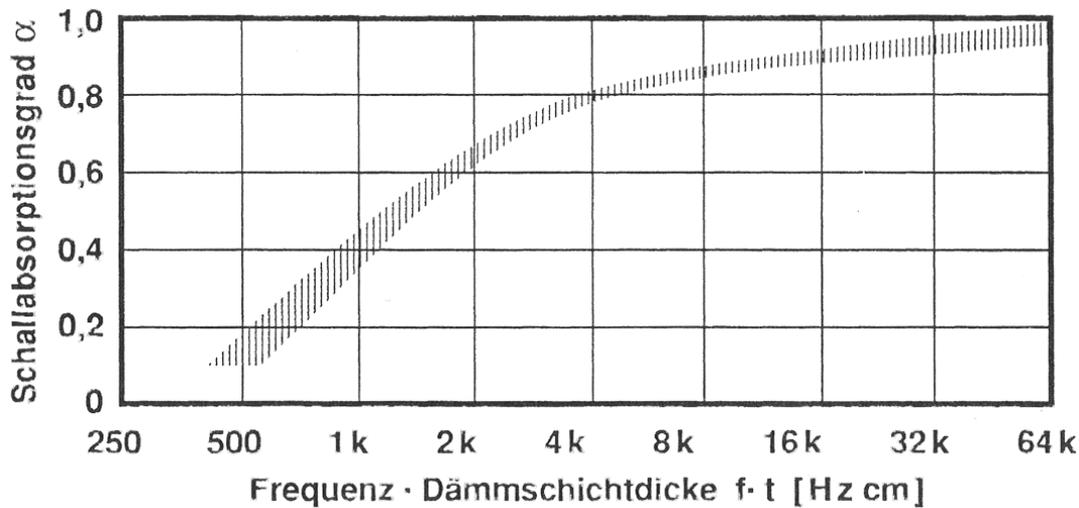
Der Bereich optimaler Anpassung der Stoffkennwerte an das Schallfeld lässt sich näherungsweise eingrenzen:

$$1 \text{ kPa s / m} < R_S < 3 \text{ kPa s / m}$$

Bei einer Unterschreitung der unteren Grenze würde die Schallwelle das Material ohne nennenswerte Beeinträchtigung durchströmen. Durch Reflexion an einer schallharten Rückwand gelangt sie dann mit der gleichen Intensität in den Raum zurück.

Ist der Strömungswiderstand zu hoch, kann die Schallwelle nicht genug in das Material eindringen, der Großteil ihrer Energie würde dann vom Absorber nicht absorbiert, sondern reflektiert.

Liegt der spezifische Strömungswiderstand innerhalb obiger Grenzen kann aus Abb. 16 die benötigte Schichtdicke und der voraussichtliche Absorptionsgrad bei bestimmten Frequenzen hergeleitet werden.

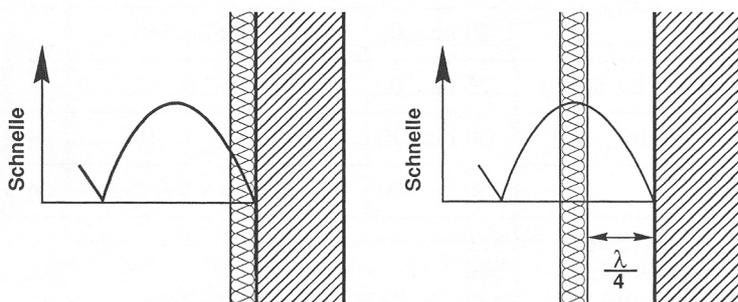


**Abb. 16:** Schematisierter Verlauf des Schallabsorptionsgrades poröser Stoffe bei optimalem spezifischem Strömungswiderstand. [Fasold, Veres, Schallschutz und Raumakustik, 1998, S. 72]

Die Schichtdicke hat, wie man leicht feststellen kann, erheblichen Einfluss auf den Schallabsorptionsgrad.

Mit größer werdender Wellenlänge muss das Absorptionsmaterial immer dicker werden. Für einen Schallabsorptionsgrad  $\alpha = 0,6$  ist bei 1000 Hz eine Schichtdicke von 2 cm nötig, bei einer Frequenz von 100 Hz eine Schichtdicke von 20 cm.

Neben den Materialeigenschaften hat auch die Anbringung der Absorber im Raum Auswirkungen auf den Absorptionsgrad. Da die Reibungsverluste bei hoher Schallschnelle am größten sind, kann durch die Anbringung im Schnellemaximum die Absorptionswirkung zu tiefen Frequenzen hin erhöht werden. Der Ort maximaler Schnelle liegt im Abstand  $\lambda / 4$  vor einer reflektierenden Fläche.



**Abb. 17:** Erhöhung der Wirksamkeit poröser Absorber bei Anordnung im Schnellemaximum. [Fasold, Veres Schallschutz und Raumakustik in der Praxis, 1998, S. 74]

Der benötigte Abstand  $d_L$  zur Wand lässt sich für bestimmte Frequenzen wie folgt berechnen:

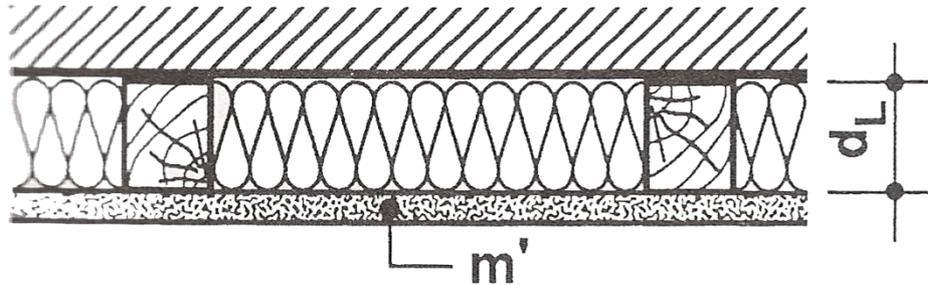
$$d_L = \frac{\lambda}{4} \text{ [m]}$$

Eine Erhöhung der Absorption bei mittleren Frequenzen lässt sich durch eine geschickte Stückerlegung des Absorptionsmaterials, bei der viele freie Kanten entstehen, erreichen. Beugungseffekte an den Kanten führen die Schallwelle zum Absorber hin und erhöhen dadurch die effektive Absorptionsfläche.

### 1.3.2 Plattenresonatoren

Plattenresonatoren sind Feder-Masse Systeme bestehend aus einer festen Platte (Masse) die vor einem abgeschlossenen Luftvolumen (Feder) angebracht ist. Die Schallwellen im Raum regen die Platte zum Mitschwingen an. Die Schallenergie im Raum wird in Bewegungsenergie der Platte umgesetzt.

Schematischer Aufbau eines Plattenabsorbers:



**Abb. 18:** Schematischer Aufbau eines Plattenschwingers. [Fasold, Veres, Schallschutz und Raumakustik, 1998, S. 83]

Die schallabsorbierende Wirkung von Plattenschwingern ist bei ihrer Resonanzfrequenz  $f_0$  am größten.

$$f_0 = 510 \frac{1}{\sqrt{m' d_L}} \quad [\text{Hz}]$$

mit:

$m'$  flächenbezogene Masse [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ]

$d_L$  Wandabstand [ $\text{cm}$ ]

Über die beiden Variablen, flächenbezogene Masse und Wandabstand, lässt sich die gewünschte Resonanzfrequenz einstellen. Jedoch sind beide nicht frei voneinander und beliebig wählbar. Zum einen wirkt das eingeschlossene Luftvolumen nur als Feder, solange die Wellenlänge bei Resonanz klein gegenüber dem Wandabstand ist.

Daraus ergibt sich ein maximaler Wandabstand von:  $d_L \leq \frac{0,28}{f_0} \quad [\text{cm}]$

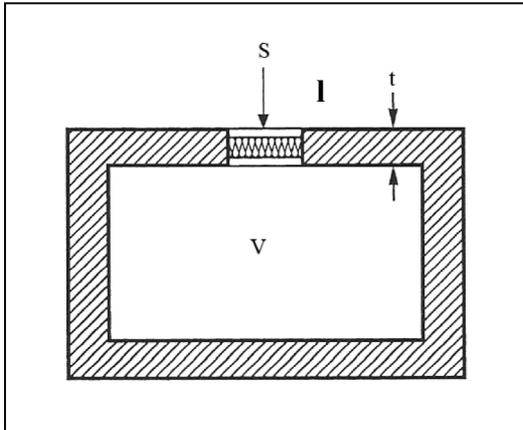
Zum anderen steigt mit zunehmender Masse der Platte die Resonanzschärfe, d. h. der Absorptionsbereich wird enger. Im Normalfall ist jedoch eine möglichst breitbandige Absorption erwünscht.

Der Absorptionsgrad von Plattenschwinger liegt bei der Resonanzfrequenz bei ca. 0,3 bis 0,5 und halbiert sich pro Oktave Abstand. Durch das Einbringen von offenporigem Dämmstoff in den Bereich hinter der Platte kann eine breitere Schallabsorptionskurve mit Spitzenwerten zwischen 0,6 und 0,8 erreicht werden.

Um eine hohe äquivalente Schallabsorptionsfläche zu bekommen, werden Plattenabsorber großflächig an Wänden und Decke verbaut. Durch Variationen der Wandabstände oder der Massen der Platten lässt sich ein breiter Frequenzbereich abdecken.

### 1.3.3 Helmholtzresonatoren

Helmholtzresonatoren stellen neben Plattenabsorbieren ein weit verbreitetes Mittel zur Absorption tiefer Frequenzen dar. Sie bestehen aus einem abgeschlossenen Resonatorvolumen, das über eine Öffnung an das Schallfeld angekoppelt ist. Wahlweise wird in den Resonanzkörper oder die Resonanzöffnung Dämmmaterial eingebracht.



**Abb. 19:** Prinzipdarstellung eines Helmholtzresonators

Die in der Öffnung befindliche Luft schwingt bei diesem Masse-Feder System auf dem im Resonator eingesperrten Luftvolumen. Dem Schallfeld wird durch mehrere Phänomene in einem schmalen Bereich um die Resonanzfrequenz Energie entzogen.

Die durch Resonanz erhöhte Geschwindigkeit der Luftteilchen in der Resonatoröffnung bewirkt große Reibungsverluste und damit eine hohe Absorption. Die Anregung der Luft im Resonatorkörper sowie die der Phasenlage des Schalls entgegengesetzte Resonanz der Luft im Rohr entziehen des weiteren Energie.

Die Resonanzfrequenz des Helmholtzresonators ist abhängig vom Resonatorvolumen, der Tiefe und Fläche des Resonatorhalses sowie dessen Geometrie.

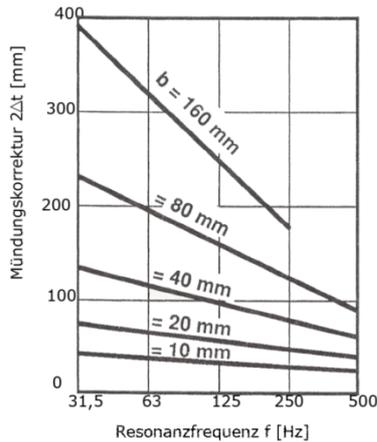
$$f_0 = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{S}{V(l + 2t)}} \quad [\text{Hz}]$$

mit:

- S Fläche des Resonatorhalsquerschnittes [cm<sup>2</sup>]
- V Resonatorvolumen [cm<sup>3</sup>]
- l Resonatorhalsdicke [cm]
- 2 l Mündungskorrektur [cm]

Das Luftvolumen im Resonatorhals regt an seinen beiden Enden die umgebende Luft zum Mitschwingen an, wodurch sich das effektiv schwingende Luftvolumen erhöht. Durch die Mündungskorrektur 2 l wird dieses Zusatzvolumen miteinbezogen. Sie ist abhängig von der Lochgröße und -geometrie, bei Schlitzresonatoren auch von der Resonanzfrequenz. Für den einfachen Fall einer einzelnen, nicht schlitzförmigen Öffnung ist 2 l bei runden Löchern in etwa 0,8 d (d: Durchmesser), bei quadratischen Querschnittsflächen 0,9 a (a: Seitenlänge).

Aus der folgenden Abbildung kann die Mündungskorrektur für schlitzartige Anordnungen abgeschätzt werden.



**Abb. 20:** Mündungskorrektur schlitzförmiger Öffnungen. b=Schlitzbreite

Um eine möglichst hohe und breite Absorption zu ermöglichen, wird Dämmmaterial in den Körper oder die Öffnung eingebracht. Denselben Effekt haben Stoffe, die auf einer oder beiden Seiten der Öffnung angebracht werden. Wichtig für die Anpassung an das Schallfeld ist wie bei den porösen Absorbern ein bestimmter spezifischer Strömungswiderstand.

Dieser berechnet sich in diesem Fall wie folgt:

$$R_s = 2,2 \frac{S}{f_0 V} \quad [\text{kPa s/m}]$$

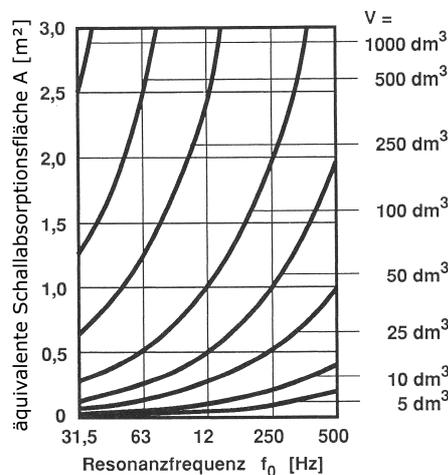
mit:

S Resonatorhalsquerschnittsfläche [cm<sup>2</sup>]

V Resonatorvolumen [cm<sup>3</sup>]

Wie bei allen Schallabsorbern interessiert auch hier natürlich die äquivalente Schallabsorptionsfläche A. Sie ist bei Helmholtzresonatoren stark abhängig von der Positionierung. Bei Positionen mit maximalem Schalldruckpegel lassen sich die besten Ergebnisse erzielen. Man kann davon ausgehen, dass ein in einer Raumkante angebrachter Absorber doppelt soviel absorbiert, wie wenn er in der Mitte einer Wand positioniert wäre, bei der Anbringung in einer Raumecke sogar viermal soviel. Dies ist erklärbar, durch den an diesen Orten herrschenden Druckstau, der höhere Schalldruckpegel mit sich bringt.

Die folgende Grafik zeigt die Äquivalente Schallabsorptionsfläche A eines Helmholtzresonators in Abhängigkeit von Volumen und Frequenz bei Positionierung in der Mitte von Wandflächen.



**Abb. 21:** Äquivalente Schallabsorptionsfläche A von Helmholtzresonatoren bei Resonanzfrequenz.

Über die Beziehung

$$A = 10^{-2} \sqrt{\frac{SV}{l+2l}} k = 6 \cdot 10^{-5} V f_0 k \quad [\text{m}^2]$$

mit:

k Strukturfaktor bei Anbringung:

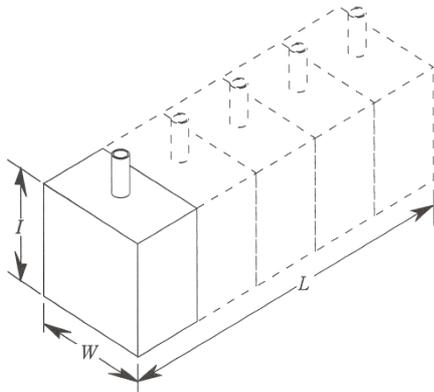
in Wandfläche k=1

in Raumkanten k=2

in Raumecken k=4

lässt sich die Äquivalente Schallabsorptionsfläche auch berechnen.

Reicht das Absorptionsvermögen eines Helmholtzresonators nicht aus, lassen sich auch mehrere davon aneinandersetzen. Bei der so gestalteten Resonatorlinie (oder auch Linienresonator) müssen die Resonanzkörper nicht voneinander getrennt werden. Bei der Planung des Linienresonators muss dann, in den Formeln zur Berechnung der Resonanzfrequenz und des Strömungswiderstandes, das Volumen des Körpers durch die Anzahl der Öffnungen geteilt werden.



**Abb. 22:** Linienresonator.

Helmholtzresonatoren werden gerne verbaut, wenn sich in einem Raum Nischen oder Hohlräume befinden, die ansonsten unnutzbar sind.

## 1.4 Weitere wichtige Raumakustische Größen

### 1.4.1 Bassverhältnis BR

Neben der Nachhallzeit bei mittleren Frequenzen ist der Frequenzgang der Nachhallzeit, insbesondere bei tiefen Frequenzen im Vergleich zu den mittleren von großer Bedeutung. Das Bassverhältnis, d. h. das Verhältnis der Nachhallzeiten bei Oktavmittenfrequenzen von 125 Hz und 250 Hz zu Oktavmittenfrequenzen von 500 Hz und 1000 Hz, errechnet sich somit aus folgender Beziehung:

$$BR = \frac{T_{125\text{Hz}} + T_{250\text{Hz}}}{T_{500\text{Hz}} + T_{1000\text{Hz}}}$$

Für Musik ist ein Bassverhältnis von  $BR \approx 1,0 \dots 1,3$  anzustreben, für Sprache dagegen sollte es höchstens den Wert  $BR \approx 0,9 \dots 1,0$  besitzen.

### 1.4.2 STI (Speech Transmission Index)

Sprachverständlichkeit ist der Schlüssel menschlicher Kommunikation. Für Notfallwarnsysteme, Telekommunikationssysteme, Durchsagesysteme (z. B. in Bahnhöfen) oder allgemein Räume zur Sprachdarbietung (Schulungsräume) verringert eine ungünstige Sprachverständlichkeit nicht nur deren Funktion sondern ist auch sicherheitskritisch.

In vielen Ländern existieren daher gesetzliche Mindestanforderungen an die Sprachverständlichkeit. Für öffentliche Neubauten muss diese daher durch Messungen dokumentiert werden.

Die ersten Messungen der Sprachverständlichkeit basierten auf einer statistischen Analyse von Hörtests. Im Gegensatz hierzu sind die STI-Verfahren gemäß 60268-16 eine objektive Methode.

Es werden spezielle Testsignale aus moduliertem Rauschen verwendet, die die menschliche Sprache besonders gut simulieren.

Die Sprachverständlichkeit wird beeinflusst von:

- Pegel des Sprachsignals
- Frequenzgang
- Nicht-lineare Verzerrungen
- Pegel des Hintergrundgeräuschs
- Qualität des Wiedergabesystems
- Echos (Reflexionen mit einer Verzögerung  $> 100\text{ms}$ )
- Nachhall
- psychoakustische Effekte (Maskierung)

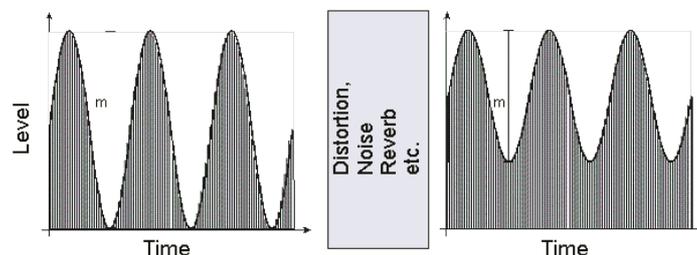


Abb. 23: Moduliertes Rauschsignal ohne (links) und mit Störungen (rechts)

Die **STI**-Methode verwendet 7 Oktavbänder im Bereich 125 Hz bis 8 kHz mit jeweils 14 verschiedenen Modulationsfrequenzen zwischen 0,63 Hz und 12 Hz. Insgesamt werden also für die STI Berechnung 98 Messwerte benötigt. Das arithmetische Mittel aus diesen Werten ergibt den STI Wert. 0 bedeutet, dass keine Sprachverständigung möglich ist. 1 bedeutet eine ideale Sprachverständlichkeit.

		Carrier frequency [Hz]						
		125	250	500	1k	2k	4k	8k
Modulation frequency [Hz]	0,63							
	0,8							
	1							
	1,25							
	1,6							
	2							
	2,5							
	3,15							
	4							
	5							
	6,3							
	8							
	10							
	12,5							

Mit klassischer Messtechnik war dies nur mit einem enormen Zeitaufwand möglich. Aus diesem Grund entstand die **RASTI**-Messung, bei der nur mit zwei Oktavbändern, nämlich 500 Hz und 2000 Hz, gearbeitet wird. Da zudem auch weniger Modulationsfrequenzen verwendet werden, reduziert sich der Aufwand auf 9 Messpunkte.

		Carrier frequency [Hz]						
		125	250	500	1k	2k	4k	8k
Modulation frequency [Hz]	0,63							
	0,8							
	1							
	1,25							
	1,6							
	2							
	2,5							
	3,15							
	4							
	5							
	6,3							
	8							
	10							
	12,5							

**STI-PA** (Speech Transmission Index – Public Access) stellt einen guten Kompromiss aus der aufwendigen STI Methode und der weniger Aussagekräftigen RASTI Methode dar, da diese – genau wie STI – breitbandig (125 Hz – 8 kHz) arbeitet. Bei männlichen Stimmen werden die Bänder 125 Hz und 250 Hz zusammengefasst, bei weiblichen Stimmen entfällt das Band bei 125 Hz komplett. Insgesamt gibt es 12 bzw. 10 Messpunkte, für die die Messung nicht länger als 10s dauern sollte.

		Carrier frequency [Hz]						
		125	250	500	1k	2k	4k	8k
Modulation frequency [Hz]	0,63							
	0,8							
	1							
	1,25							
	1,6							
	2							
	2,5							
	3,15							
	4							
	5							
	6,3							
	8							
	10							
	12,5							

Bei modernen computergestützten Messverfahren erfolgt die Berechnung der STI-Werte aus der Raumimpulsantwort (Verfahren nach Schröder). Dabei werden neben den 98 MTF-Werten häufig die gemittelten MTI-Indizes, sowie STI, RASTI und STI-PA angegeben.

### 1.4.3 Artikulationsverlust $AL_{\text{cons}}$

Der Artikulationsverlust  $AL_{\text{cons}}$  (Articulation Loss of Consonants) bezeichnet die Verschlechterung der Konsonantenverständlichkeit in Abhängigkeit der Nachhallzeit sowie des Hörerabstands zur Schallquelle. STI und  $AL_{\text{cons}}$  können folgendermaßen interpretiert werden:

STI Index	$AL_{\text{cons}}$	Kommentar
0.0-0.3	> 20 %	unverständlich/bad
0.3-0.43	> 11 %	schwach/poor
0.43-0.6	$AL_{\text{cons}} = 8 \dots 11 \%$	angemessen/fair
0.6-0.75	$AL_{\text{cons}} = 3 \dots 8 \%$	gut/good
0.75-1.00	$AL_{\text{cons}} \leq 3 \%$	ausgezeichnet/excellent

Je größer der errechnete Wert, desto schlechter die Konsonantenverständlichkeit.

$$AL_{\text{cons}} \approx 0,652 \left( \frac{r_{\text{QH}}}{r_{\text{H}}} \right)^2 \cdot T\%$$

$r_{\text{QH}}$  Abstand Schallquelle-Hörer  
 $r_{\text{H}}$  Hallradius bzw. Richtentfernung  $r_{\text{R}}$  bei gerichteten Schallquellen  
 $T$  Nachhallzeit in s

Aus obiger Formel ist leicht ersichtlich, dass lange Nachhallzeiten zu einer Erhöhung des Artikulationsverlustes führen, da der Nachhall bei entsprechender Länge für das nachfolgende Nutzsignal wie Störschall wirkt.  $AL_{\text{cons}}$  wird für die 1 kHz oder auch bevorzugt für die 2 kHz Oktave angegeben. Frequenzabhängige Darstellungen sind hier unüblich.

Berechnungen (näherungsweise) zwischen STI und  $AL_{\text{cons}}$ :

$$AL_{\text{cons}} = 10^{\frac{1-\text{STI}}{0,46}}$$

$$\text{STI} = 1 - 0,46 \cdot \log(AL_{\text{cons}})$$

### 1.4.4 C<sub>50</sub> – Deutlichkeitsmaß für Sprache

Mit dem Begriff Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  wird die Verständlichkeit von Sprache oder auch Gesang bezeichnet. Hierbei wird das Verhältnis aus Schallenergie der ersten 50ms und der restlichen Schallenergie - also von 50ms bis  $\infty$  - gebildet. Das Ergebnis wird durch Berechnung des dekadischen Logarithmus als dB-Wert angegeben:

$$C_{50} = 10 \cdot \log \left( \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \text{ dB}$$

In der Regel werden vier Oktaven zwischen 500 Hz und 4000 Hz zur Berechnung verwendet. Damit die Silbenverständlichkeit nicht unter 80% sinkt, sollte bei Oktavmittenfrequenzen um 1000 Hz das Deutlichkeitsmaß  $C_{50} \geq -2$  dB sein. In diesem Fall beträgt die Satzverständlichkeit immer noch etwa 95%.  $C_{50} = -2$  gilt daher als unterer Grenzwert für eine gute Sprachverständlichkeit.

Die Quelle zur Schallfeldanregung sollte dabei die Richtcharakteristik eines Sprecher oder Sängers aufweisen, um die Vergleichbarkeit mit Grenz- oder Richtwerten bezüglich der Verständlichkeit zu gewährleisten.

## 1.5 Schalldämmmaß

Das Schalldämmmaß gibt die Schalldämmwirkung von Türen, Fenstern oder Wänden an. Datenblattangaben werden gemessen, indem ein Hallraum durch den Probanden von einem weiteren Hallraum getrennt wird. Im ersten Hallraum wird durch einen Lautsprecher ein diffuses (nach allen Seiten gerichtetes) Schallfeld mit bestimmtem Pegel erzeugt, im zweiten Hallraum wird der transmittierte Pegel per Mikrofon gemessen.

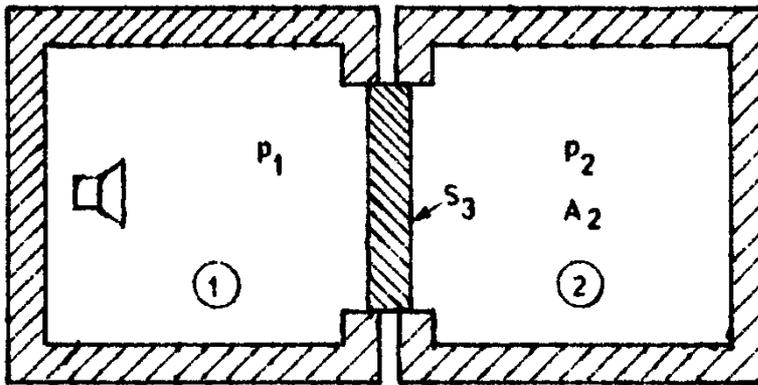


Abb. 23: Zwei Hallräume, getrennt durch Probe der Fläche  $S_3$ .

Das Schalldämmmaß ist das logarithmierte Verhältnis der Schall-Leistung  $P_1$  im Senderaum 1 zur Schall-Leistung  $P_2$  im Empfangsraum 2. Die erzeugte Schall-Leistung im Senderaum ist jedoch bei diffusem Schallfeld nach allen Seiten gerichtet. Daher wird als anregende Schall-Leistung  $P_1$  nur der Anteil verwendet, mit dem die Fläche  $S_3$  des Probanden angeregt wird.

$$P_1 = I_1 S_3$$

Ein Teil der Leistung  $P_1$  wird vom Probanden in den Empfangsraum transportiert. Die eingebrachte Leistung verteilt sich im ganzen Raum, würde aber bei einem theoretisch idealen Hallraum ( $\alpha = 0$ ) von dessen Fläche ständig reflektiert. Da jedoch jeder Raum eine gewisse Absorption besitzt, die als „offene Fensterfläche“ zusammengefasst werden kann, wird die Schall-Leistung im Hallraum 2 sozusagen durch die offene Fensterfläche  $A_2$  entweichen.

$$P_2 = I_2 A_2$$

Daraus kann das Schalldämmmaß  $R$  berechnet werden:

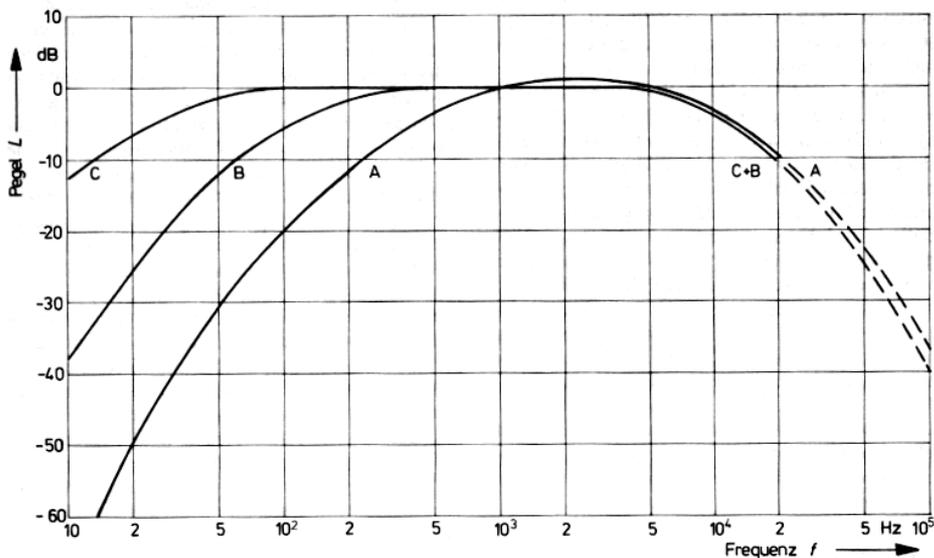
$$\begin{aligned} R &= 10 \log \frac{P_1}{P_2} \text{ dB} = 10 \log \frac{\frac{P_1}{P_0}}{\frac{P_2}{P_0}} \text{ dB} = 10 \log \frac{I_1 \cdot S_3}{I_0 \cdot S_0} \text{ dB} - 10 \log \frac{I_2 \cdot A_2}{I_0 \cdot S_0} \text{ dB} = \\ &= 10 \log \frac{I_1}{I_0} \text{ dB} - 10 \log \frac{I_2}{I_0} \text{ dB} + 10 \log \frac{S_3}{A_2} \text{ dB} = \boxed{L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S_3}{A_2} \text{ dB}} \end{aligned}$$

Das Schalldämmmaß ist also die Pegeldifferenz von beiden Räumen plus einen Korrekturfaktor, der die Fläche  $S_3$  der Dämmung und die offene Fensterfläche  $A_2$  des Empfangsraumes berücksichtigt.

Folgendes gibt es zu beachten:

- Wichtig ist, dass die Schallquelle im Raum 1 genügend weit (nämlich mehr als den Hallradius) von der Dämmung entfernt ist.
- Das Schalldämmmaß ist frequenzabhängig. In der Bauakustik wird üblicherweise zwischen 100 Hz und 3,15 kHz gemessen. Im erweiterten bauakustischen Frequenzbereich wird zwischen 50 Hz und 5 kHz gemessen, aber nicht ausgewertet.
- Tiefe Frequenzen werden meist weniger gut gedämmt als hohe Frequenzen.
- Je schwerer eine einschalige Dämmung ist, desto besser wirkt sie (schwere Türen).
- Mehrschalige Wände erreichen durch die vielen Impedanzsprünge (weich/hart-Übergänge) wesentlich höhere Schalldämmmaße also einschalige Wände.
- Eine kleine Öffnung wie z.B. Schlüsseloch wirkt sich bei gut dämmenden Türen wenig aus. Sie kann als kleine Schallquelle betrachtet werden, die jedoch wegen ihrer geringen Größe nur wenig Energie abgibt.
- Bei hoher Schalldämmung muss man darauf achten, dass man im Empfangsraum nicht den Ruhepegel misst, sondern immer noch darüber liegt.

Vielfach wird mit A-bewertetem Pegel gemessen. Die A-Bewertung sollte hierbei die unterschiedliche Empfindlichkeit des Gehörs bei den verschiedenen Frequenzen, insbesondere im tief-frequenten Bereich berücksichtigen. Dementsprechend wird der Pegel bei 100 Hz z.B. um 20 dB gedämpft.



**Abb. 25:** Dämpfungskurve des A-Bewertungsfilters.

Die A-Bewertung führt jedoch zu einer Problematik, dessen man sich bewusst werden muss:

1. Tiefe Frequenzen werden meist nur schwer gedämmt. Wird der **Gesamtpegel** im Empfangsraum A-bewertet gemessen, so werden ja die gut übertragenen tiefen Frequenzen abgedämpft und man erhält dadurch fälschlicherweise ein sehr gutes Schalldämmmaß (hohe dB-Werte), das sich ja aus der Pegeldifferenz (plus Korrekturfaktor) errechnet.
2. Werden einzelne Terz- oder Oktavpegel im Empfangsraum gemessen und danach der Gesamtpegel berechnet, dann fallen bei A-Bewertung die tiefen Frequenzen ebenfalls mehr oder weniger unter den Tisch, da sich die Summenbildung durch die Logarithmierung am maximalen

Pegel orientiert und geringere Pegel kaum einen Beitrag zum Summenpegel liefern. (Dies wird z.B. beim Nomogramm deutlich, bei dem Pegelunterschiede von 10 dB nichts mehr zum Gesamtpegel beitragen.)

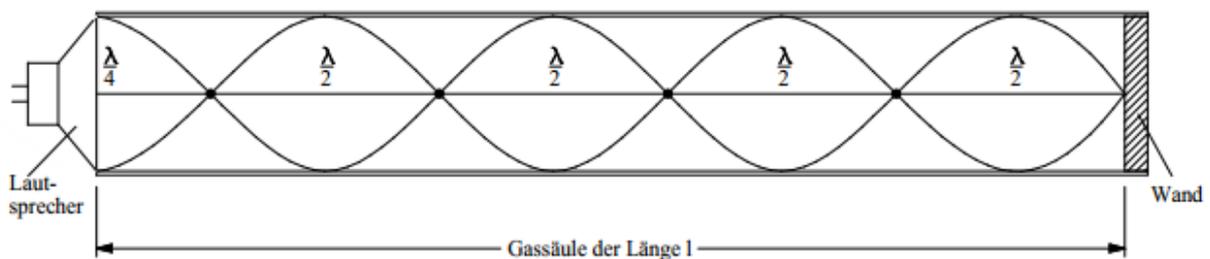
Wegen der besseren Werte werden in Datenblättern fast immer A-bewertete Pegel angegeben. Gute Studiotüren haben Schalldämmmaße von ca. 40 dB(A), gute mehrschichtige Wände erreichen 70 dB(A).

Um obige Problematik zu umgehen, werden die Schalldämmmaße bei verschiedenen Frequenzen gemessen (100, 200, 400, 800, 1600 und 3200 Hz) und daraus durch arithmetische Mittelung ein mittleres Schalldämmmaß  $\bar{R}$  berechnet. (Einziger Fall, bei dem man über dB-Werte mitteln darf.)

$$\bar{R} = \frac{R_{100} + R_{200} + R_{400} + R_{800} + R_{1600} + R_{3200}}{6}$$

## 1.6 Das Kundt'sche Rohr

Das Kundtsche Rohr ist eine gasgefüllte, horizontal liegende Glasröhre. Im einfachsten Fall ist diese lediglich mit normaler Luft gefüllt. Ein Ende des Rohres wird fest verschlossen, vom anderen Ende wird die Gassäule im Rohr mit einem Lautsprecher zum Schwingen angeregt. Damit sind die Randbedingungen für die stehende Welle festgelegt: Am festen Ende muss sich ein Knoten, am Lautsprecher ein Bauch der stehenden Welle befinden (Resonanzfall). In Abb.25 sind die beiden Schwingungszustände maximaler Elongation der stehenden Welle gezeichnet. Zur Überlagerung kommen die vom Lautsprecher nach rechts laufende Welle und die von der Wand nach links laufende reflektierte Welle.



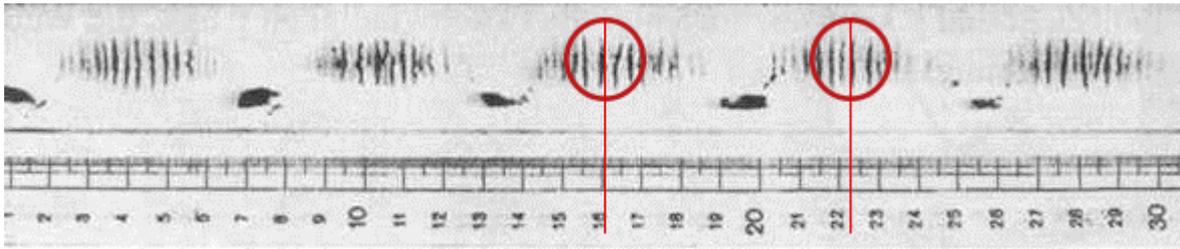
**Abb. 26:** Maximale Elongation der stehenden Welle als Funktion des Ortes

Eine stehende Welle lässt sich also nur für die folgenden Längen  $l$  der Gassäule realisieren:

$$l = n \cdot \lambda/2 + \lambda/4 = (2n+1) \cdot \lambda/4 \quad (n=0,1,\dots)$$

Die optimale Ausbildung der stehenden Welle lässt sich optisch am Verhalten des Korkmehls und akustisch über die maximale Lautstärke (Resonanz) verfolgen. Als Spannungsquelle für den Lautsprecher dient ein Frequenzgenerator, der über ein bestimmtes Frequenzgebiet durchgestimmt werden kann, die Lautstärke des Dauertons lässt sich einstellen.

### 1.5.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Gasen



**Abb. 27:** Korkmehlverteilung im Kundt'schen Rohr bei einer Sinusfrequenz von 2700 Hz

Beim Betrieb des Lautsprechers gerät das Korkpulver an den Stellen in deutlich sichtbare Bewegung, an denen eine intensive Bewegung der Luftteilchen stattfindet (Bewegungsbauch, vgl. rot markierte Bereiche). An den Bewegungsknoten (= Druckmaxima) bleibt das Korkpulver dagegen in Ruhe.

Die beiden Bewegungsbauche haben in diesem Fall (mit einer gewissen Ablesegenauigkeit) einen Abstand von etwa 6,3cm.

Über die Formeln  $c = \lambda \cdot f$  und  $c = 331,5 \text{ m/s} + 0,6 \cdot \vartheta / ^\circ\text{C}$  lässt sich die Schallgeschwindigkeit  $c$  im Gas sowie daraus die momentane Temperatur  $\vartheta$  berechnen.

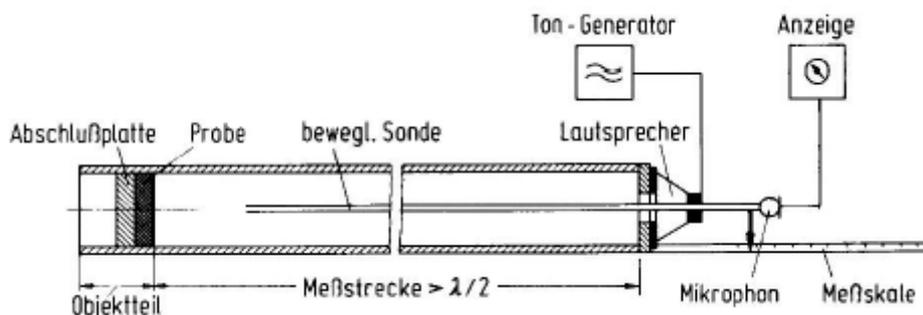
### 1.5.2 Bestimmung des Schallabsorptionsgrades

Neben der Veranschaulichung Stehender Wellen und der Schallgeschwindigkeitsberechnung in verschiedenen Gasen kann das Kundt'sche Rohr auch zur Messungen von Absorptionsgraden verwendet werden.

Hierzu können zwei verschiedene Verfahren angewendet werden:

- Verfahren mit Stehwellenverhältnis
- Verfahren mit Übertragungsfunktion

#### 1.5.2.1 Verfahren mit Stehwellenverhältnis



**Abb. 26:** Messaufbau zur Bestimmungen des Schallabsorptionsgrades im Kundt'schen Rohr

Will man den Schallabsorptionsgrad mittels Stehwellenverhältnis ermitteln ist der Aufbau der Gleiche, wie bei der Ermittlung der Schallgeschwindigkeit in Gasen. Ein Lautsprecher regt die Luftteilchen im geschlossenen Rohr zum Schwingen an. Auf der gegenüberliegenden Seite wird eine Probe des zu messenden Produkts platziert. Abb. 27 zeigt die Schalldruckverläufe ohne und mit absorbierendem Material.

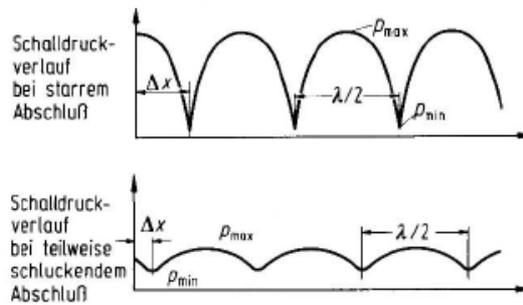


Abb. 27: Schalldruckverläufe im Rohr mit und ohne absorbierendem Material

Misst man nun die Druckminima und -maxima, kann daraus direkt der Schallabsorptionsgrad berechnet werden:

$$\alpha(0) = 4 \cdot \frac{\left| \frac{p_{\max}}{p_{\min}} \right|}{\left( \left| \frac{p_{\max}}{p_{\min}} \right| + 1 \right)^2}$$

### 1.5.2.2 Verfahren mit Übertragungsfunktion

Bei diesem Verfahren werden mit einem Rauschgenerator ebene Wellen im Rohr erzeugt und die Zerlegung des Interferenzfeldes wird durch Messung des akustischen Druckes an zwei festen Orten erreicht. Dabei gibt es 2 Varianten: Entweder sind zwei Mikrofone in der Wand des Rohres befestigt, oder es wird ein einzelnes Mikrophon im Rohr querstehend verschoben. Anschließend wird mit Hilfe von Messsoftware die komplexe akustische Übertragungsfunktion sowie die Absorption bei senkrechtem Schalleinfall und die Impedanzverhältnisse des akustischen Werkstoffes berechnet.

Die Variante mit zwei Mikrofonen ist schneller, besitzt eine hohe Genauigkeit und ist in der Ausführung sehr einfach. Es ist darauf zu achten, dass identische Mikrofone verwendet werden.

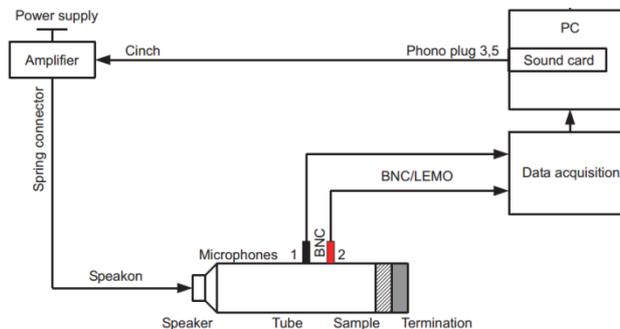


Abb. 27: Verwendung von zwei Mikrofonen beim Verfahren mit Übertragungsfunktion

### 1.5.2.3 Normmessungen mit dem Kundt'schen Rohr

Möchte man Messungen nach Norm durchführen gibt es sehr viele Vorschriften und Richtlinien die zu beachten sind. Unter anderem zählen dazu:

- Das Impedanzrohr muss einen gleichmäßigen Querschnitt besitzen und so stabil und schwer sein, dass es durch das Schallsignal zu keinen Schwingungen kommen kann.
- Die Abmessungen des Rohres sind je auszuwertenden Frequenzbereich verschieden.
- Position und Abstand zwischen den festen Mikrofonen muss mit einer Unsicherheit von ± 0,2mm oder besser bekannt sein.
- Die Temperatur und der Luftdruck im Rohr müssen gemessen werden und konstant (±1 K bzw. ±1 kPa) bleiben. Das Thermometer muss dabei sehr genau arbeiten (±0,5 K).

## 2. Praktischer Teil

Batteriebetriebenen Schallpegelmesser (AL1) nur für Messung einschalten, danach ausschalten.  
Tasten Sie sich an die vorgeschlagenen Verstärkungswerte heran.  
Beachten Sie, dass alles aus dem praktischen Teil prüfungsrelevant ist.

### 2.1 Messung der Nachhallzeit

#### Versuchsziel

In diesem Versuch soll die Nachhallzeit von Studio 1 frequenzabhängig gemessen werden. Es soll die prinzipielle Messprozedur gelernt und ein Eindruck über Frequenzabhängigkeit und Größenordnung der Nachhallzeiten in Studioräumen gewonnen werden.

#### Aufgabenstellung

Messen Sie die Nachhallzeit der Aufnahme 1 bei verschiedenen Frequenzen und diskutieren Sie das Ergebnis.

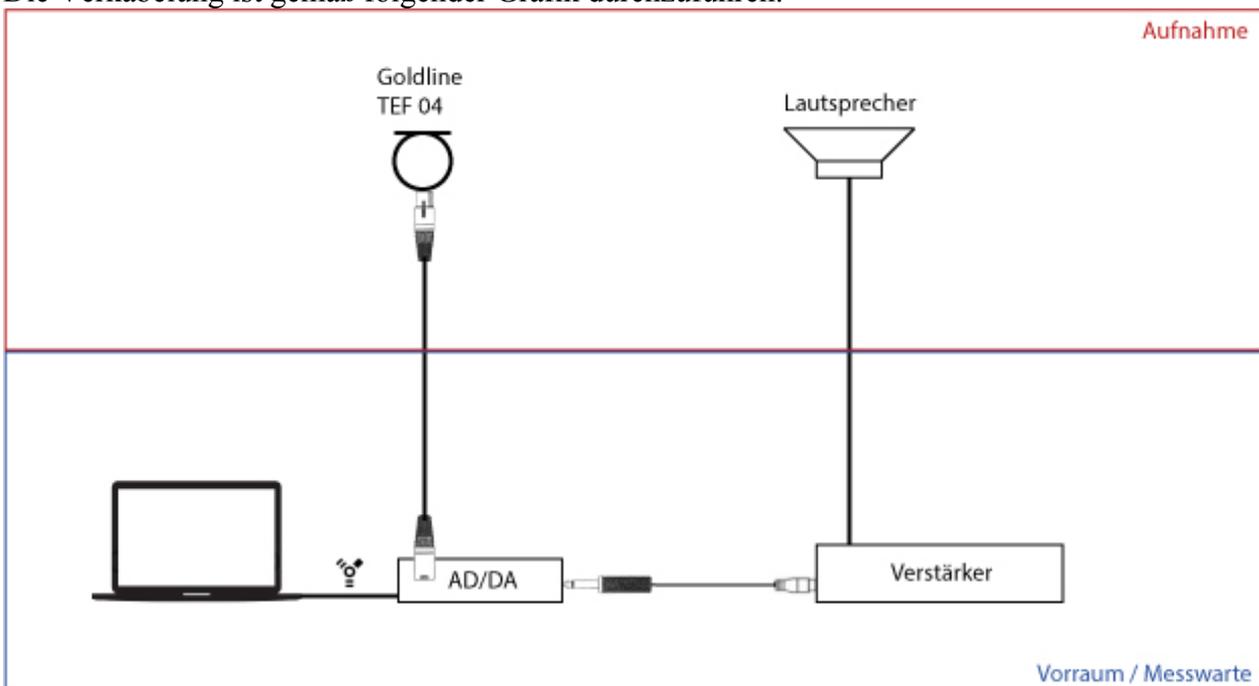
#### Versuchsmaterial

Laptop mit EASERA Pro  
Easera Gateway (AD/DA-Wandler)  
K&H Monoblock (Leistungsverstärker)  
Lautsprecher (Subwoofer und zusätzlicher Hochtöner)  
Messmikrofon (Goldline TEF 04)  
Schallpegelmesser Acoustilyzer AL1 von NTI

#### Versuchsvorbereitung

Alle benötigten Messgeräte werden in die Messwarte ausgelagert. Dadurch wird sichergestellt, dass keine unnötigen Fremdgeräusche, wie z. B. Lüftergeräusche, die Messungen beeinflussen.

Die Verkabelung ist gemäß folgender Grafik durchzuführen.



Für die folgenden Untersuchungen sind zunächst einige Einstellungen in der Messsoftware Easera vorzunehmen:

Nach dem Start des Programms klicken Sie auf den Reiter **Measure**. In den vier angezeigten Feldern können nun alle wichtigen Parameter für die folgenden Messungen ausgewählt werden.

### 1 - Select Measurement Setup:

Stellen Sie hier als Input und Output den *Easera Gateway Driver* ein. (falls nicht bereits ausgewählt)

Als Treiber verwenden Sie den *Asio*-Treiber. (falls nicht bereits ausgewählt)

Kalibrieren Sie anschließend den Hardware Input 1 mit dem *Mikrofonkalibrator*.

Stellen Sie dazu am Easera Gateway den entsprechenden *Inst/Mic Regler* auf 12 Uhr und stecken Sie den Kalibrator auf das Mikrofon. Der eingeschaltete Kalibrator gibt einen 1 kHz-Ton mit einem Schalldruckpegel von 94 dB aus. Nach dem Kalibriervorgang sollten Sie einen Sensitivity Wert zwischen 5 und 30 mV/Pa erhalten. Ist der Wert deutlich niedriger überprüfen Sie, ob am Interface die **48V**-Phantomspannung eingeschaltet ist.

Nehmen Sie nun den Kalibrator wieder ab.

In der **Live**-Ansicht wird Ihnen nun bereits der korrekte aktuelle Pegel angezeigt.

Überprüfen und notieren Sie sich den durchschnittlichen Grundgeräuschpegel in Aufnahme 1. (Tür zur Aufnahme muss geschlossen sein)

Grundrauschen [dB<sub>SPL</sub>]: \_\_\_\_\_

### 2 - Choose Stimulus Setup:

Hier wird das Messsignal ausgewählt und wichtige Parameter festgelegt.

Für die Nachhallzeitenmessung verwenden Sie *Log-Sweep* mit einer Länge von 341ms.

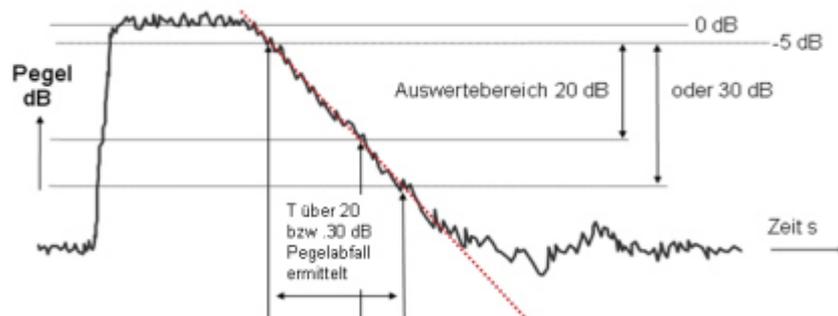
(Sampling Rate: 96 kHz)

### 3 - Adjust Levels – No Mixer (Asio):

Hier können Sie das Test Signal abspielen lassen und den Pegel einstellen. Standardmäßig ist hier die Einheit db<sub>FS</sub>, dies können Sie aber durch einen Klick auf *Unit* auch umstellen.

Stellen Sie einen zu hohen Pegel ein, wird dies durch eine rote Linie dargestellt (Clipping).

Da die Nachhallzeit (EDT, T10, T20, **T30**) prinzipiell wie in der folgenden Grafik gemessen wird, muss ein ausreichend hoher Signalpegel eingestellt werden. Denken Sie hier an das oben notierte Grundrauschen! Beachten Sie hier den Wert "RMS"



T30: Noise + 35 dB + Reserve (ca. 10 dB) = \_\_\_\_\_ dB (RMS)

### 4 - Start Measurement:

Im letzten Fenster kann die Benennung der Dateien geändert oder Einstellungen für die Automatisierung von Messungen gemacht werden.

**Messpositionen**

Je nach Position des Lautsprechers und des Mikrofons variiert die gemessene Nachhallzeit, daher sollen insg. mindestens 6 LS-Mik.-Kombinationen (z.B. 2 verschiedene LS-Positionen mit je 3 unterschiedlichen Mikrofonpositionen) gemessen werden. Die Abstände von Mikrofon und LS zu den Wänden dabei min.  $\lambda/4$  der niedrigsten Frequenz betragen.

Richtwert 100 Hz:  $\lambda/4 = \underline{\hspace{2cm}}$  m

Das Mikrofon zeigt trotz omnidirektionaler Ausrichtung stets in Richtung Schallquelle!

Keine Mikrofonposition darf zu nahe an einer Senderposition liegen, damit ein zu starker Direkt-schall-Einfluss vermieden wird. Der Mindestabstand,  $d_{min}$  in Meter, kann wie folgt berechnet werden:

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot \hat{T}}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m}$$

V: Volumen (120 m<sup>3</sup>)

c: Schallgeschwindigkeit (340 m/s)

$\hat{T}$ : Schätzwert d. erwarteten Nachhallzeit

**Versuchsdurchführung**

Messen Sie mindestens 6 LS-M-Kombinationen. Gehen Sie dazu in das **Start Measurement** Menü und aktivieren Sie *Auto Increment*. Speichern Sie die Messungen auf dem Desktop unter einem neuen Ordner (Bezeichnung: Gruppennummer).

Es öffnet sich ein neuer Reiter (**View & Calc**), in dem Ihnen die Raumimpulsantwort angezeigt wird. Stellen Sie das Mikrofon/ den Lautsprecher um und starten Sie eine neue Messung, indem Sie die Taste **F5** drücken. Die Messungsnummer wurde bereits automatisch inkrementiert. Aktivieren Sie die Checkbox *Add New Measurement to Overlay* und anschließend starten Sie die Messung mit *Go!* Wiederholen Sie diese Arbeitsschritte.

Vergleichen Sie die 6 Messungen. Wählen Sie im oberen Drop-Down Menü (Neben dem Button **File**) jeweils eine Messung aus.

Die Ergebnisse finden Sie unter dem Reiter **View & Calc**. Links neben dem Diagramm mit dem Impuls Response können Sie unter dem Reiter *Graphs Calculation/Schröder RT* auswählen. Oberhalb des Diagramms können Sie sich durch einen Klick auf den Button *Octaves* alle Pegelverläufe anzeigen lassen. Im Dropdown-Menü rechts davon wählen Sie die einzelnen Oktaven nacheinander aus, damit Sie unter dem Reiter *Details* die aus der Impulsantwort berechneten Nachhallzeiten (**T30**) ablesen und in die untere Tabelle eintragen können.

Um eine optimale Aussage über den Raum machen zu können, bilden wir als nächstes Mittelwerte aus den 6 Messungen:

<b>T30</b>	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
1						
2						
3						
4						
5						
6						
Ø						

Was fällt Ihnen bei diesen Ergebnissen auf?

Berechnen Sie aufgrund ihrer Messergebnisse ( $\emptyset$  Easera-Messungen) die offene Fensterfläche A (Raumvolumen: 120 m<sup>3</sup>) und den durchschnittlichen Schallabsorptionsgrad  $\bar{\alpha}$  (Raumoberfläche: 160 m<sup>2</sup>) des Raumes.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
A in m <sup>2</sup>						
$\bar{\alpha}$						

Bestimmen Sie die Nachhallzeiten zusätzlich mit dem Schallpegelmesser Acoustilyzer AL1 von NTI. Der Messraum Aufnahme 1 wird über die Lautsprecher mit rosa Rauschen beschallt. Nachdem der Raum mit Schallenergie gefüllt ist, wird das Messsignal abgeschaltet. Der AL1 erkennt diese Abschaltung und misst die Nachhallzeit. Gehen Sie für die Messung wie folgt vor:

- Schließen sie an der momentanen Mikrofonposition das NTi-Messmikro an. Den AL1 schließen Sie in der Messwarte anstatt des Interfaces an.
- Schalten Sie den AL1 durch Drücken der rechten gelben Taste ein.
- Aktivieren Sie in der oberen linken Menüleiste die Messfunktion RT60 für die Nachhallzeitmessung. Wechseln Sie in die Pegel-Live-Ansicht.
- Wählen Sie RANGE und drücken Sie die Enter-Taste, damit das Gerät den Umgebungs-Lärmpegel ohne Messsignal aufnehmen kann. Das SET RANGE Anzeigefeld erscheint. Bestätigen Sie die automatische Bereichseinstellung mit OK. Nun sind die unteren und oberen Messmarkierungen gesetzt. Diese zeigen den max. zulässigen Umgebungslärm (untere Markierung) sowie den minimal notwendigen Pegel des rosa Rauschens (obere Markierung) an.
- Schalten Sie dasjenige rosa Rauschsignal an, dessen Ein/Aus Intervallzeit auf den Raum angepasst ist (große Räume  $\rightarrow$  längere Intervallzeit). Für den Aufnahmeraum ist der Track 13 der Acoustilyzer Audio CD passend. (Siehe V6-Raumakustik Ordner)
- **ACHTUNG: Starten Sie mit einem niedrigen Schallpegel !!!**
- Erhöhen Sie nun den Testpegel so lange, bis er in allen Oktavbändern über der oberen Testmarke liegt (evtl. Gehörschutz tragen). (Verstärker: ca. 6, Main Level: 12 Uhr)
- Start der RT60 Messung: Selektieren Sie das START Symbol und drücken Sie die Enter-Taste, um die RT60 Messung zu starten. Die Statusanzeige schaltet um auf ARMED. Schalten Sie die Wiedergabe des Testsignales ein (z.B. über VLC Player).
- Führen Sie mehrere Messzyklen durch (min. 10), um eine arithmetische Mittelung der Messergebnisse zu ermöglichen. Schalten Sie das Testsignal aus, sobald genügend Messzyklen ausgeführt sind. Die Haken links neben den Oktavbändern geben an, ob beim entsprechenden Messzyklus die jeweiligen Oktavbänder erfolgreich gemessen werden konnten (evtl. Wiederholung mit höherer Lautstärke erforderlich).
- Die Ergebnisse der RT60 Messung können sie in der RT60 Detailanzeige ablesen. Drücken Sie dazu gleichzeitig die gelbe ESC-Taste und die linke/rechte Pfeiltaste am AL1. Notieren Sie die gemessenen Nachhallzeiten ebenfalls in der Tabelle.

**Versuchsauswertung**

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
T [s]						

## 2.2 Betrachtung der Qualität des Aufnahmeraumes

### Versuchsziel

Feststellung der Qualität des Aufnahmeraums anhand Raumakustischer Parameter.

### Aufgabenstellung

Ermittlung des STI, Berechnung des Artikulationsverlusts sowie des Bassverhältnisses.

### Versuchsmaterial/-aufbau

Easera Messdaten (Messungen 1 bis 6)

### Versuchsdurchführung

Wählen Sie der Reihe nach ihre Messungen in EASERA aus, lassen Sie sich unter *Calculation/STI, STIPa, RaSTI* den jeweiligen STI-Wert anzeigen und notieren Sie sich die STI-Werte. Bilden Sie anschließend den Zentralwert und berechnen Sie anhand dieses Werts den Artikulationsverlust. Berechnen Sie auch das Bassverhältnis. Verwenden Sie dazu die Ergebnisse aus ihrer Nachhallzeitenmessung mit dem AL1-Pegelmesser.

### Fragen zum Versuch

- Wie bewerten Sie die Sprachverständlichkeit des Aufnahmeraums?
- In EASERA können Sie feststellen, dass es zwischen STI(male) und STI(female) einen geringen Unterschied gibt. Wodurch kommt dieser zustande?
- In der Software können Sie sich auch die Deutlichkeitsmaße C50 (Sprache) bzw. C80 (Musik) anzeigen lassen. Worauf müssen Sie hier jedoch achten?

## 2.3 Betrachtung von Raummoden

### Versuchsziel

Anhand dieses Versuchs sollen die Auswirkungen von Raummoden auf die Schallübertragung in Räumen veranschaulicht werden. Es wird gelernt, wie man Raummoden am besten anregt und misst sowie in welcher Form sie auftreten.

### Aufgabenstellung

Regen Sie den Raum mit einem Sinussweep von 20 Hz bis 500 Hz an und messen Sie die Raumantwort.

### Versuchsmaterial/-aufbau

Laptop  
Easera Gateway  
Messmikrofon  
Verstärker + Dodekaeder

Adobe Audition CS 6

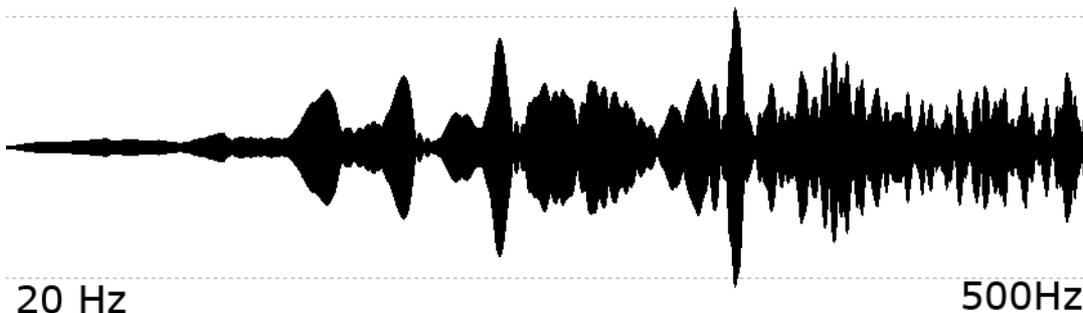
### Versuchsvorbereitung

Klemmen Sie den Hochtöner ab und positionieren Sie den Tieftöner in der hinteren rechten Raumecke (neben der Heizungsverkleidung) ohne Stativ am Boden, so dass die Öffnung des Lautsprechers in die Ecke zeigt. Stellen Sie das Mikrofon auf dem Stativ in der Raummitte auf.

### Versuchsdurchführung

- Importieren Sie den Sinussweep aus dem Projektordner in eine Tonspur.
- Erzeugen Sie eine weitere Tonspur zur Mikrofonaufnahme wie in Versuch.
- Drehen Sie den Verstärkungsregler auf **3** und den Drehknopf Main Level auf 12 Uhr.
- Stellen Sie den Input Gain auf 12 Uhr.
- Geben Sie den Sinussweep über den Lautsprecher wieder und zeichnen Sie simultan das Mikrofonsignal auf.
- Betrachten Sie das aufgenommene Signal in der Bearbeiten-Ansicht.

*Ergebnis: Die Wellenform der Aufnahme wird in etwa so aussehen (Bsp. eines anderen Raums):*



- Bereiten Sie einen anderen Track zur Aufnahme vor
- Stellen Sie das Mikrofon an eine andere Position z.B. neben dem Eingang und messen Sie erneut.

### Fragen zum Versuch

- Was können Sie der Wellenform entnehmen?
  - 
  - 
  - 
  -
- Was bewirkt die Aufstellung des Lautsprechers in der Raumecke?
- Was machen Sie im einfachsten Fall, wenn Sie in einer Aufnahme resonante Erhöhungen feststellen?

## 2.4 Bestimmung des Schalldämmmaßes der Studiotüre

### Versuchsziel

In diesem Versuch soll das Schalldämmmaß einer Studiotüre ermittelt werden. Der Studierende lernt die prinzipielle Messprozedur, Besonderheiten und Frequenzabhängigkeit des Schalldämmmaßes sowie den Unterschied zwischen linearer und A-bewerteter Messung.

### Aufgabenstellung

Ermitteln Sie das Schalldämmmaß der Türe zum Aufnahmezimmer 1, indem Sie die Lautsprecherquelle in den Vorraum stellen und vor und hinter der Türe den Schallpegel linear und A-bewertet messen.

### Versuchsmaterial

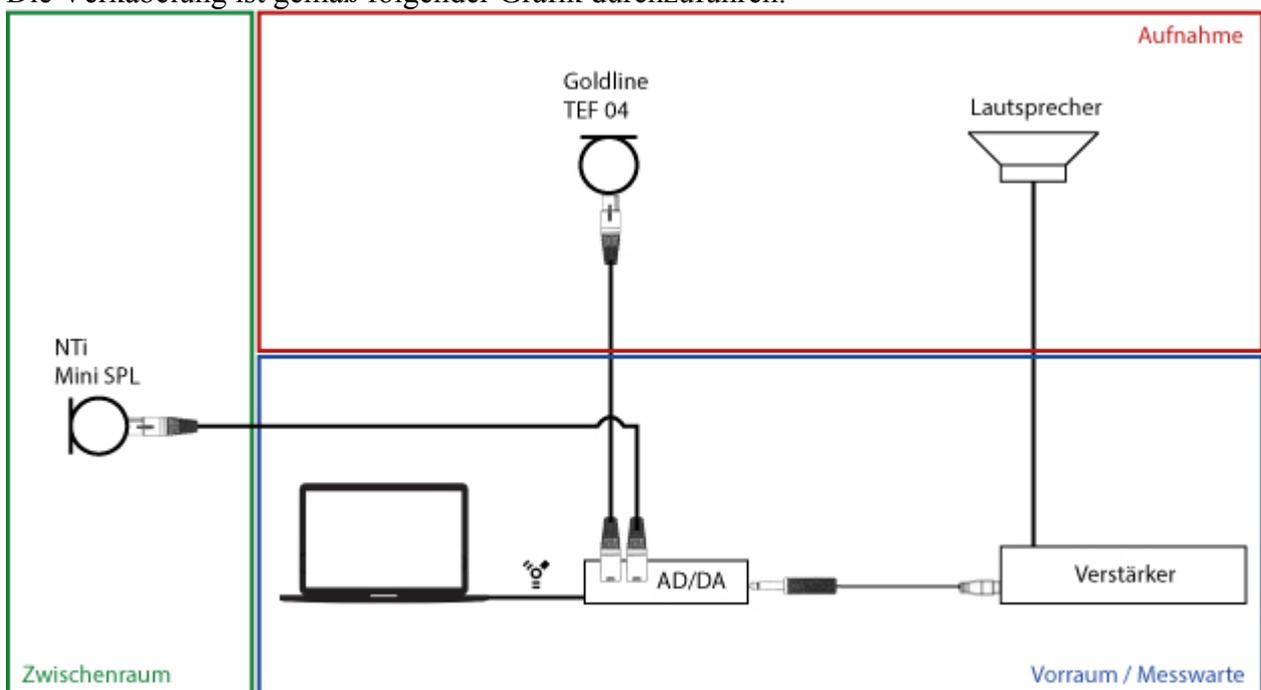
- Laptop mit EASERA Pro
- Easera Gateway (AD/DA-Wandler)
- Leistungsverstärker
- Dodekaeder
- 2 Messmikrofone (TEF04 und MiniSPL)

### Versuchsvorbereitung

Beachten Sie, dass Sie das zweite Mikrofon natürlich ebenfalls zuerst kalibrieren müssen. Um den Korrekturfaktor für das Schalldämmmaß korrekt für jede Oktave bestimmen zu können, messen Sie die Nachhallzeit im Vorraum (Eine einzige Messung soll uns hier mal reichen) und daraus dann die offene Fensterfläche ( $V_{\text{Empfangsraum}}: 40 \text{ m}^3, S_3: 2\text{m}^2$ )

T <sub>125 Hz</sub> :	<input type="text"/>	A <sub>125 Hz</sub> :	<input type="text"/>
T <sub>250 Hz</sub> :	<input type="text"/>	A <sub>250 Hz</sub> :	<input type="text"/>
T <sub>500 Hz</sub> :	<input type="text"/>	A <sub>500 Hz</sub> :	<input type="text"/>
T <sub>1 kHz</sub> :	<input type="text"/>	A <sub>1 kHz</sub> :	<input type="text"/>
T <sub>2 kHz</sub> :	<input type="text"/>	A <sub>2 kHz</sub> :	<input type="text"/>
T <sub>4 kHz</sub> :	<input type="text"/>	A <sub>4 kHz</sub> :	<input type="text"/>
T <sub>ges</sub> :	<input type="text"/>	A <sub>ges</sub> :	<input type="text"/>

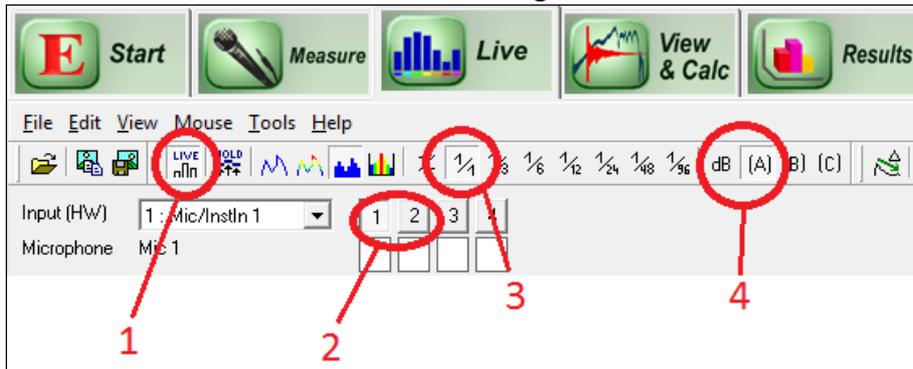
Die Verkabelung ist gemäß folgender Grafik durchzuführen.



**Versuchsdurchführung**

Platzieren Sie den Dodekaeder in etwa mittig im Aufnahmeraum und Mikrofon 1 nahe an der Studiotür. Mikrofon 2 stellen Sie im Vorraum etwa mittig auf.  
Geben Sie Rosa Rauschen als Dauersignal (20s genügen) über den Lautsprecher wieder.

Messen Sie den Pegel im Aufnahmeraum linear (FLAT) und im Vorraum sowohl linear (flat) als auch mit A-Bewertung. Achten Sie dabei darauf, dass im Vorraum noch genügend Restpegel vorhanden ist und Sie nicht das Grundrauschen mit messen (vorher Grundpegel messen, Lautstärke erhöhen bis Sie im Empfangsraum 10 dB darüber liegen). Lesen Sie die Pegel über die Anzeige der Echtzeit-Oktavanalyse *1/1* (**Live-Ansicht**) bei der jeweiligen Frequenz ab. Folgender Screenshot wird Ihnen bei den Einstellungen helfen:



- 1: Live Ansicht
- 2: Auswahl von Mikrofon 1 bzw. 2
- 3: Darstellung der Oktavpegel
- 4: Flat oder A-Bewertung

Um sich das Ablesen der momentanen Pegel zu erleichtern, kann man links neben dem Spektrum im Bereich *Time* eine Mittelung von 2,7s einstellen (*Averages*).  
Tragen Sie die Oktavpegel und die Gesamtpegel ein und berechnen Sie das Schalldämmmaß bei den einzelnen Frequenzen mit der auf vorheriger Seite ermittelten offenen Fensterfläche  $A_2$ .  
Es wird angenommen, dass die Schalldämmung der Wände wesentlich größer ist als die der Türe.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	Full
Pegel $L_1$ (flat)							
Pegel $L_2$ (flat)							
Pegel $L_2$ (A)							
<b>R (flat)</b>							
<b>R (A)</b>							

Nebenrechnungen:

## Fragen zum Versuch

- Warum muss der Lautsprecher so weit von der Türe weg?
  
- Warum muss das Mikrofon 1 (im Aufnahmeraum) nicht exakt an der Türe stehen?
  
- Wie weit muss Mikrofon 2 mindestens von der Türe weg sein?
  
- Besitzt der Vorraum einen größeren oder kleineren Hallradius als der Aufnahmeraum?
  
- Wie könnte man das Schalldämmmaß der Türe erhöhen?
  
- Wieso A-Bewertung? Wie sieht die A-Bewertungs-Kurve in etwa aus?

## 2.5 Bestimmung der Raumtemperatur mit Hilfe des Kundt'schen Rohres

### Versuchsziel

In diesem Versuch soll die aktuelle Raumtemperatur mit Hilfe eines Kundt'schen Rohres anstatt eines handelsüblichen Thermometers gemessen werden. Der Studierende lernt dabei die einfache Verkabelung und Verwendung von Signalgenerator, Lautsprecher, Mikrofon sowie Oszilloskop. Zudem wird der Effekt der Überlagerung von hin- und rücklaufender Welle veranschaulicht.

### Aufgabenstellung

Ermitteln Sie die aktuelle Raumtemperatur in Aufnahme 1, indem Sie zunächst stehende Wellen im Kundt'schen Rohr erzeugen und dann die Schalldruckminima mit Hilfe des angeschlossenen Mikrofons lokalisieren. Bei gegebener Wellenlänge und Frequenz lässt sich somit die Schallgeschwindigkeit und daraus die Umgebungstemperatur errechnen.

### Versuchsmaterial

Signalgenerator Tektronix AFG 3022B

Oszilloskop Tektronix TDS 2004B

Kundt'sches Rohr mit integriertem Lautsprecher

Mikrofon

Anschlusskabel und Adapter

### Versuchsvorbereitung

Schließen Sie den Lautsprecher am Signalgenerator (CH 1) an. Dazu benötigen Sie ein BNC Kabel, einen BNC-Bananenstecker-Adapter, sowie 2 Bananenstecker-Kabel (rot und schwarz). Verbinden Sie außerdem das Oszilloskop via BNC-Klinken-Kabel mit dem Mikrofon (CH 1).

### Versuchsdurchführung

- Schalten Sie beide Geräte ein.

- Stellen Sie am Signalgenerator zunächst die Frequenz 1.5 kHz (Sinusfunktion) ein. Die Amplitude sollte 1.0 Vpp betragen. Dadurch wird ein ausreichend hoher Pegel erzeugt.

- Berechnen Sie die korrekte Gassäulenlänge bei 1.5 kHz, wenn Sie 3 Knotenpunkte erzeugen wollen und verschieben Sie den Kolben auf den entsprechenden Abstand (nehmen Sie dazu zunächst eine Schallgeschwindigkeit von 340 m/s an).

- Schieben Sie den Schalter am Mikrofonkabel auf „On“ und drücken Sie anschließend den Knopf „Autorange“ am Oszilloskop. Sie sollten nun bereits eine saubere Sinusfunktion erkennen können. Ist dies nicht der Fall, verschieben Sie das Mikrofon.

- Mit der Taste „Autoset“ können Sie sich am Oszilloskop direkt die Werte für U<sub>ss</sub> anzeigen lassen (Spannung Spitze-Spitze)

- Jeder Student verschiebt das Mikrofon von links nach rechts und notiert sich die Abstände der Spannungsminima

- Bilden Sie aus allen Abständen das arithmetische Mittel und berechnen Sie mit diesem Ergebnis die Schallgeschwindigkeit und daraus die aktuelle Zimmertemperatur.

**\* 3. Fragen und Aufgaben zum theoretischen Teil (Vorbereitungsfragen)**

- Welche Arten von Raummoden kennen Sie?

- Berechnen Sie die 3 ersten axialen Moden eines 8,5 x 4,9 x 3 m großen Raums.

Mode	Länge	Breite	Höhe
Grundmode Hz			
2. Mode Hz			
3. Mode Hz			

- Berechnen Sie nach Sabine die Nachhallzeiten der angegebenen Oktavbänder für einen Raum mit den Maßen: L x B x H: 7,1 m x 4,9 m x 3 m

Boden: Teppich  
 Decke: Beton  
 Wände: Gipskarton

Absorptionseigenschaften der Materialien:

F	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
BETON	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
TEPPICH	0,03	0,04	0,06	0,2	0,3	0,4
GIPSKARTON	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08

Teilflächen: Boden = m<sup>2</sup>  
 Decke = m<sup>2</sup>  
 Wände = m<sup>2</sup>  
 Volumen = m<sup>3</sup>

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
A Beton [m <sup>2</sup> ]						
A Teppich [m <sup>2</sup> ]						
A Gips [m <sup>2</sup> ]						
A gesamt [m <sup>2</sup> ]						

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
T=0,163·V/A	s	s	s	s	s	s

- In einem kleineren Raum mit einem Volumen von  $120\text{m}^3$  wird eine Nachhallzeit von  $T_{1\text{kHz}} = 0,5\text{s}$  gemessen. Reicht die Qualität des Raumes aus um aus  $2,5\text{m}$  Entfernung einen geübten Sprecher zu verstehen? Berechnen Sie dazu  $AL_{\text{cons}}$  und den STI.

- Im Senderraum herrscht ein Pegel von  $100\text{dB}$ . Im Empfangsraum kommen nur noch  $65\text{dB}$  an. Die Tür zwischen beiden Räumen ist  $2\text{m}$  hoch und  $1\text{m}$  breit. Im Empfangsraum ( $200\text{ m}^3$  Volumen) wurde eine Nachhallzeit von  $1,3\text{s}$  gemessen. Berechnen Sie das Schalldämmmaß der Tür.

- Berechnen Sie den Absorptionsgrad (in %), wenn im Kundt'schen Rohr Schalldruckpegel von  $75\text{ dB}$  als Maximum bzw.  $65\text{ dB}$  als minimaler Wert gemessen werden.