

# Mit Physik den Klang verbessern: Raumakustik als Kontext für den Unterricht

Rainer Müller, TU Braunschweig

## 1. Einleitung

Wenn sich im Physikunterricht die Gelegenheit bietet, ein Thema aufzugreifen, das die Schülerinnen und Schüler auch in ihrem Alltag interessiert, sollte man dies nicht versäumen. Eine bisher wenig beachtete Möglichkeit dazu soll im vorliegenden Artikel vorgestellt werden: die Optimierung des Musikhörens durch Verbesserung der Raumakustik. Für viele Schülerinnen und Schüler ist das Hören von Musik ein wichtiges Identifikationsthema. Im Oberstufenalter sammeln die meisten erste Erfahrungen mit der eigenen Stereoanlage und bauen sich vielleicht sogar eigene Lautsprecher. Jede Möglichkeit zur Verbesserung des Klangs ist bei begrenztem Budget willkommen.

Die Gestalt eines Zimmers verändert den Klang der Musik. Das ist die Grundaussage der Raumakustik. Recherchiert man im Internet, so stellt man schnell fest, dass das Gebiet von den Hifi-Enthusiasten als eine Art Geheimwissenschaft betrachtet wird, die nur wenigen Eingeweihten zugänglich ist. Dieser Eindruck trägt allerdings. Zum grundlegenden Verständnis der raumakustischen Phänomene sind nur Inhalte erforderlich, die Bestandteil jedes Oberstufenlehrplanes sind – im Wesentlichen geht es um stehende Wellen. Diese Passung zwischen interessantem Alltagskontext und dem Lehrplaninhalt macht das Thema für den Unterricht interessant. Im Folgenden sollen die Zusammenhänge so dargestellt werden, dass sie das Verständnis der physikalischen Inhalte mit dem praktischen Nutzen verbinden. Oft kann man schon mit relativ geringem materiellem Aufwand deutliche Klangverbesserungen an der heimischen Stereoanlage erzielen – ein willkommener Nebeneffekt der Beschäftigung mit physikalischen Inhalten.

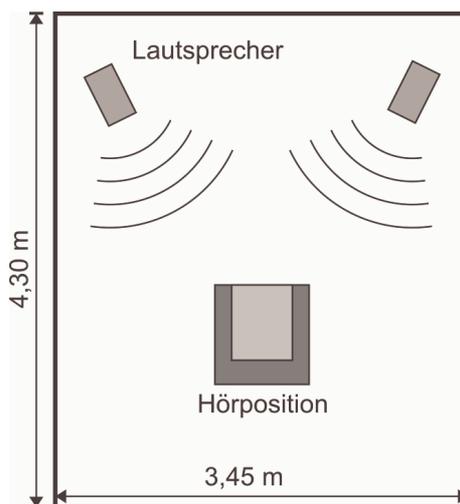


Abbildung 1: Hörraum mit zwei Lautsprechern

Vor der inhaltlichen Diskussion ist noch eine Erläuterung des Begriffs „Raumakustik“ nötig: Es soll in diesem Artikel um die Akustik *kleiner* Hörräume gehen (vgl. Abbildung 1), nicht um Konzerthallen. Die kleinen Räume sind erstens der Erfahrungswelt der Schülerinnen und Schüler näher, zweitens haben die dabei auftretenden Probleme den schon erwähnten Vorzug, sehr gut auf die Inhalte der Schulphysik zu passen und drittens ist die Optimierung kleiner Räume auch wesentlich einfacher als die

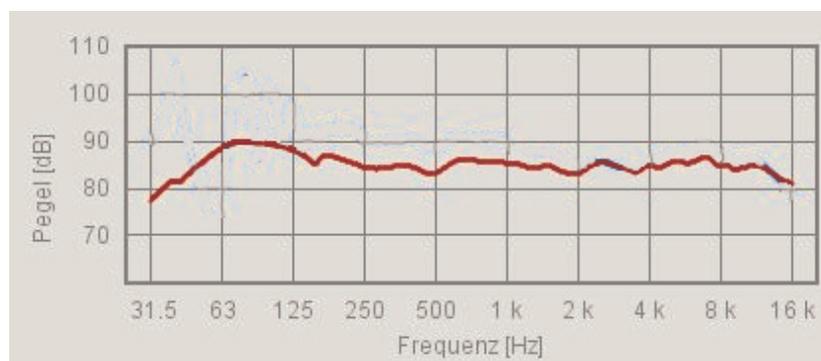
von Konzerthallen (wo es darum geht, an *jeder Stelle* im Saal ein befriedigendes Hörerlebnis zu erzielen). Ein lesenswertes Standardwerk zur Akustik kleiner Hörräume ist das „Master Handbook of Acoustics“ von F. Alton Everest [1], dem viele der hier beschriebenen Lösungsvorschläge entstammen.

Weiterhin beschränken wir uns auf die Musikwiedergabe in Stereo. Surroundanlagen sind akustisch wesentlich schwieriger zu optimieren, was auch einer der Gründe dafür sein dürfte, dass sie sich im audiophilen Bereich bisher nicht durchgesetzt haben.

## 2. Probleme mit der Raumakustik

Obwohl Musikfans viel Wert auf die gute Musikwiedergabe legen, ist kaum jemandem bewusst, wie groß der Einfluss des Raumes auf den Klang ist. Allgemein verbreitet ist die Vorstellung: Was aus dem Lautsprecher herauskommt, kommt auch am Ohr an. Oder: Besitzt man eine gute Stereoanlage, so ist der gute Klang automatisch garantiert. Beide Auffassungen sind im Allgemeinen *falsch*. Warum das so ist und was die physikalischen Gründe dafür sind, soll im Folgenden gezeigt werden.

Ein flacher Frequenzgang, d. h. die „gleich laute“ Wiedergabe aller Frequenzen, ist eines der grundlegenden Ziele einer naturgetreuen Musikwiedergabe. Die Konstrukteure von Hifi-Komponenten sind in dieser Hinsicht schon recht erfolgreich. Für die Lautsprecher, mit denen die nachfolgend beschriebenen Messungen durchgeführt wurden, ist der im Testlabor ermittelte Frequenzgang in Abbildung 2 gezeigt. Abgesehen von dem durch die begrenzte Gehäusegröße bedingten Bassabfall und einer von den Entwicklern sicherlich beabsichtigten Anhebung zwischen 60 und 100 Hz ist der Frequenzgang verhältnismäßig flach, die Schwankungen betragen nur wenige Dezibel.<sup>1</sup> Alle anderen Hifi-Komponenten (CD-Spieler, Verstärker) haben üblicherweise noch viel flachere Frequenzgänge. Damit ist in Abbildung 2 das dargestellt, was „aus dem Lautsprecher herauskommt“.



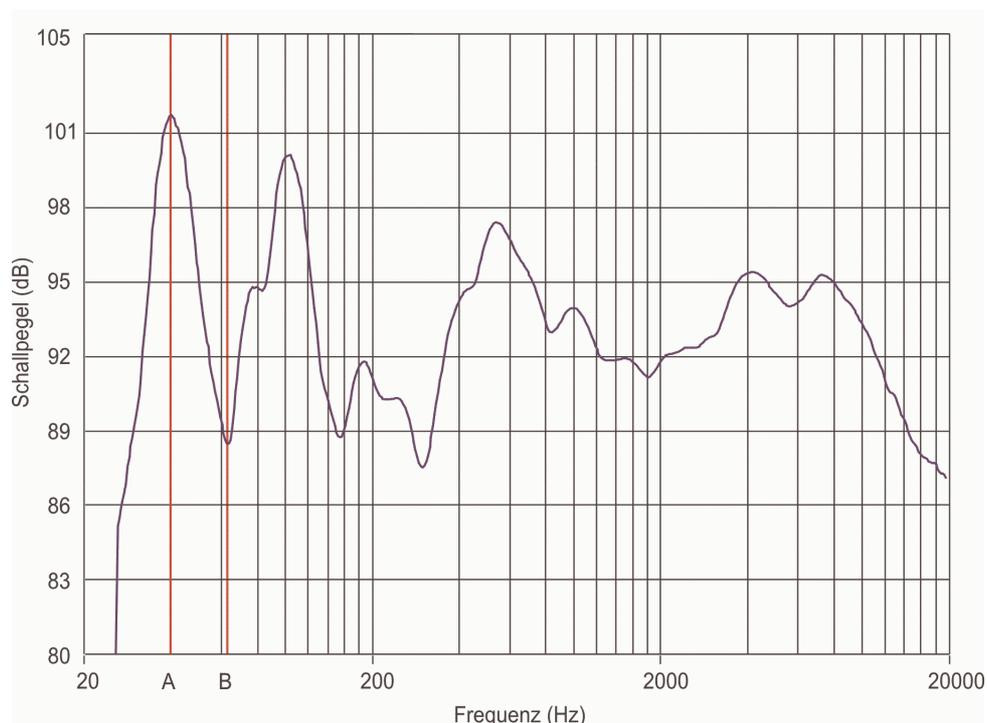
**Abbildung 2: Im Testlabor ermittelter Frequenzgang der Lautsprecher, die für die im Artikel beschriebenen Messungen verwendet wurden (Quelle: [www.hunecke.de](http://www.hunecke.de)).**

Das was „am Ohr ankommt“ kann man durch eine Messung des Frequenzgangs am Hörort (z. B. dem Sessel in Abbildung 1) ermitteln, und zwar nicht im schalltoten Testlabor, sondern in einem realen Raum. Erst eine solche Messung gibt Aufschluss über das, was man als Musikliebhaber tatsächlich zu hören bekommt. Wie man die Messung mit Stereoanlage, Mikrophon und Computer selbst durchführen kann, wird in Abschnitt 11 beschrieben.

<sup>1</sup> Die Einheit Dezibel bereitet vielen Lehrenden und Lernenden Probleme. Im vorliegenden Zusammenhang ist es ausreichend, den Alltagsbegriff „Lautstärke“ mit der Einheit zu verknüpfen. Tatsächlich liegt den Messungen die wohldefinierte Messgröße „Schallpegel“ zugrunde. Nach einer Faustregel entspricht eine empfundene Verdoppelung der Lautstärke einer Schallpegeländerung zwischen 6 dB und 10 dB.

Das Messergebnis für den Frequenzgang des in Abbildung 1 skizzierten Raumes ist in Abbildung 3 gezeigt. Der Vergleich mit Abbildung 2 macht den enormen Einfluss des Hörraums auf die Musikwiedergabe deutlich. Von einem flachen Frequenzgang kann keine Rede mehr sein. Die Schwankungen betragen mehr als 13 dB. Vor allem im Bassbereich sind ausgeprägte Maxima und Minima zu erkennen. Einen solchen durch den Hörraum „zerzausten“ Frequenzgang wird man in fast jedem kleinen Raum messen, er ist nicht die Ausnahme, sondern die Regel.

Von dieser Warte aus betrachtet, macht es kaum Sinn, viel Geld in bessere Lautsprecher mit noch flacherem Frequenzgang zu investieren. Der Schwachpunkt liegt offenbar nicht in der Stereoanlage, sondern im Hörraum. Selbst wenn wir perfekte Lautsprecher mit völlig flachem Frequenzgang hätten: Im gleichen Raum aufgestellt, käme am Hörort wieder nur ein Ergebnis zustande, das große Ähnlichkeit mit Abbildung 3 besitzt. In kleinen Räumen ist es fast immer notwendig, die Akustik des Hörraums zu verbessern, um eine verbesserte Musikwiedergabe zu erreichen.<sup>2</sup>



**Abbildung 3: Gemessener Frequenzgang im Raum aus Abb. 1 an der eingezeichneten Hörposition (Signal nur vom linken Lautsprecher)**

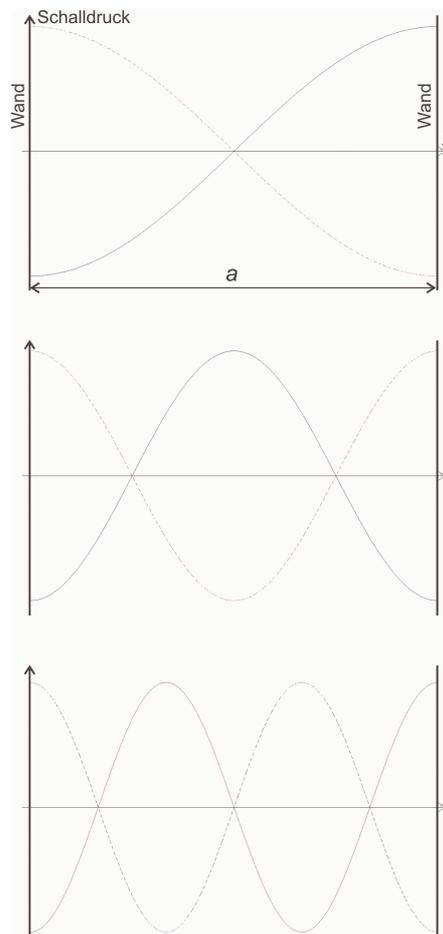
#### 4. Stehende Wellen in einer Dimension

An dieser Stelle kann man den Kontext „Stereoanlage und Raumakustik“ mit einem Standardthema aus der Oberstufe verknüpfen, mit den stehenden Wellen. Der im Bassbereich wild schwankende Frequenzgang lässt sich auf die *Eigenschwingungen der Luft* im Hörraum zurückführen. So wie die Luft in einer Flöte oder in einer Orgelpfeife bei bestimmten Frequenzen besonders stark schwingt, wird auch die Luft im durch Wände begrenzten Hörraum zu stehenden Wellen angeregt. Je nach Hörposition kann man sich an einem Bauch oder einem Knoten der stehenden Welle befinden, was sich in einer besonders hohen oder einer besonders niedrigen Lautstärke bei der jeweiligen Frequenz bemerkbar macht. Man spricht auch von Raumresonanzen oder Raummoden.

<sup>2</sup> Natürlich gibt es außer dem Frequenzgang noch andere Kriterien für eine naturgetreue Musikwiedergabe, die in diesem Artikel nicht behandelt werden sollen.

Stehende Wellen werden im Unterricht meist in einer Dimension behandelt (z. B. schwingende Gitarrensaite), in vielen Zusammenhängen treten sie aber auch in drei Dimensionen auf, z. B. beim Mikrowellenofen [2] oder in der Quantenphysik beim dreidimensionalen Potentialtopf als Vorbereitung auf das quantenmechanische Atommodell [3].

Wie bei der schwingenden Saite gilt auch in der Akustik die Randbedingung „Auslenkung = 0“. Die Luftteilchen können sich an der Wand nicht bewegen, dort befindet sich ein Bewegungsknoten. Die Auslenkung ist in der Akustik jedoch nicht messbar, sondern nur der Schalldruck. Weil die Ausbildung eines Bewegungsknotens mit starken Druckschwankungen verbunden ist, liegen an den Wänden gerade die *Druckbäuche*. Dies macht man sich am besten an einer Visualisierung klar, z. B. einem Java-Applet [4].



**Abbildung 4: Schalldruckverteilung der ersten drei Eigenschwingungen zwischen zwei parallelen Wänden (eindimensional)**

Mit der Randbedingung „Druckbäuche an den Wänden“ können wir die Eigenschwingungen der Luft in einem durch Wänden begrenzten Hohlraum (=Zimmer) zunächst für den eindimensionalen Fall skizzieren (Abbildung 4). Stehende Wellen bilden sich aus, wenn ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge in den Raum gerade „hineinpasst“, so dass die Eigenfrequenzen ganzzahlige Vielfache einer Grundfrequenz sind:

$$f_n = \frac{c}{2} \cdot \frac{n}{a}. \quad (1)$$

Hierbei ist  $n$  eine positive ganze Zahl,  $a$  bezeichnet die Länge des begrenzten Raumes,  $c$  die Schallgeschwindigkeit. Die räumliche Gestalt der zugehörigen Schalldruckverteilungen, die in Abbildung 4 skizziert sind, lässt sich durch die folgende Formel beschreiben:

$$g_n(x) = A \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{a} x\right). \quad (2)$$

Bekannte Schulexperimente zum Sichtbarmachen eindimensionaler stehender akustischer Wellen sind die Kundtsche Röhre und das Rubenssche Flammenrohr. Im vorliegenden Kontext bieten sich daneben die folgenden Aufgaben und Experimente an.

## 5. Aufgaben und Experimente

*Aufgabe:* Berechnen Sie mit Gl. (1) die erste Eigenfrequenz für die lange Seite des in Abbildung 1 dargestellten Raums (Raumlänge 4,30 m).

*Lösung:* Setzen wir in Gl. (1)  $n = 1$  und  $c = 340$  m/s, so ergibt sich:

$$f_1 = \frac{340 \text{ m/s}}{2 \cdot 4,30 \text{ m}} = 39,5 \text{ Hz.}$$

Die Frequenz der ersten Eigenschwingung liegt in einem akustisch relevanten Bereich, nämlich im Bassbereich. Sie stimmt genau mit der Frequenz der ersten und größten „Zacke“ im gemessenen Frequenzgang in Abbildung 3 überein.

Für alle Räume mit vergleichbarer Größe liegen die niedrigsten Eigenfrequenzen ebenfalls im Bassbereich. Da die Raumgröße im Nenner steht, wandert sie für sehr große Räume in den nicht mehr hörbaren Bereich, wo sie keine Probleme mehr verursacht.

Bei sehr kleinen Räumen verschärfen sich dagegen die Probleme, denn die niedrigste Eigenfrequenz begrenzt die Musikwiedergabe im Bassbereich. Tiefere Frequenzen können nicht adäquat wiedergegeben werden, weil die entsprechenden Wellenlängen nicht mehr in den Raum „hineinpassen“. In sehr kleinen Räumen ist eine befriedigende Musikwiedergabe kaum noch zu erreichen.

*Experiment:* Mit einem Frequenzgenerator oder einem Audioprogramm am Laptop wird ein Sinuston unterhalb der niedrigsten Eigenfrequenz des Raumes wiedergegeben. Dann wird die Frequenz kontinuierlich erhöht, ohne die eingestellte Lautstärke zu verändern. Beim „Durchfahren“ der Resonanzfrequenz wird der Ton an fast allen Stellen im Raum deutlich lauter. Einzig in der Raummitte, dort wo die in Abbildung 4 oben gezeigte Schalldruckverteilung einen Knoten hat, hört man den Lautstärkeanstieg nicht.

Der Raum wirkt wie der Resonanzkörper eines Musikinstrumentes und verstärkt den Ton, wenn dessen Frequenz gerade mit einer seiner Eigenfrequenzen übereinstimmt. Man kann dies mit dem folgenden Experiment verdeutlichen:

*Experiment:* Aus der Physiksammlung benötigt man eine Stimmgabel mit passendem Resonanzkasten (in der Regel 440 Hz) und eine Stimmgabel mit einer anderen Frequenz (z. B. 1000 Hz). Setzt man die angeschlagene 440-Hz-Stimmgabel auf den Resonanzkasten, so wird der Ton merklich lauter. Bei der „nicht passenden“ 1000-Hz-Stimmgabel wird der Ton dagegen nicht verstärkt.

Besonders beeindruckend ist das „Abgehen“ der Knoten und Bäuche einer stehenden Welle. Kaum jemand glaubt vorher, dass bei einem fest eingestellten Sinuston die Lautstärke von Ort zu Ort so stark variieren kann, wie man es im folgenden Experiment feststellt.

*Experiment:* Mit einem Frequenzgenerator oder einem Audioprogramm wird eine der mit Gl. (1) berechneten Eigenfrequenzen des Raumes eingestellt. Die Schülerinnen und Schüler gehen dann im Raum hin und her und achten auf die zu hörende Lautstärke am jeweiligen Ort. Die in Abbildung 4 dargestellte Knoten- und Bauchstruktur der Raummoden ist deutlich zu hören.

Die folgende Aufgabe zeigt, dass je nach Hörort sich nicht jede Raumresonanz als Maximum im gemessenen Frequenzgang bemerkbar machen muss.

*Aufgabe:* Berechnen Sie die erste Eigenfrequenz in für die *Querrichtung* des Raumes (Raumbreite 3,45 m) und begründen Sie, warum an dieser Stelle kein Maximum im Frequenzgang zu beobachten ist.

*Lösung:* Mit Gl. (1) erhält man

$$f_1 = \frac{340 \text{ m/s}}{2 \cdot 3,45 \text{ m}} = 49,3 \text{ Hz.}$$

Bei 50 Hz ist aber kein Maximum im gemessenen Frequenzgang in Abbildung 3 zu finden. Dies kann man sich wie folgt klar machen: Der Hörort befindet sich nach Abbildung 1 genau in der Raummitte. Dort hat aber die erste Eigenschwingung einen *Druckknoten*. Am Hörort nimmt man von dieser Eigenschwingung also *besonders wenig* wahr. An anderen Stellen in Raum, vor allem an den Wänden, wo die Druckbäuche sind, ist die entsprechende Eigenschwingung gut wahrnehmbar. Dies illustriert noch einmal die Tatsache, dass der Frequenzgang nicht nur vom Raum, sondern auch vom Hörort abhängt. Wir werden dies später verwenden, um die Probleme mit den Raummoden zu bekämpfen.

## 6. Raummoden in drei Dimensionen

Bisher haben wir stehende Wellen nur in einer Dimension betrachtet und die drei Raumdimensionen gleichsam unabhängig voneinander behandelt. Im Unterricht wird die für stehende Wellen zur Verfügung stehende Zeit damit weitgehend erschöpft sein und man kann das Thema mit den in Abschnitt 7 geschilderten Auswirkungen auf das Musikhören und den akustischen Verbesserungsmaßnahmen ab Abschnitt 8 abschließen.

Eigentlich ist das Problem aber dreidimensionaler Natur und muss als solches behandelt werden. Die Bedingung „Raumlänge = ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge“ gilt für jede Raumdimension einzeln, so dass wir als Verallgemeinerung von Gl. (2) die räumliche Verteilung des Schalldrucks wie folgt beschreiben können:

$$g_{nmk}(x, y, z) = A \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{m\pi}{b}y\right) \cdot \cos\left(\frac{k\pi}{c}z\right). \quad (3)$$

Hierbei stehen  $a, b, c$  für Länge, Breite und Höhe des Raumes und  $n, m, k$  müssen wieder ganzzahlig sein. Die Raummode wird in drei Dimensionen durch drei Quantenzahlen charakterisiert. Dies steht in direkter Analogie zum dreidimensionalen Potentialtopf in der Quantenmechanik, wo die Modenfunktionen auch die gleiche Gestalt haben (nur dass wegen der anderen Randbedingungen statt des Kosinus dort der Sinus steht). Als Verallgemeinerung von Gl. (1) auf den dreidimensionalen Fall ergibt sich:

$$f_{nmk} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\frac{n^2}{a^2} + \frac{m^2}{b^2} + \frac{k^2}{c^2}}. \quad (4)$$

In drei Dimensionen sind die Raummoden vielgestaltiger als in einer Dimension. Allgemein werden die drei Quantenzahlen in der Notation  $(n, m, k)$  geschrieben. Die Angabe  $(3, 1, 0)$  bezeichnet beispielsweise eine Mode mit  $n = 3, m = 1, k = 0$ . Ihre räumliche Gestalt kann man sich mit Hilfe von Gl. (3) mit einer entsprechenden Mathematik-Software (z. B. Mathematica) veranschaulichen. Wesentlich praktischer ist aber der *Raumeigenmoden-Rechner*, den man unter [www.hunecke.de](http://www.hunecke.de) findet. Es handelt sich um ein Java-Applet, in das man die Länge, Breite und Höhe des Raumes eingibt. Aus diesen Angaben berechnet es mit Gl. (4) die ersten 20 Eigenfrequenzen des Raumes (Abbildung 5). Beim Anklicken des zugehörigen Auswahlknopfes wird die entsprechende Raummode visualisiert. In Abbildung 5 ist beispielsweise die  $(2, 0, 1)$ -Mode für den hier betrachteten Beispielraum dargestellt.

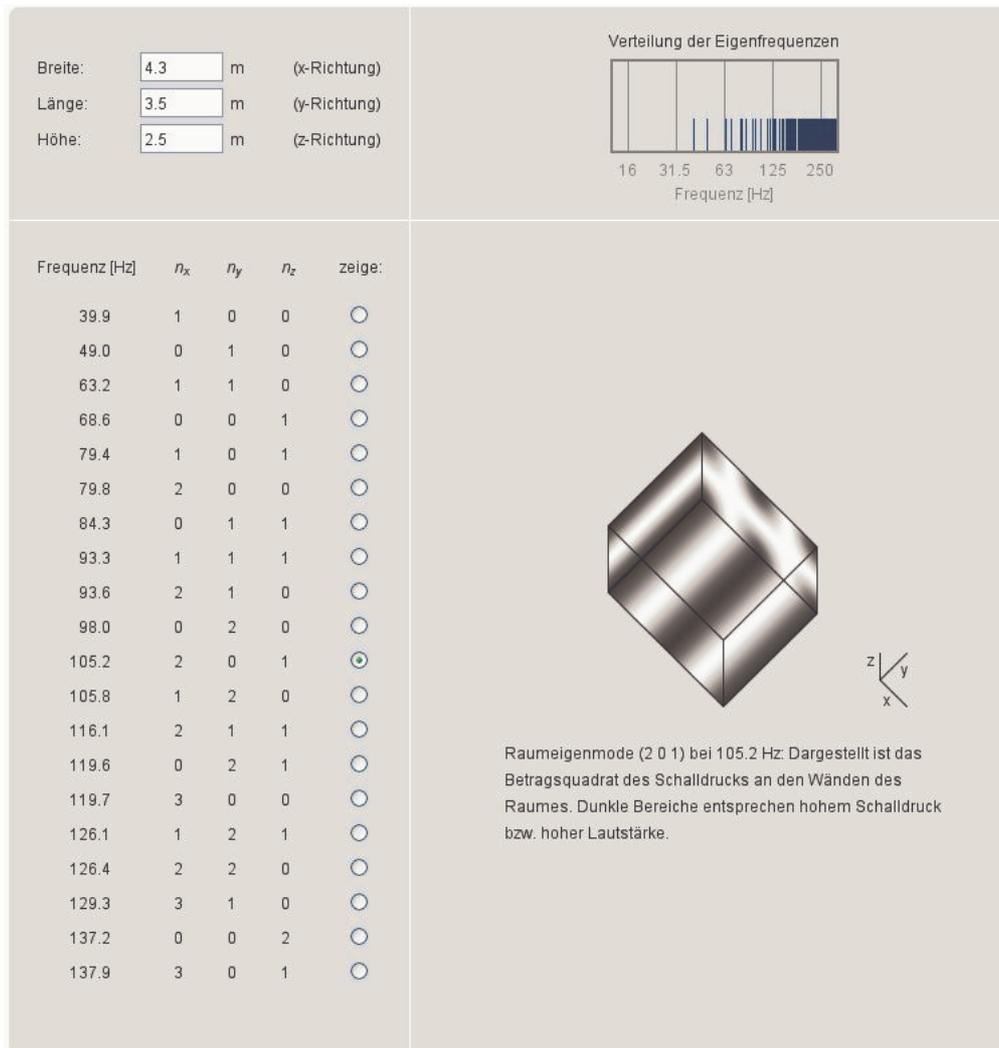


Abbildung 5: Raumakustik-Rechner

Eine dankbare Schüleraktivität ist das folgende Experiment:

*Experiment:* Eine der mit Gl. (4) berechneten Eigenfrequenzen wird mit dem Frequenzgenerator oder dem Laptop eingestellt. Die Schülerinnen und Schüler gehen durch den Raum, bis sie an eine Stelle kommen, an der die Lautstärke minimal wird. Dort bleiben sie stehen. Als Ergebnis bildet sich eine Schülerkette, die den Knotenlinien der gerade eingestellten Raummode folgt.

In akustischer Hinsicht ist die *Verteilung der Eigenfrequenzen* interessant, d. h. die Liste der mit Gl. (4) berechneten Eigenfrequenzen in grafischer Darstellung. Sie wird vom Raumakustik-Rechner ebenfalls ausgegeben. In Abbildung 6 ist sie für den Beispielraum noch einmal deutlicher dargestellt.

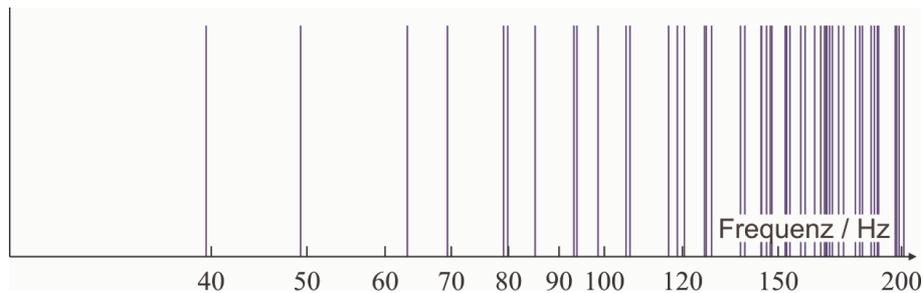


Abbildung 6: Verteilung der Eigenfrequenzen für den Raum aus Abb. 1

Aus der Verteilung der Eigenfrequenzen lässt sich einiges über die Akustik des jeweiligen Raumes ablesen. Allgemein findet man im Bassbereich nur wenige Eigenfrequenzen, die zu stark ausgeprägten Resonanzen führen. Für höhere Frequenzen liegen die Moden immer dichter, ihre Gestalt wird immer komplexer, bis sie schließlich bei 200 Hz in eine Art Kontinuum übergehen.

Damit sich im Frequenzgang keine allzu ausgeprägten Maxima und Minima ergeben, strebt man eine möglichst gleichmäßige Frequenzverteilung der Raummoden an. Einerseits sollen keine zu großen Lücken auftreten (die zu Minima im Frequenzgang führen), andererseits sollen zwei Eigenfrequenzen auch nicht zu dicht zusammenliegen, weil dies zu einem besonders ausgeprägten Maximum im Frequenzgang führen kann. In Abbildung 6 häufen sich die Eigenfrequenzen im Bereich zwischen 80 Hz und 105 Hz, was zu dem breiten Maximum bei 100 Hz in Abbildung 3 führt.

Weil die von Gl. (4) vorhergesagte Modenverteilung nur von den Abmessungen des Raumes abhängt, wird die akustische Qualität eines Hörraums zum Teil schon bei der Planung des Raumes festgelegt; es können sich günstige oder ungünstige Eigenfrequenzverteilungen ergeben, die später nicht mehr zu beeinflussen sind.

Besonders ungünstig sind quadratische Räume. Wenn  $a = b$  gilt, kann man in Gl. (4)  $n$  und  $m$  vertauschen, ohne dass sich am Ergebnis etwas ändert. Die Moden  $(1, 0, 0)$  und  $(0, 1, 0)$  haben die gleiche Eigenfrequenz, ebenso wie  $(2, 1, 0)$  und  $(1, 2, 0)$ . Die Moden sind *entartet* (auch hier wird der gleiche Ausdruck gebraucht wie bei den Energieniveaus in der Quantenmechanik). In einem quadratischen Raum kann wegen der Entartung der Eigenfrequenzen von einer gleichmäßigen Frequenzverteilung keine Rede sein, akustische Probleme sind hier vorprogrammiert.

Mit dem Raumakustikrechner lässt sich dies ohne großen Aufwand erforschen. Es ist auch spannend, akustisch besonders günstige Räume zu planen. In der Literatur und im Internet findet man Angaben für die Seitenverhältnisse für Räume mit besonders ausgewogener Eigenfrequenzverteilung (oft tritt dabei der Goldene Schnitt auf).

## 7. Bass, bässter, am bässten?

Nachdem wir die Physik der stehenden Wellen in Hörräumen genauer untersucht haben, kommen wir noch einmal auf ihre akustischen Auswirkungen zurück. Bereits angesprochen wurden die Schwankungen im Frequenzgang, die zu Problemen bei der Basswiedergabe führen.

Nehmen wir an, in dem Musikstück, das wir hören, spielt ein Kontrabass einen Ton mit der Frequenz von 41 Hz (ein Kontra-E, die tiefste Note des Kontrabasses). Die Frequenz, die in Abbildung 3 mit A markiert ist, fällt in das größte Maximum des Frequenzganges. Der Ton wird also sehr laut zu hören sein. Als nächste Note wird im Musikstück ein Ton mit 62 Hz gespielt (ein Kontra-H, in Abbildung 3

mit B markiert). Diese Frequenz fällt in ein Minimum des Frequenzganges, wird also nur leise zu hören sein. Der Unterschied im Schallpegel beträgt 12 dB; der zweite Ton wird also mit nur ca. einem Viertel der Lautstärke des ersten gehört. Ein unausgeglichenes Klangbild im Bassbereich ist die Folge.

Gerade beim Hören von Popmusik ist der Bassbereich wichtig. Hier besteht oft große Unzufriedenheit mit den Leistungen der eigenen Anlage. „Mehr Bass“ ist die Devise. Abhilfe schafft aber auch das nicht. Auch der voll aufgedrehte Subwoofer führt nicht dazu, dass sich die Musik besser anhört. Schuld an der unbefriedigenden Basswiedergabe sind Phänomene, die auf die Anregung von Raummoden zurückzuführen sind.

Während sich das Ohr an einen unausgegliehenen Frequenzgang noch leidlich anpassen kann, ist das Problem der *Kolorierung* von Tönen deutlich lästiger. Von Instrumenten gespielte Töne haben immer eine gewisse Frequenzbreite. Als Beispiel ist in Abbildung 7 die durchgezogene Kurve eingezeichnet, die ihr Maximum bei 90 Hz hat. Nehmen wir an, dass ein Klang mit dieser Frequenzverteilung vom Lautsprecher gespielt wird. Dadurch, dass der Raum als Filter wirkt, kommt jedoch etwas anderes am Ohr des Hörers an.

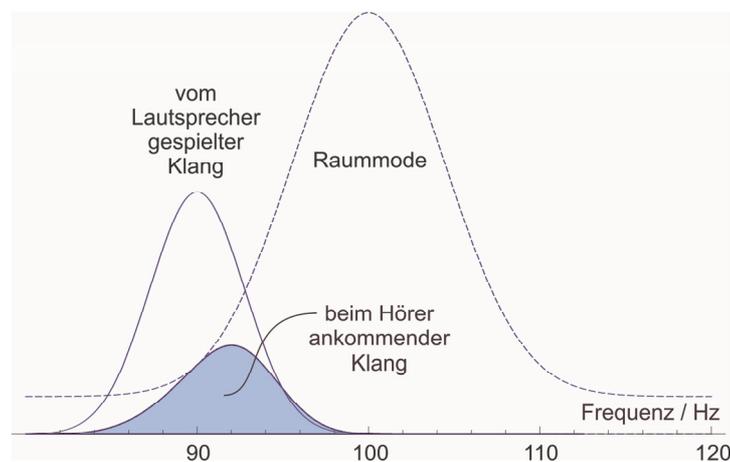


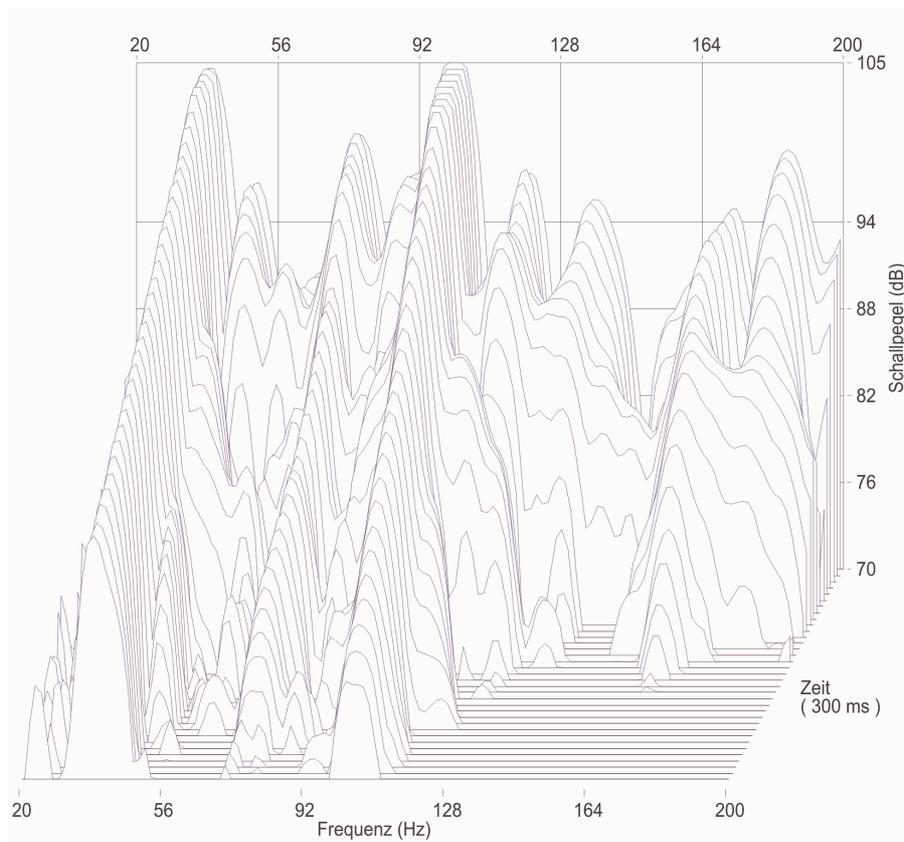
Abbildung 7: Die "Kolorierung" von Klängen kommt dadurch zustande, dass der Raum als Filter wirkt

Bei 100 Hz soll sich ein ausgeprägtes Maximum im Frequenzgang des Raumes befinden (gestrichelte Kurve). Das beim Hörer ankommende Signal ergibt sich dadurch, dass das ursprüngliche Signal mit dem Frequenzgang multipliziert wird (so ist der Frequenzgang definiert). Das Ergebnis ist als grau hinterlegte Kurve in Abbildung 7 gezeigt. Der beim Hörer ankommende Klang hat in diesem Beispiel sein Frequenzmaximum nicht mehr bei 90 Hz sondern bei 92 Hz. Die vom Lautsprecher ausgesandte Musik wird vom Raum „koloriert“, also eingefärbt. Weil die Raummoden im Bassbereich besonders ausgeprägt sind, tritt das Problem vor allem hier auf.

Plakativ spricht man vom „one note bass“: Egal was der Bass spielt, immer wird die dominante Raummode angeregt, und beim Hörer kommt nur ihre Eigenfrequenz an. Man hört den Bass, aber man kann verschiedene Noten kaum unterscheiden. Die Musikwiedergabe ist dumpf und unbefriedigend.

Damit sind aber noch nicht alle unangenehmen Folgen der Raummoden für die Wiedergabe im Bassbereich erkannt. Das Problem hat auch eine zeitliche Dimension. Die Raummoden werden nämlich nicht nur leicht angeregt, sie klingen auch nur langsam ab. Im „Wasserfall-Diagramm“ in Abbildung 8 ist der gemessene Frequenzgang des Beispielraumes in seiner zeitlichen Entwicklung über 300 ms nach der Anregung gezeigt. Es wird gewissermaßen die Nachhallzeit des Raumes für jede einzelne Frequenz dargestellt. Der ohne Verzögerung gemessene Frequenzgang aus Abbildung 3 bildet die

„Rückwand“ der dreidimensionalen Darstellung (bei  $t = 0$ ), wobei hier jedoch nur der Bassbereich bis 200 Hz gezeigt ist. Deutlich sind wieder die beiden prominenten Raummoden bei 40 Hz und bei 100 Hz zu erkennen.



**Abbildung 8: Wasserfall-Diagramm mit dem gemessenen Abklingverhalten der Raummoden im Beispielraum aus Abb. 1**

Aus der Abbildung wird deutlich, warum die pauschale Angabe einer Nachhallzeit die Akustik eines kleinen Raumes nur unzureichend charakterisiert. Während der Schall bei manchen Frequenzen sehr schnell abklingt (z. B. bei 150 Hz), ist er an den Eigenfrequenzen des Raumes nicht nur laut, sondern auch lange zu hören. Die 40-Hz-Mode klingt im Beispiel erst nach einer halben Sekunde ab.

Die hohe Abklingzeit bei diesen Frequenzen bedeutet, dass ein Ton mit dieser Frequenz noch lange nachklingt. Selbst wenn es sich nur um ein kurzes Schallereignis handelt (z. B. das Anzupfen einer Bassaite), ist der Schall im Raum noch bis zu einer halben Sekunde hörbar. Die Musikwiedergabe wird unpräzise und schwammig.

Noch schlimmer ist es, wenn ein Schallereignis eine breite Frequenzverteilung aufweist (z. B. Trommelschläge oder Geräusche). Dann kann es mehrere Raummoden anregen, die jeweils mit ihrer eigenen Abklingzeit zerfallen. Der Klang des Geräusches ändert sich im Lauf der Zeit, er wird koloriert. Im Beispielraum sind bei einer Anregung durch ein Geräusch nach 150 ms nur noch die beiden dominanten Raummoden zu hören.

Insgesamt erkennt man aus Abbildung 8, dass im hier vermessenen Raum trotz der unbefriedigenden Basswiedergabe nicht *zu wenig* Bass vorhanden ist, sondern *zu viel*. Durch die Existenz der leicht anzuregenden und langsam abklingenden Raummoden neigt der Raum zum Dröhnen im Bassbereich. Die Musikwiedergabe verbessert sich, wenn es gelingt, Bassanteile aus dem Raum zu *entfernen*, und zwar selektiv bei den Frequenzen der dominanten Raummoden. Wie das gelingen kann, soll im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

## 8. Strategien zum Umgang mit Raumresonanzen: Boxenrücken

Nachdem wir die physikalische Ursache der Probleme mit Raumresonanzen erkannt haben, können wir nach Verbesserungsmaßnahmen fragen. Es gibt drei Strategien zum Umgang mit den akustischen Problemen, die durch Raumresonanzen verursacht werden. (1) Das systematische Verändern des Hörorts und der Lautsprecheraufstellung (kostenlos), (2) akustische Behandlung des Raumes (kostengünstig bis teuer) oder (3) digitale Raumkorrektur (teuer).

Bei der ersten Strategie macht man sich die schon erwähnte Tatsache zunutze, dass der am Ohr ankommende Frequenzgang vom Hörort abhängt. Durch Variieren des Hörortes kann man einen günstigeren Verlauf des Frequenzganges erreichen. Um dabei etwas systematischer vorzugehen, kann man sich das bisher erarbeitete physikalische Wissen zunutze machen. Erstrebenswert ist es, seinen Hörort weder in einem Maximum noch einem Minimum der dominanten Raummoden zu wählen. In Abbildung 9 ist in eine Skizze des Hörraums das Betraqsquadrat der ersten vier Eigenschwingungen in Längsrichtung eingezeichnet (also die Raummoden  $(1, 0, 0)$  bis  $(4, 0, 0)$ ). Günstige Hörorte liegen dort, wo sich weder ein Maximum noch ein Minimum der eingezeichneten Kurven befindet. Um Probleme mit sehr dominanten Raummoden zu bekämpfen, kann es jedoch sinnvoll sein, den Hörort in der Nähe eines ihrer Minima zu wählen.

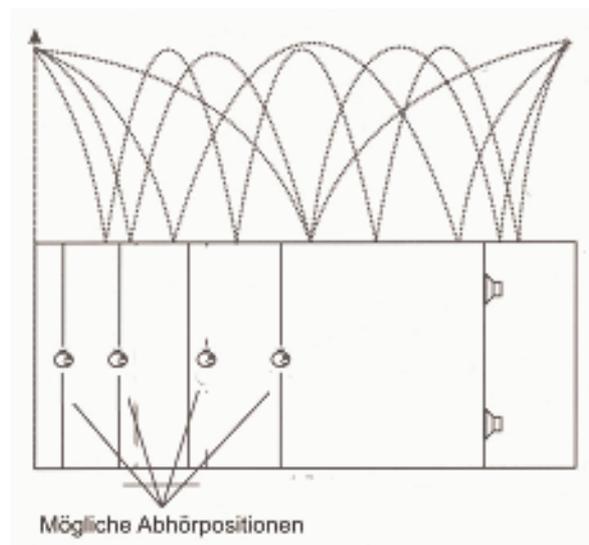


Abbildung 9: Zur Wahl des besten Hörortes

Entsprechendes gilt auch für die Lautsprecher. Auch sie sollten nicht an einem Raummoden-Maximum aufgestellt werden, weil sie dort die entsprechende Eigenschwingung besonders effektiv anregen. Besonders ungünstig sind die Raumecken, denn hier haben *alle* Raummoden ein Schall-druckmaximum. Als Faustregel wird für die Lautsprecheraufstellung mindestens 80 cm Abstand von allen Wänden empfohlen.

Volle Freiheit bei der Wahl der Lautsprecher- und Hörortposition hat man jedoch nicht. Eines der obersten Gebote in der Akustik ist eine symmetrische Aufstellung, und hiervon sollte man nicht abweichen. Das gilt sowohl für die Lautsprecher in Bezug auf die Längsachse des Raums als auch für den Hörort in Bezug auf die Lautsprecher (Stereodreieck). Der Hörort wird also wie in Abbildung 9 immer auf der Längsachse des Raumes liegen (und damit im Minimum der  $(0, 1, 0)$ -Mode).

Ein Java-Applet zum virtuellen Boxenrücken findet man unter [www.hunecke.de](http://www.hunecke.de) (Abbildung 10). Hier kann man nach Eingabe der Raummaße die Position der Lautsprecher und des Hörortes mit den Cur-

sortasten verändern und bekommt den zu erwartenden Frequenzgang am Hörort in Echtzeit angezeigt. Dies kann eine wertvolle Hilfe sein, um erfolgversprechende Kombinationen schon vor dem aufwändigen Verrücken der realen Boxen zu identifizieren. Das virtuelle Boxenrücken kann jedoch nur Anhaltspunkte liefern, danach kommt immer die Feinarbeit mit den wirklichen Lautsprechern. Am Ende entscheidet das Ohr.

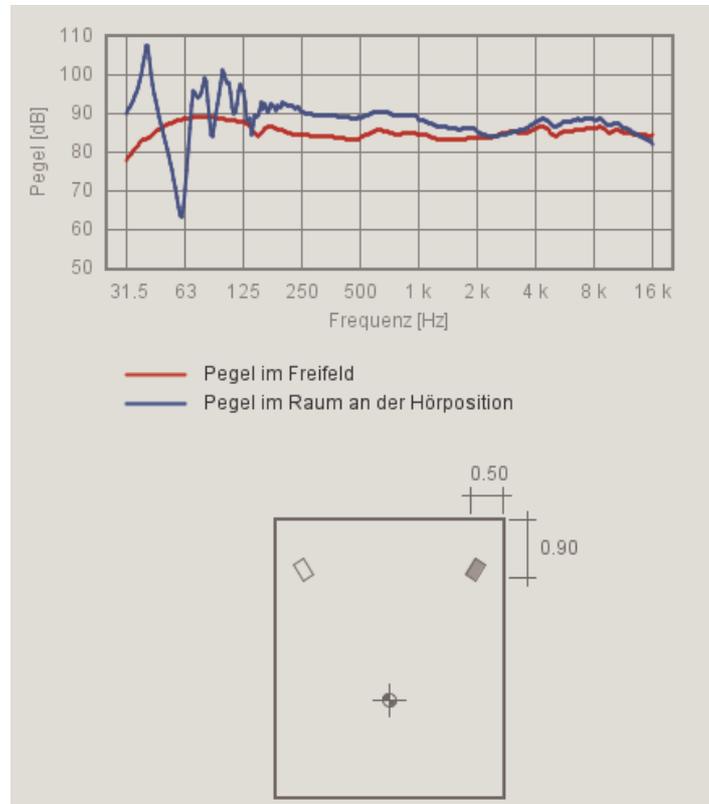


Abbildung 10: Virtuelles Boxenrücken. Oben ist der zu erwartende Frequenzgang eingezeichnet, unten kann man Lautsprecher- und Hörposition verändern. Quelle: [www.hunecke.de](http://www.hunecke.de)

## 9. Selbstgebaute Bassfallen

Mit dem Boxenrücken lässt sich einiges an akustischen Verbesserungen erreichen, aber insgesamt sind die Möglichkeiten doch begrenzt. Der Frequenzgang in den Abbildung 3 und 8 wurde beispielsweise *nach* der Optimierung durch Boxenrücken gemessen. Weitergehende Fortschritte erreicht man durch die zweite der angesprochenen Möglichkeiten, durch die *akustische Behandlung des Raumes*. Entgegen einem verbreiteten Vorurteil ist damit nicht das Einbringen schalldämmender Materialien gemeint, die die Raummoden wegdämpfen sollen. *Alle* Baumaterialien absorbieren die Höhen stärker als die Bässe, und daher würde man das Gegenteil des beabsichtigten Effekts erreichen.

Gesucht ist eine raumakustische Maßnahme, die den Schall gezielt bei bestimmten Frequenzen dämpft (nämlich genau bei den störenden Eigenfrequenzen). Für den Bau einer solchen „Bassfalle“ (Bass Trap) gibt es mehrere Möglichkeiten, von denen hier nur zwei besprochen werden sollen: der Platten- bzw. Membranabsorber und der Lochplattenabsorber. Beide sind im Wesentlichen große, fast leere Kästen aus Sperrholz oder MDF-Platte mit einer Sperrholzfront. Ihre Funktionsweise lässt sich physikalisch leicht verstehen.

Beim *Plattenabsorber* wird die geschlossene Frontseite des Kastens vom Schalldruck in Bewegung gesetzt. Die komprimierte Luft im Kasten übt eine rücktreibende Kraft aus. Dadurch entsteht ein Oszillator mit einer bestimmten Resonanzfrequenz, die in der Literatur mit

$$f = 60 \text{ Hz} \frac{\text{kg}^{\frac{1}{2}} \text{m}^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{\rho_A \cdot d}}$$

angegeben wird [1]. Hierbei bezeichnet  $\rho_A$  die Flächendichte der Vorderwand (in  $\text{kg}/\text{m}^2$ ), während  $d$  den Abstand zwischen Vorderwand und Rückwand des Kastens angibt. Im Inneren des Kastens wird zur Dämpfung auf die Rückwand Mineralwolle geklebt. Die Wirkung des Plattenabsorbers ist relativ breitbandig. Um eine nennenswerte Abschwächung der Raummoden zu erreichen, ist eine große schwingende Fläche erforderlich.

Einen ähnlichen dämpfenden Effekt haben auch Schranktüren und Fenster, wenn sie passiv mit dem Schallfeld mitschwingen. Daher haben auch sie eine günstige akustische Wirkung.

Der *Lochplattenabsorber* beruht auf dem Prinzip des Helmholtz-Resonators. Jeder kennt den Effekt, dass im Innern einer Getränkeflasche ein Ton entsteht, wenn man über ihre Öffnung pustet. Der Lochplattenabsorber besteht aus vielen „parallel geschalteten“ Helmholtz-Resonatoren, die bei ihrer Resonanzfrequenz dem Schallfeld im Hörraum Energie entziehen. Er weist in seiner Vorderseite zahlreiche Bohrungen auf, deren Durchmesser und Abstand zur Abstimmung der Resonanzfrequenz variiert werden können. Bis auf etwas Mineralwolle auf der Rückseite ist auch der Lochplattenabsorber im Inneren leer. Er ist daher mit moderatem handwerklichen Einsatz kostengünstig selbst zu bauen.

Die Berechnung der Resonanzfrequenz für einen Lochplattenabsorber ist etwas komplizierter als beim Plattenabsorber. Sie wird mit

$$f = 51 \text{ Hz} \cdot \text{m} \sqrt{\frac{p}{d(x + 1,6 r)}}$$

angegeben [1]. Dabei ist  $d$  wieder der Abstand zwischen Vorder- und Rückwand,  $x$  ist die Dicke des Sperrholzes, das die Vorderwand bildet und  $r$  ist der Radius der Bohrungen in der Vorderwand. Der sogenannte Perforationsgrad  $p$  gibt an, welchen Anteil der Frontfläche die Bohrungen ausmachen.

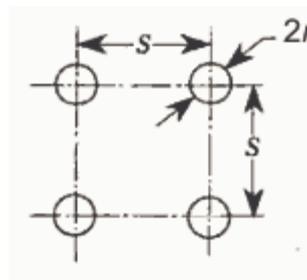


Abbildung 11: Zur Berechnung des Perforationsgrades beim Lochplattenabsorber (nach [1])

Für ein quadratisches Lochmuster mit Lochabstand  $s$  (Abbildung 11) kann man  $p$  wie folgt berechnen:

$$p = 0,785 \left( \frac{2r}{s} \right)^2.$$

Der so definierte Perforationsgrad liegt zwischen 0 und 1. Häufig wird er in der Literatur als Prozentsatz angegeben (das hier definierte  $p$ , multipliziert mit 100), was zu Verwechslungen führen kann.

*Aufgabe:* Berechnen Sie die Resonanzfrequenz für einen Lochplattenabsorber, dessen Vorderwand eine Dicke von 6 mm besitzt. Die Bohrungen haben einen Durchmesser von 8 mm und befinden sich im Abstand von 65 mm. Der Abstand zwischen Vorder- und Rückwand beträgt 24 cm.

*Lösung:* Zuerst berechnen wir den Perforationsgrad

$$p = 0,785 \left( \frac{8 \text{ mm}}{65 \text{ mm}} \right)^2 = 0,012.$$

Damit wird die Resonanzfrequenz:

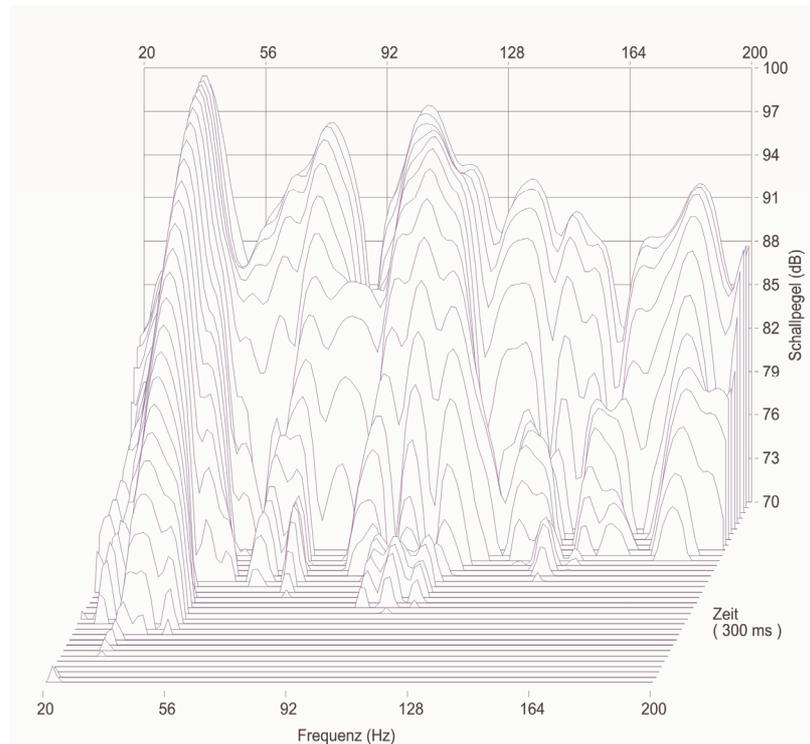
$$f = 51 \text{ Hz} \cdot \text{m} \sqrt{\frac{0,012}{0,24 \text{ m}(0,006 \text{ m} + 1,6 \cdot 0,004 \text{ m})}} = 102 \text{ Hz}.$$

Der Resonator kann also zum Abdämpfen einer bei 100 Hz gelegenen Raummode dienen.



**Abbildung 12: Selbstgebaute Lochplattenabsorber**

Abbildung 12 zeigt zwei selbstgebaute Lochplattenabsorber. Einer davon ist nach den Angaben aus der Aufgabe auf eine Resonanzfrequenz von 100 Hz abgestimmt, der andere mit 40 Hz auf die zweite problematische Frequenz des Hörraums. Der finanzielle Aufwand für den Bau betrug 40 Euro. Nach der Aufstellung wurde der Frequenzgang des Hörraumes erneut gemessen. Es ergab sich das in Abbildung 13 gezeigte Wasserfall-Diagramm. Der Vergleich mit Abbildung 8 zeigt, dass die Lochplattenabsorber ihre Aufgabe erfüllen. Sie dämpfen die problematischen Raummoden deutlich. Der Frequenzgang ist nun ausgewogener und vor allem das Dröhnen, das lange Nachklingen der angeregten Raummoden, ist erkennbar reduziert.



**Abbildung 13: Im Hörraum gemessenes Wasserfall-Diagramm nach dem Aufstellen der in Abb. 12 gezeigten Lochplattenabsorber**

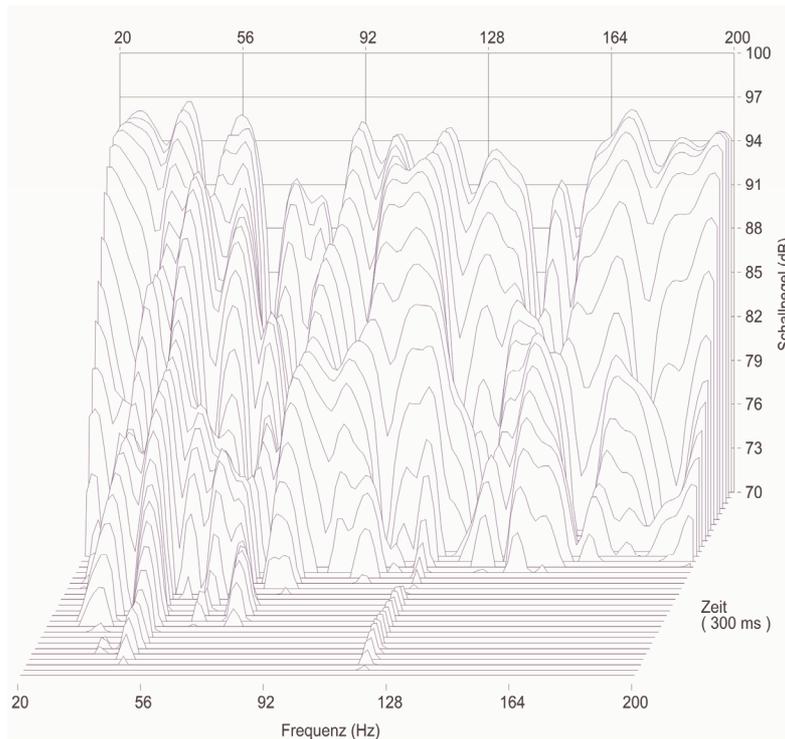
## 10 Digitale Raumkorrektur

Auch wenn die akustische Behandlung des Hörraums mit Resonatoren wirksam ist, hat sie doch einen Nachteil. Um eine merkliche Raummodendämpfung zu erreichen, ist ein relativ großes Resonatorvolumen notwendig. Hierbei können sich ästhetische Konflikte ergeben, denn nicht jeder ist bereit, zugunsten einer verbesserten Klangqualität große Holzkästen in seinen Wohnraum zu integrieren.

Wenn man finanziellen Mehraufwand nicht scheut, gibt es seit einigen Jahren mit der digitalen Raumkorrektur eine Möglichkeit, raumakustische Probleme schon an der Quelle zu bekämpfen. Die Grundidee besteht darin, dass der Frequenzgang des Hörraumes schon bei der Musikwiedergabe berücksichtigt wird: Die Frequenzen, wo die Maxima liegen, werden von vornherein leiser wiedergegeben, an den Minima im Frequenzgang spielen die Lautsprecher entsprechend lauter, so dass sich insgesamt ein ausgeglichener Frequenzgang ergibt.

Das ist einfach gesagt, aber schwer umgesetzt. In der Praxis arbeitet ein digitales Raumkorrektursystem so, dass der Raum zuerst mit einem Messmikrofon vermessen wird. Eine spezielle Software errechnet die digitalen Filter, um den „inversen Frequenzgang“ des Raumes zu erhalten (wobei nicht nur die Frequenz, sondern auch der Zeitverlauf berücksichtigt wird). Bei der Wiedergabe befindet sich das digitale Raumkorrektursystem zwischen CD-Spieler und Verstärker-Endstufe und wendet die digitalen Filter auf das Audiosignal an [5].

Dass das Prinzip funktioniert, ist in Abbildung 14 zu erkennen. Sie zeigt das Messergebnis, nachdem ein digitales Raumkorrektursystem (Tact RCS 2.0) bei der Wiedergabe verwendet wurde. Die Raumresonanzen sind weitgehend unterdrückt, ehemals „schwächelnde“ Frequenzbereiche werden voller wiedergegeben.



**Abbildung 14: Im Hörraum gemessenes Wasserfall-Diagramm bei Benutzung eines digitalen Raumkorrektursystems (Tact RCS 2.0)**

Im Zeitbereich sind ebenfalls deutliche Verbesserungen zu erkennen; das Abklingverhalten des Schalls im Raum ist nun über den gesamten Frequenzbereich deutlich homogener als zuvor. Der Hör-eindruck bestätigt die Messergebnisse. Das schwammige Dröhnen und das Phänomen des „one note bass“ sind verschwunden. Es bestätigt sich, dass nicht mehr, sondern weniger Bass die akustischen Probleme löst. Gerade weil die Wiedergabe an den problematischen Frequenzen reduziert wird, ist der Bass nun präziser und klingt damit „knackiger“.

Die Optimierung durch digitale Raumkorrektur kann nur für *einen* Hörort erfolgen. Wir wissen, dass sich der Frequenzgang des Hörraums aufgrund der komplexen Gestalt der Raummoden von Ort zu Ort verändert. Wechselt man den Hörort (z. B. weil man sich vom Sessel auf das Sofa setzt), wird die Raumkorrektur zunichte gemacht. Die Geräte versuchen, diesen Nachteil teilweise dadurch zu kompensieren, dass sich per Fernbedienung unterschiedliche Korrekturprogramme für die wechselnden Hörorte auswählen lassen.

Die Programmierung einer digitalen Raumkorrektur weist eine entfernte Ähnlichkeit mit dem „Einmessen“ einer Surround-Anlage auf. Auch wenn von der Werbung manchmal anderes suggeriert wird, handelt es sich dabei um etwas grundlegend Verschiedenes. Neben einer Schallpegelmessung wird beim Einmessen oft auch der Frequenzgang korrigiert, allerdings durch analoge Bandpassfilter („Equalizer“), die aus verschiedenen technischen Gründen nicht sehr schmalbandig sein können. Typischerweise wird versucht, den gesamten Frequenzgang mit 8 Kanälen zu erfassen. Dass auf diese Weise keine Raummodenbekämpfung möglich ist, zeigt ein Blick auf die starken Schwankungen innerhalb kleiner Frequenzbereiche in Abbildung 3 und Abbildung 8. Zur Raumkorrektur ist eine weit-aus feinere Auflösung erforderlich als analoge Filter liefern können. Die digitalen Filter im hier verwendeten Raumkorrektursystem arbeiten mit einer Frequenzauflösung von 0,4 Hz im Bassbereich und 4 Hz im Hochtonbereich.

## 11 Raumakustische Messungen selbst durchführen

Das in diesem Artikel angesprochene Thema lebt davon, dass man selbst Messungen durchführt und die Erkenntnisse zur Optimierung des eigenen Hörraumes anwendet. Mit einer entsprechenden Mess-Software, einem Mikrofon und einem Computer kann man ohne großen Aufwand selbst raumakustische Messungen durchführen. Eine kurze Einführung soll im Folgenden gegeben werden.

Für die in diesem Artikel beschriebenen Messungen wurde die Software Acoustisoft ETF 5 verwendet. Eine Demoversion ist unter [www.etfacoustic.com](http://www.etfacoustic.com) erhältlich. Das Erstellen von Wasserfalldiagrammen und das Abspeichern der Ergebnisse ist mit der Demoversion nicht möglich.

Die Benutzeroberfläche des Programms macht einen etwas antiquierten Eindruck und die Bedienung ist nicht sehr intuitiv. Deshalb tut man gut daran, am Anfang das ausführliche Tutorial („Getting Started“) durchzulesen.

An Hardwarevoraussetzungen benötigt man neben dem Mikrofon einen Mikrofonvorverstärker und vier Cinch-Audioverbindungskabel. Sollte kein Mikrofonvorverstärker (z. B. von der Schulband) zu beschaffen sein, kann man ihn im Versandhandel für etwa 30 Euro bestellen.

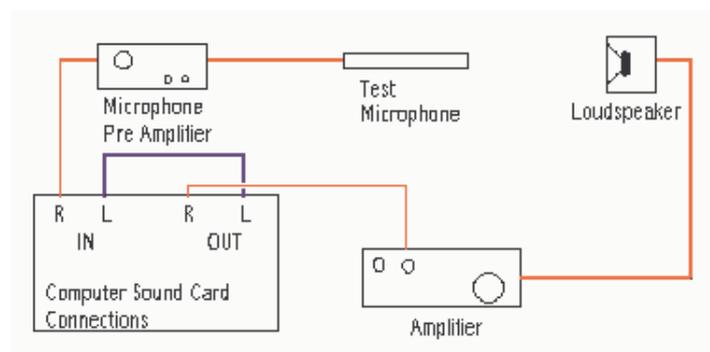


Abbildung 15: Verkabelung bei der Messung mit Acoustisoft ETF

Die Verkabelung erfolgt nach dem Schema in Abbildung 15. Sie wird verständlich, wenn man das Messprinzip kennt: Der Computer erzeugt ein Audiosignal in Form eines kurzen Rauschimpulses. Das Signal wird vom linken und rechten Ausgang der Soundkarte gleichermaßen wiedergegeben. Der linke Kanal wird ohne Umwege sofort in den linken Soundkarteneingang eingespeist. Am rechten Kanal wird das Signal über den Verstärker vom Lautsprecher wiedergegeben, durchläuft den Hörraum, wird vom Mikrofon erfasst und zum rechten Soundkarteneingang geleitet. Durch Vergleich des linken und rechten Soundkarten-Eingangssignales kann man den Einfluss der Übertragungsstrecke (und damit des Hörraums) ermitteln.

Die meisten Soundkartenanschlüsse sind auf Klinkenstecker ausgelegt. Hier werden beim Anschluss eventuell Y-Adapter benötigt, um die beiden Cinchstecker der Audiokabel aufzunehmen.

Beim Aufruf des Programms erscheint zunächst ein leeres Bildschirmfenster. Mit File → New Measurement → Normal Transfer Function bereitet man das Programm auf eine Messung vor. Es erscheint das Messfenster (Abbildung 16). Mit der Funktion „Level Check“ wird überprüft, ob die am Verstärker eingestellte Lautstärke ausreicht. Mit „Start Test“ wird dann das Testsignal (ein kurzes digitales Rauschen) wiedergegeben. Anschließend gelangt man mit „OK“ zum Auswertefenster (Abbildung 17). Hier können die verschiedenen Diagrammtypen mit den Schaltflächen am unteren Rand ausgegeben werden.

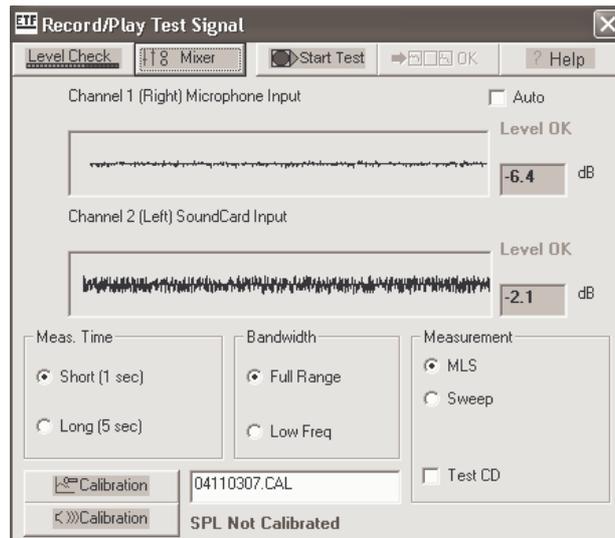


Abbildung 16: Messfenster des Programms Acoustisoft ETF 5

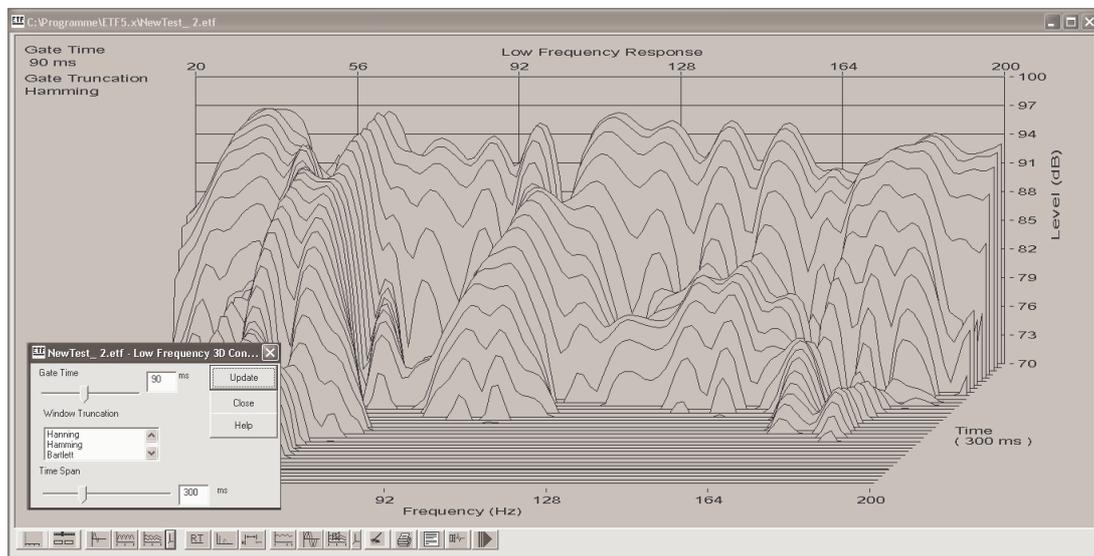


Abbildung 17: Auswertefenster des Programms Acoustisoft ETF 5

## 12 Fazit

Die Raumakustik ist ein Alltagskontext, mit dem man beim Thema „stehende Wellen“ das Interesse der Schüler am Musikhören aufgreifen kann. Die Schülerinnen und Schüler können selbst Messungen und Berechnungen durchführen und die Ergebnisse direkt zur kostengünstigen Verbesserung ihrer eigenen Hörsituation verwenden. Im Unterricht wird man in der Regel aus Zeitgründen nur den ein-dimensionalen Fall behandeln. Die im zweiten Teil des Artikels beschriebenen Vertiefungen eignen sich als Ausgangspunkt für ein Projekt oder für eine Facharbeit. Hier können dann auch andere Aspekte der Raumakustik zur Sprache kommen (z. B. die durch Reflexionen verursachten Probleme im Hochtonbereich), auf die in diesem Artikel aus Platzgründen nicht eingegangen werden konnte.

Dank an Herrn Hans-Martin Burmeister, Inhaber des Braunschweiger Hifi-Geschäfts *Neuklang*. Ihm und seiner Webseite [fl-electronic.de](http://fl-electronic.de) verdanke ich viel von dem Wissen, das in diesem Artikel dargestellt ist.

[1] F. Alton Everest, *Master Handbook of Acoustics*, New York: McGraw-Hill (2001).

[2] R. Berger, Das Gruppenpuzzle am Beispiel des Mikrowellenofens. *PdN/PhiS* 2/56, S. 5-11 (2007).

[3] Z. B. beim Projekt milq: <http://milq.tu-bs.de>

[4] Walter Fendt: Applet „Stehende Längswellen“: <http://www.walter-fendt.de/ph14d/stlwellen.htm>

[5] <http://www.fl-electronic.de/neu/tact-rs2.html>

### **Kurzfassung:**

Die Raumakustik ist ein Alltagskontext, mit dem man beim Standard-Oberstufenthema „stehende Wellen“ das Interesse der Schüler am Musikhören aufgreifen kann. Es wird gezeigt, welche akustischen Probleme die Eigenschwingungen der Luft in einem Hörraum (Raummoden) verursachen. Es werden experimentelle und theoretische Vorschläge für die Behandlung des Themas gegeben. Darüber hinaus wird auf die Behandlung der raumakustischen Probleme mit verschiedenen Maßnahmen (Boxenrücken, Absorber, digitale Raumkorrektur) eingegangen.