

## Qualitätskriterien von akustischen Gitarren

Ein Unterrichtskonzept von Matthias Hauck

Der im Folgenden vorgeschlagene Unterrichtsgang basiert auf dem Artikel „While my guitar gently weeps.“ aus Physik in unserer Zeit und bietet hierzu Arbeits- und Hintergrundmaterial [Hauck (2011)]. Er kann im Rahmen der mechanischen Wellenlehre nach der Behandlung der Themen „erzwungene Schwingungen“ und „Wellenausbreitung auf begrenzten Trägern“ in der Kursstufe eingesetzt werden – vielleicht in einer kurzen Einheit zur Akustik. Darüber hinaus ist es denkbar, Teile dieses Themas in Form einer GFS zu vergeben. In abgespeckter Version könnten die Arbeitsblätter und Folien auch im Physik- oder NwT-Unterricht der Mittelstufe eingesetzt werden.

Die entsprechenden Materialien wurden im Unterricht bereits verwendet und fanden bei den Schülerinnen und Schülern großen Anklang. Gerade die Verbindung zwischen dem Hören von Klängen, einer sinnlichen Empfindung, und deren physikalischen Beschreibung beziehungsweise Analyse wurde stets als sehr spannend wahrgenommen.

<b>Fachgebiet</b>	Physik
<b>Bezug zu</b>	Mathematik, Naturwissenschaft und Technik (NwT)
<b>Thema</b>	Akustik
<b>Stichwort</b>	Frequenz, Wellenlänge, Amplitude, Frequenzspektrum, Fourier-Analyse, Resonanz, Eigenschwingungen, Grundschiwingung, Oberschiwingung, Resonanzspektrum, Gitarre
<b>Klassenstufe</b>	Mittelstufe, Kursstufe
<b>Zeit</b>	4 Stunden

## Hintergrundinformationen

### 1. Das Resonanzverhalten der Gitarre

Viele wichtige physikalische Eigenschaften von Musikinstrumenten sind eng mit deren Schwingungsverhalten verknüpft. Jansson veröffentlichte 1971 als erster holographische Interferogramme einiger Deckenmoden der klassischen Gitarre (siehe den Physik in unserer Zeit 42: 296). Mit Hilfe verschiedener Messungen zum Frequenzverhalten konnte er für die untersten fünf Moden nachweisen, dass jede einer Spitze in der Resonanzkurve entspricht [Jansson (1971)].

Im Frequenzbereich bis etwa 300 Hz findet man bei allen klassischen Gitarren, unabhängig von ihrer Bauweise, zwei ausgeprägte Einzelresonanzen. Die Erste im Bereich zwischen 100 und 140 Hz und die zweite zwischen 200 und 280 Hz. Zu höheren Frequenzen hin schließen sich Resonanzgebiete mit einer Vielzahl kleiner Einzelspitzen und -senken an. Diese sind jedoch von Instrument zu Instrument recht verschieden. Bei Westerngitarren ist die zweite Resonanz nicht notwendigerweise so stark ausgeprägt wie bei klassischen Gitarren. Sie wird von einer extrem starken ersten Resonanz, der so genannten Helmholtz-beziehungswise Hohlraumresonanz, überstrahlt. Die beiden unteren Resonanzen sind für den Klang aller Saiteninstrumente von großer Bedeutung [Hutchins (1962)]. In diesem

Frequenzbereich ist die Intensität der Teiltöne extrem davon abhängig, wie ihre Lage zu den Grundresonanzen ist.

Untersuchungen zu klassischen Gitarren an der Physikalisch Technischen Bundesanstalt zeigten, dass die tiefste Resonanzspitze im Frequenzspektrum verschwindet, falls man durch Abdecken des Schalllochs die Hohlraumresonanz abdämpft [Meyer (1985a)]. Wird die Gitarre, mit Ausnahme des Schalllochs, vollständig in Sand eingebettet, so tritt nur noch eine Resonanz auf. Diese ist allerdings erheblich höher als die tiefste Grundresonanz im Normalzustand. Eine Gitarre deren Korpus in Sand eingebettet ist, deren Decke aber frei schwingen kann, besitzt wieder zwei Resonanzen, die mit ihrer Frequenzlage dem Normalfall, das heißt ohne Einbettung, verhältnismäßig nahe kommen. Daraus lässt sich schließen, dass die beiden tiefsten Resonanzen gekoppelt sind, und die untere Grundresonanz im Wesentlichen auf einer Resonanz des im Korpus eingeschlossenen Luftvolumens beruht. Für die zweite Resonanz sind hauptsächlich die Schwingungen der Decke maßgeblich.

Eine Ähnliche Arbeit von Richardson zeigte, dass es nur bei Deckenmoden unter 600 Hz zu einer besonders starken Kopplung mit dem eingeschlossenen Luftvolumen und auch der Bodenplatte kommt [Richardson et al. (1990)]. Der Gitarrenboden erhöht hierbei die Nachgiebigkeit des Luftpolsters im Korpus. Ausgehend von der Kopplung zwischen der Decke und dem Luftvolumen beschrieb Caldersmith die Funktionsweise der Gitarre im Bereich der tiefen Frequenzen analog der eines Bassreflex- Lautsprechers [Caldersmith (1978)]. In diesem Modell wurden die Schwingungen der Bodenplatte vernachlässigt, da ihre Amplituden im Vergleich zu den Schwingungen der Deckenplatte sehr klein sind. Darüber hinaus wird der Boden in der Regel durch den Körper des Musikers fast komplett abgedämpft. Dieser Ansatz zeigte, dass für Frequenzen unterhalb der ersten Grundresonanz das Luftvolumen des Korpus und die Deckenplatte nicht in Phase vibrieren. Für Frequenzen darüber vibrieren sie in entgegengesetzter Phase. Die Schallabstrahlung der Gitarre wird im Frequenzbereich der beiden Grundresonanzen in erster Linie von der eingeschlossenen Luft des Korpus bestimmt. In diesem Bereich liegt die Größe des Instruments unter der Wellenlänge des abgestrahlten Schalls. Die Gitarre besitzt daher das Abstrahlverhalten eines Monopols. Bei höheren Frequenzen werden die Schwingungen der Decke dominant. Der Einfluss des Hohlraums und vor allem des Bodens spielt dann nur noch eine untergeordnete Rolle, da über die Zargen wenig Energie von der Decke zum Boden übertragen wird.

Während die Grundresonanzen der Gitarre durch eine starke Kopplung von Decke und Boden über den Hohlraum entstehen, muss die Anregung im mittleren und hohen Frequenzbereich über die Zargen erfolgen. Auf diesem Weg ist der Energieübertrag jedoch recht ungünstig. Die holographischen Interferogramme, die im Artikel in Physik in unserer Zeit abgebildet sind, zeigen darüber hinaus, dass mit zunehmender Frequenz eine stärkere Aufteilung der Decke in mehrere schwingende Bereiche, ähnlich dem Verhalten Chladnischer Klangfiguren auf metallischen Platten, auftritt [Jansson (1983)]. Benachbarte Gebiete schwingen vielfach gegenphasig. Dadurch wird die Schallabstrahlung der Gitarre zu einem Multipolverhalten. Die Lautstärke und Klangfarben sind nun stark von der Frequenz des Tons und der Position des Zuhörers abhängig.

## 2. Psychoakustik und Qualitätsuntersuchungen

Jürgen Meyer führte in einer Untersuchung an der Physikalisch Technischen Bundesanstalt sehr detaillierte Untersuchungen zur Verbindung zwischen der subjektiven Einschätzung über die Qualität einer klassischen Gitarre und deren objektiven physikalischen Eigenschaften durch [Meyer (1985a)]. Dabei wurden fünfzehn Gitarren von vierzig Versuchspersonen beurteilt. Für die Beurteilung wurden sechs verschiedene klassische Stücke aufgenommen und anschließend paarweise den Probanden vorgespielt. Diese mussten sich jeweils für diejenige Gitarre entscheiden, die ihnen klanglich besser gefiel. Auf Fragen nach einzelnen Klangeigenschaften wurde dabei verzichtet. Den Versuchspersonen wurde lediglich die Frage gestellt: "Welchem Instrument der in den Beispielen vorgeführten Instrumentenpaare geben Sie bei einer Beurteilung des Klanges den Vorzug?"

Die Resonanzspektren der Gitarren wurden gemessen, indem ein vibrierender Stift an einem elektrodynamischen System auf die Mitte des Steges gesetzt wurde. In einem reflexionsarmen Raum wurden sechs Mikrophone auf einem Kreis von 1 m Radius in der Ebene des Steges um das Instrument gruppiert. Hinter jedem Mikrophon lag ein Messverstärker, der einen, dem Schalldruck entsprechenden, Gleichspannungswert für eine anschließende Mittelwertbildung lieferte. Meyer korrelierte die Eigenschaften der Resonanzkurven, wie zum Beispiel die Amplitude der Resonanzspitzen in bestimmten Frequenzbereichen, mit den Ergebnissen aus den psychoakustischen Tests. Auf diese Weise gelang es ihm, 19 Qualitätskriterien für klassische Gitarren anzugeben, die sich als Zahlenwerte aus deren Frequenzkurven ablesen lassen. Sie schaffen eine Grundlage, die eine Beurteilung der Instrumentenqualität auf objektiver Basis ermöglicht. Dabei haben jedoch lediglich die in der unten stehenden Tabelle aufgeführten sieben Kriterien einen Korrelationskoeffizient größer als 0,4. Dieses Ergebnis ist nicht verwunderlich, da die Qualität des Klangs eines Instrumentes nicht nur durch einen isolierten Parameter bestimmt wird, sondern sich durch das Zusammenspiel diverser Qualitätskriterien ergibt. Trotzdem zeigen die Resultate, dass das Resonanzverhalten einer Gitarre direkt mit der subjektiven Bewertung der Klangqualität in Verbindung gebracht werden kann.

Bezeichnung des Kriteriums	Korrelationskoeffizient
Spitzenpegel der 3. Resonanz	0,73
Resonanzüberhöhung der 3. Resonanz	0,69
Halbwertsbreite der 3. Resonanz	-0,64
Pegelmittelwert Terzen 80 Hz bis 125 Hz	0,59
Pegelmittelwert Terzen 250 Hz bis 400 Hz	0,58
Pegelmittelwert Terzen 315 Hz bis 500 Hz	0,57
Resonanzüberhöhung zwischen 1. und 2. Resonanz	0,55
Pegelmittelwert Terzen 80 Hz bis 1000 Hz	0,49
Spitzenpegel der 2. Resonanz	0,46
Pegelmittelwert Terzen 800 Hz bis 1250 Hz	0,43
Halbwertsbreite der 1. Resonanz	0,40

In einer weiteren Untersuchung zu Qualitätskriterien von klassischen Gitarren wurden zunächst Gitarristen gefragt, welche für sie die wichtigsten Eigenschaften im Klang einer Gitarre seien [Jansson (1983)]. Dabei stellte sich heraus, dass die Stärke und Fülle des Tones von größter Bedeutung ist. Des Weiteren sollten die Töne lange anhalten und nicht sofort verklingen. Im Anschluss wurden psychoakustische Tests mit drei von Hand

gefertigten Gitarren aus Spanien und zwei fabrikneuen schwedischen Modellen durchgeführt. Von jedem Instrument wurden die Leersaiten und deren Oktaven den Versuchspersonen vorgespielt. Dann wurden sie gefragt, welcher Ton am stärksten und besten klingt. Die spanischen Gitarren wurden dabei stets besser bewertet als die schwedischen. Darüber hinaus zeigte sich, dass die Ergebnisse von Musikern und Nichtmusikern gut übereinstimmten. Bei der Analyse der aufgenommenen Töne stellte sich heraus, dass die besser bewerteten Gitarren im Bereich bis 3000 Hz einen höheren Schallpegel aufwiesen. Besonders im Bereich unter 200 Hz und über 400 Hz lagen die weniger guten Gitarren signifikant unterhalb des Pegels der hochwertigen Instrumente.

## Vorschlag zu einer entsprechenden Unterrichtseinheit

Der hier vorgestellte Ablauf der Stunden ist rein exemplarisch zu verstehen und kann an jeder Stelle abgeändert werden. Die zu den Arbeitsblättern passenden Klangbeispiele sind auf der Website erhältlich. Bis auf die Gitarrenklänge wurden diese mit der freien Software „Praat“ erstellt, die sich darüber hinaus gut zur Signalanalyse eignet. Neben den Arbeitsblättern (AB) und Folien (F) werden auch zwei relevante Standardversuche aus dem Physikerunterricht der Kursstufe beschrieben.

Zum Verständnis der im Artikel diskutierten Gitarrenspektren ist es sinnvoll, zunächst einfache Klangspektren im Unterricht zu behandeln. Hierzu benötigt man die Unterscheidung zwischen synthetischen Einzeltönen und Klängen (AB1). Im Anschluss folgt eine rein anschauliche Betrachtung der Fourier-Analyse (AB2) zur Erstellung von Frequenzspektren, die je nach Qualität des Kurses auch mathematisch vertieft behandelt werden kann.

Danach wird zunächst das Spektrum eines klassischen synthetischen Tons oder einer Stimmgabel im Vergleich zu einem entsprechenden Instrumentalton betrachtet (F1, F2). Verwendet man hierbei beispielsweise eine Gitarre, so kann man das Entstehen des entsprechenden Obertonspektrums mit Hilfe des folgenden klassischen Schulversuches erklären.

### Demonstrationsexperiment 1

Wie in der nebenstehenden Abbildung<sup>1</sup> dargestellt, wird zunächst ein Gummiband durch das Loch im Hebelarm eines Elektromotors gefädelt und auf einer Länge von etwa 2 m an beiden Enden fest eingespannt. Dabei ist darauf zu achten, dass der Hebel, der etwa 10 cm von einem Ende angebracht wird, in Ruhe eine waagerechte Stellung einnimmt. Das Seil sollte gespannt, jedoch nicht zu straff sein. Der Elektromotor wird an einen Frequenzgenerator angeschlossen, dessen Frequenzbereich zu Beginn auf etwa 10 Hz eingestellt ist. Die Frequenz wird langsam erhöht, bis sich die erste Eigenschwingung – die Grundschiwingung – einstellt. Dieser Vorgang wird für die ersten Oberschwingungen sukzessive wiederholt. Da



<sup>1</sup>Die Fotos zu den dargestellten Demonstrationsexperimenten wurden von Dr. Rudolf Löhken zur Verfügung gestellt.

bei höheren Oberschwingungen die Amplitude der jeweiligen Eigenschwingung kleiner wird, empfiehlt es sich, die Amplitude der Erregerfrequenz entsprechend zu erhöhen. Zur optischen Fixierung der jeweiligen Eigenschwingungen kann ein Stroboskop eingesetzt werden. Außerdem lassen sich die um eine halbe Schwingungsdauer versetzten Schwingungszustände gleichzeitig sichtbar machen, wenn man das Stroboskop mit der doppelten Erregerfrequenz betreibt.

Im Hinblick auf die Behandlung von Resonanzspektren der Gitarren ist es im Folgenden sinnvoll, zweidimensionale Schwingungen von Metallplatten zu betrachten:



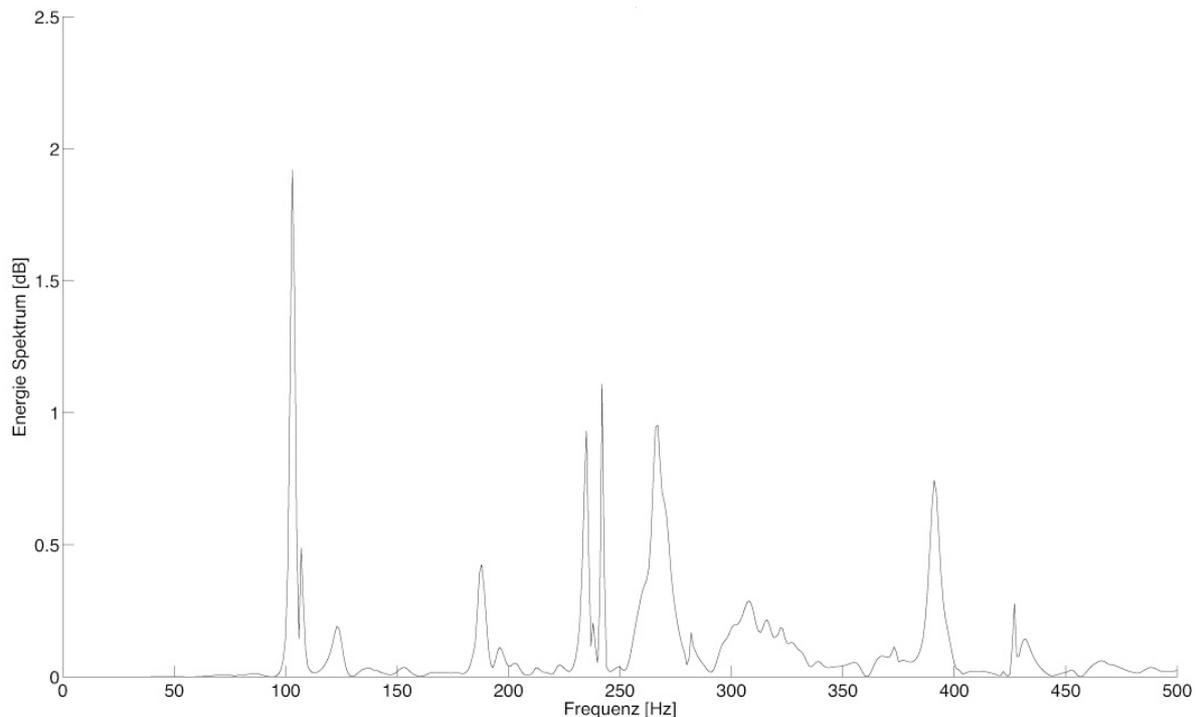
### **Demonstrationsexperiment 2**

Eine quadratische oder runde Platte wird auf einem Stativ befestigt. Da die Platte später mit Sand oder Salz bestreut wird, das leicht herunterrieseln kann, sollte man den Stativfuß beispielsweise auf eine Papierunterlage stellen. Ferner wird ein Sondenmikrofon an das computergestützte Messwerterfassungssystem CASSY Lab angeschlossen und direkt über die Platte gestellt.

Diese wird zunächst mit einem Hammer angeschlagen, der entsprechende Klang wird mit Hilfe von CASSY Lab aufgenommen und im Anschluss einer Fourier-Analyse unterzogen. Das Frequenzspektrum enthält einige deutliche Resonanzspitzen, deren Frequenzen notiert werden sollten. Diese Vorgehensweise ist bei akustischen Untersuchungen in der Regel üblich, um sicher zu stellen, dass man später bei der eigentlichen Messung keine Resonanz übersieht.

Nun wird die Platte mit Sand- oder Salzkörnern bestreut und mit einem unmittelbar darunter angebrachten Lautsprecher in den jeweiligen Frequenzen beschallt. Der Lautsprecher wird mit einem Sinusgenerator angeregt. Hierbei ist darauf zu achten, dass in der Nähe der Eigenfrequenzen die Tonhöhe beziehungsweise Frequenzen in recht kleinen Schritten geändert werden, da die entsprechende Eigenschwingung sich nur in einem sehr schmalen Frequenzbereich einstellt und dabei die Sandkörner in Bewegung versetzt. Bei der Anregung mit den jeweiligen Frequenzen sind die so genannten Chladnischen Schwingungsfiguren zu beobachten, die sich auch auf den schwingenden Oberflächen von Instrumenten ergeben<sup>2</sup>.

Im Anschluss an diese einführenden Betrachtungen kann man sich nun der Erklärung der im Artikel dargestellten Resonanzspektren der Gitarren widmen. Dabei kann zunächst in Analogie zu Versuch 2 das Resonanzspektrum einer Gitarre grob gemessen werden, indem man gegen diese klopft. Das entsprechende Klopfen wird mit einem Mikrofon, das in etwa 1 m Entfernung auf der Höhe des Schalllochs der Gitarre platziert ist, aufgenommen. Mit Hilfe der Software CASSY Lab oder Praat kann das entsprechende Resonanzspektrum wie folgt erstellt werden:



<sup>2</sup>YouTube Video: (1) <http://www.youtube.com/watch?v=cT30XOfd1yI>  
(2) <http://www.youtube.com/watch?v=3uMZzVvnSiU&feature=related> [zuletzt besucht am 10. Juni 2012]

In der letzten Stunde dieser kurzen Unterrichtseinheit kann mit den Klangbeispielen von der Webseite gearbeitet werden. Spielt man beide Beispiele von Gitarrenklängen den Schülerinnen und Schülern nacheinander vor, so ist die Entscheidung welcher der beiden als wohlklingender empfunden wird in der Regel eindeutig. Auf Grundlage dieses Ergebnisses können abschließend die Eigenschaften der Spektren in Zusammenhang mit der Hörerfahrung gebracht werden (AB3).

## Literatur

- G. W. Caldersmith (1978).** Guitar as a reflex enclosure. *J. Acoust. Soc. Am.* 63: 1566–1575.
- M. Hauck (2011).** While my guitar gently weeps. *Physik in unserer Zeit*, 42: 296–301.
- C. M. Hutchins (1962).** The Physics of Violins. *Scientific American* 207 (5): 78–93.
- E. V. Jansson (1971).** A study of acoustical and hologram interferometric measurements of the top plate vibrations of a guitar. *Acoustica* 25: 95–100.
- E. V. Jansson (1983).** Function, construction and quality of the guitar. Royal Swedish Academy of Music, Stockholm.
- J. Meyer (1985).** Akustik der Gitarre in Einzeldarstellungen. Verlag E. Bochinsky, Frankfurt/ M.
- J. Meyer (1985).** The tonal quality of violins. Royal Swedish Academy of Music, Stockholm. *Proc. SMAC* 83.
- B. E. Richardson, G.P. Walker und M. Brooke (1990).** Synthesis of guitar tones from fundamental parameters relating to construction. *Proc. Inst. Acoustics* 15 (3).