

## 1. Literatur: Signaturmoden

Physikalische Experimente an Musikinstrumenten sind interessant, aber kompliziert – und bei der Überzahl der Arbeiten auf diesem Gebiet verliert man die Übersicht. Den Hobby-Physiker stört das nicht. Hat er ein passendes Instrument zur Hand, wird experimentiert. Ich zum Beispiel besitze noch aus meiner Jugendzeit die Geige, an der ich das Spielen lernte. Mit mäßigem Erfolg, im Schulorchester wurde ich in die Bratsche straf(?)versetzt.

Interessant an der Geige und allen anderen Saiteninstrumenten ist die Tatsache, dass man sie überhaupt hört: Die Saite allein, gestrichen oder gezupft, bringt kaum einen Ton hervor. Es sei denn, sie überträgt ihre Schwingungen auf einen Resonanzkörper. Dieser ist die eigentliche Schallquelle. Der Geigenkorpus ist deshalb, wenig überraschend, das am meisten untersuchte Forschungsobjekt des Instruments. Auf niedrigem Niveau (Hobby) lässt sich natürlich kaum eins der professionellen Experimente ausführen. Man kann aber immerhin zeigen, dass es um das Phänomen Resonanz geht.

Wir beschränken uns mit unseren Experimenten auf die Resonanzen der Geige bis zu einer oberen Grenze von 600 Hz. Der tiefste vom Instrument erzeugte Ton (leere G-Saite) hat die Frequenz 196 Hz. Im Bereich zwischen den beiden Frequenzen liegen die Schwingungsmoden des Geigenkörpers, die in der Literatur<sup>1</sup> »Signaturmoden« genannt werden. Sie sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die üblichen Bezeichnungen sind: *A0* und *A1* für die Moden, bei denen die Luft (Air) in Bewegung ist, und *B1–* und *B1+* für die Moden, bei denen der Korpus (Body) vibriert. *CBR* (»Centre Bout Rhomboid«) oder *C2* ist offenbar eine Art Torsions-Schwingung des Bodens und/oder Deckels, und zwar in der Mitte (»Centre Bout«) der Geige. Diese Schwingung haben wir nicht anregen können, wir betrachten also *nur* die A- und B-Moden.

Tabelle 1 Als »Signaturmoden« bezeichnete Resonanzen einer Violine. Die Frequenzen sind Mittelwerte von 17 Instrumenten<sup>3</sup>. Physikalische Erklärung (Ursache) angelehnt an die Arbeit von Coffey<sup>2</sup>

Mode (Bezeichnung)	Frequenz (Mittelwerte)	Physikalische Erklärung
A0	275 ± 9 Hz	Helmholtz-Resonanz, bei der eine kleine Luftsäule ober- und unterhalb der <i>f</i> -Löcher schwingt (senkrecht zur Ebene des Deckels) und die Luft im Geigenkörper als Feder wirkt (Expansion und Kontraktion des Luftvolumens).
A1	469 ± 19 Hz	Stehende Welle der Luftsäule in Längsrichtung des Geigenkörpers, wie zum Beispiel in einer Orgelpfeife. Frequenz der Grundschwingung = Schallgeschwindigkeit 340 m/s dividiert durch das Doppelte der Länge 0,36 m der Geige = 472 Hz).
CBR oder C2	407 ± 31 Hz	CBR = »Centre Bout Rhomboid«, offenbar die einer Torsionsbewegung (oder Scherung <sup>2</sup> ) ähnliche Schwingung von Boden und/oder Deckel in der Mitte der Geige. »Rhomboid« = (Schiefwinkliges) Parallelogramm.
B1–	475 ± 16 Hz	Schwingung des Deckels im Bereich beider <i>f</i> -Löcher. Transversale Bewegung des Holzes (senkrecht zur Deckelebene), links des <i>f</i> -Lochs in umgekehrter Richtung wie rechts des Lochs (Phasenverschiebung von 180°). Starke Abstrahlung des Schalls direkt durch das Vibrieren des Holzes – und auch, weil Luft durch die <i>f</i> -Löcher gepumpt wird.
B1+	541 ± 22 Hz	

Die Erläuterungen in der Tabelle habe ich zum Teil der Arbeit von Coffey<sup>2</sup> entnommen. Ich hoffe, ich habe ihn richtig verstanden. Coffey<sup>2</sup> zum Beispiel schreibt »*CBR* ... is said to have shear-linear in-plane relative motion of the top and back plates« – das verstehen nur Fachleute.

## 2. Eigene Experimente

### 2.1 Resonanzen A0 und A1

Wir betrachten zunächst die Resonanzen A0 und A1. Da sie Bewegungen der Luft darstellen, sollten sie auch durch Schallschwingungen angeregt werden. Deshalb bringen wir in der Nähe eines der beiden  $f$ -Löcher einen Lautsprecher an, der ein Schallsignal mit einem breiten Spektrum von Frequenzen abstrahlt – und zwar so, dass alle Frequenzen mit gleicher Intensität vertreten sind. Das Gehör empfindet das Lautsprechersignal als monotones Rauschen, in der Physik heißt es »Weißes Rauschen«. Aus diesem Signal filtert die Geige diejenigen Frequenzen heraus, die sie zum Mitschwingen anregen. Andere Frequenzen werden unterdrückt. Das heißt, ein Mikrophon, das beispielsweise über dem anderen (zweiten)  $f$ -Loch angebracht ist und dem gefilterten Rauschen lauscht, registriert ein Frequenzspektrum, das an den Stellen der Resonanzen erhöhte Intensität zeigt.



Abbildung 1 Foto der Anordnung. Links im Bild der Lautsprecher, er bestrahlt das auf der Seite des Kinnhalters befindliche  $f$ -Loch. Das Rauschsignal wird von den drei Geräten im Hintergrund erzeugt (in der Mitte der eigentliche Rauschgenerator, darüber ein in  $dB$ -Stufen einstellbarer Abschwächer und unten ein  $NF$ -Verstärker zur Anpassung an den Lautsprecher). Über dem zweiten  $f$ -Loch das (Elektret-)Mikrophon, dessen Ausgang mit der Soundkarte des PCs verbunden ist.

Abbildung 1 zeigt ein Foto der Messaufbaus, Abbildung 2 das mit dieser Anordnung aufgenommene Spektrum. Es ist der obere Linienzug mit den beiden Erhebungen. Das breite »Gebirge« bei 275 Hz ( $\pm 25$  Hz) kann man der Helmholtz-Resonanz A0 zuordnen, den schlankeren Peak bei 475 Hz ( $\pm 12$  Hz) der A1-Resonanz. Um sicher zu sein, dass es sich in beiden Fällen um herausgefilterte Resonanzen handelt, wurde auch das Untergrund-Rauschen aufgenommen (Mikrophon vom  $f$ -Loch weg gerichtet). Das Ergebnis ist der untere Linienzug bei etwa  $-90$  dB, er liegt deutlich unter den Erhebungen bei 275 und 475 Hz. Die scharfen Linien bei 50, 100 und 200 Hz entstammen dem Versorgungsnetz (Grund- und Oberwellen).

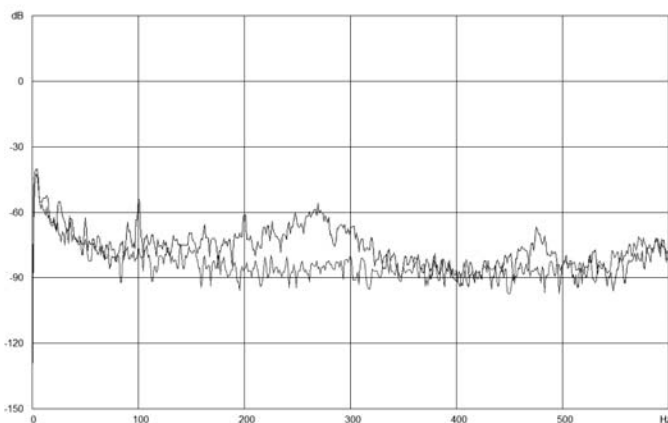


Abbildung 2 Spektrum der Schallstrahlung, die eine Geige aus dem »Weißes Rauschen« eines Rauschgenerators herausfiltert (oberer Linienzug). Die Peaks bei 275 Hz und 475 Hz heben sich deutlich vom Untergrund (dem unteren Linienzug bei etwa  $-90$  dB) ab. Sie können der A0- bzw. A1-Resonanz zugeordnet werden: Ihre Frequenzen entsprechen innerhalb der Fehlergrenzen den Werten in Tabelle 1.

In einer zweiten Messung weisen wir nach, dass die beiden Peaks durch Bewegungen von Luft verursacht werden, und nicht durch Vibration des Geigen-Deckels oder -Bodens. Dazu wurde das Spektrum noch zwei weitere Male aufgenommen – zunächst mit einer auf dem Geigen-Deckel aufgeklebten Zusatzmasse, danach ohne diese. Die Zusatzmasse war eine kleine Plastikscheibe (Durchmesser 2,5 cm, Masse 3,25 g). Die Geigenschwingungen wurden in diesem Fall zwar anders als durch Schalleinstrahlung angeregt, nämlich durch seitliches Klopfen auf den Steg, das Spektrum sollte aber dadurch nicht beeinflusst werden. Beide Spektren sind in Abbildung 3 als oberer Linienzug zu sehen, das Spektrum mit Zusatzmasse in 3a), das ohne in 3b). Sie zeigen die beiden bereits bekannten Peaks bei 275 Hz und 475 Hz. Da sie über einige Millisekunden gemittelt wurden, sind sie weniger verrauscht als der Untergrund (unterer Linienzug in beiden Abbildungen), der nicht gemittelt wurde. In der Gegenüberstellung der Abbildungen 3a) und 3b) erkennt man, dass die Zusatzmasse die Lage

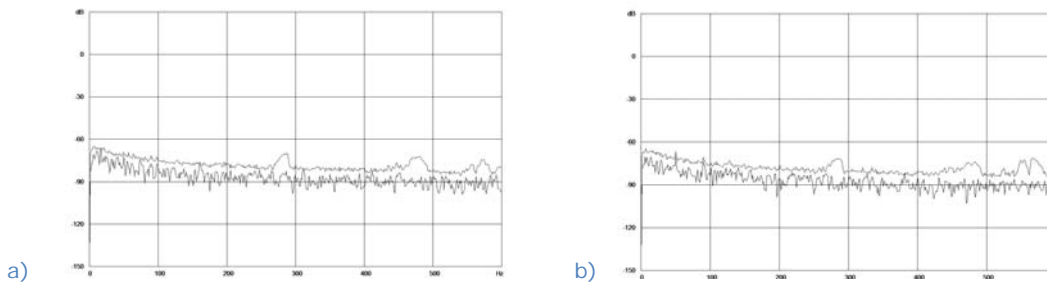


Abbildung 3 Spektrum der Geigen-Resonanzen, angeregt durch leichtes seitliches Klopfen auf den Steg der Geige: a) mit Zusatzmasse (3,25 g), die auf dem Geigendeckel aufgeklebt wurde, b) ohne Zusatzmasse. Das Spektrum (oberer Linienzug) wurde in beiden Fällen über einige Millisekunden gemittelt, ist daher weniger verrauscht als der nicht gemittelte Untergrund (unterer Linienzug). Die Lage der beiden Resonanzen A0 und A1 wird durch die Zusatzmasse nicht beeinflusst. Das spricht eindeutig für Resonanzen und Schallabstrahlungen, die durch Luftbewegung hervorgerufen werden – und bestätigt die Zuordnung A0 und A1.

der beiden Peaks nicht beeinflusst. Das spricht eindeutig für Resonanzen durch Luftbewegung. Es sind die schwingenden Luftsäulen in den  $f$ -Löchern (A0) oder stehenden Wellen im Innern der Geige (A1), die sie hervorrufen. Ihre Frequenzen werden durch geometrische Abmessungen bestimmt, zusätzlich angebrachte Massen ändern sie nicht. Der Doppelpeak bei 550/570 Hz wurde nicht weiter untersucht, er ist vermutlich *nicht* das Doublett ( $B1^-/B1^+$ ).

## 2.2 Resonanzen $B1^-$ und $B1^+$

Bei den Resonanzen  $B1^-$  und  $B1^+$  handelt es sich um Bewegungen von Deckel- und/oder Bodenplatte der Geige. Es sind entfernte Verwandte der Plattenschwingungen, die schon Chladni<sup>4</sup> untersuchte. Auch ein vibrierender Geigenboden sollte Chladnische Knotenlinien erzeugen, die Theorie dazu ist dann aber doch sehr komplex. Also beschränke ich mich auf den Nachweis, dass es im Bereich der Frequenzen von  $B1^-$  und  $B1^+$  (Tabelle 1) Schwingungen des *Geigenbodens* gibt. Abbildung 4

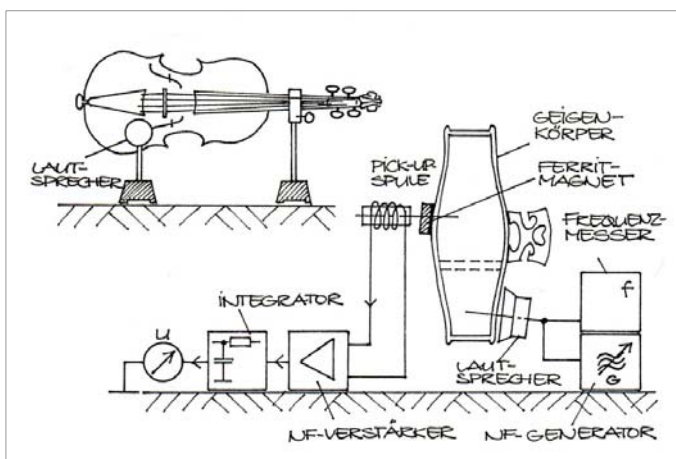


Abbildung 4 Skizze des Aufbaus zur Messung der Korpusresonanzen. Beschreibung im Text.

zeigt eine schematische Skizze des Messaufbaus. Der Geigenkörper wird durch den Sinuston eines Lautsprechers («Schallkopf») in Schwingungen versetzt. Der Ton wird in einem durchstimmbaren *NF*-Generator erzeugt, seine Frequenz mit einem Frequenzmesser angezeigt. Der Lautsprecher ist auf eine Stelle des Geigenkörperdeckels unterhalb der *f*-Löcher gerichtet. Auf dem gegenüberliegenden Boden des Geigenkörpers ist ein flacher Ferritmagnet aufgeklebt, der mit dem Geigenkörper mitschwingt. Er erzeugt in einer Pick-up-Spule ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld, so dass die Schwingung des Geigenkörpers an den Enden der Spule eine Wechselspannung hervorruft. Diese wird in einem

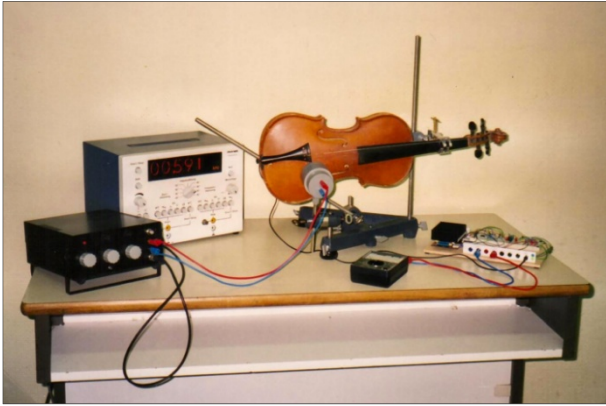


Abbildung 5 Foto der Anordnung zur Messung der Korpusresonanzen.

*NF*-Verstärker auf eine ausreichend große Amplitude gebracht und dann gleichgerichtet. Die gleichgerichtete Spannung ist ein Maß für die Stärke, mit der die Geige an der Stelle des Ferritmagneten schwingt. Sie wird in einem Vielfachinstrument angezeigt. Ein Foto des Aufbaus zeigt Abbildung 5.

Gemessen wurde im Frequenzbereich zwischen 400 Hz und 1100 Hz, und zwar in ausreichend kleinen Schritten, um möglichst alle Resonanzen aufzulösen (als getrennte Peaks sichtbar zu machen). Das Messergebnis zeigt Abbildung 6. Die beiden ausgeprägten Resonanzen bei 438 Hz und 496 Hz (in Rot hervorgehoben) können als sichere Kandidaten für *B1-* und *B1+* gehandelt werden, auch wenn ihre Frequenzen nicht mit denen der Tabelle 1 übereinstimmen: Bei den Margen, die dort für die Streuung einzelner Werte angegeben sind, handelt es sich um Standardabweichungen. Das heißt, jeder dritte Einzelwert liegt außerhalb des angegebenen Intervalls.

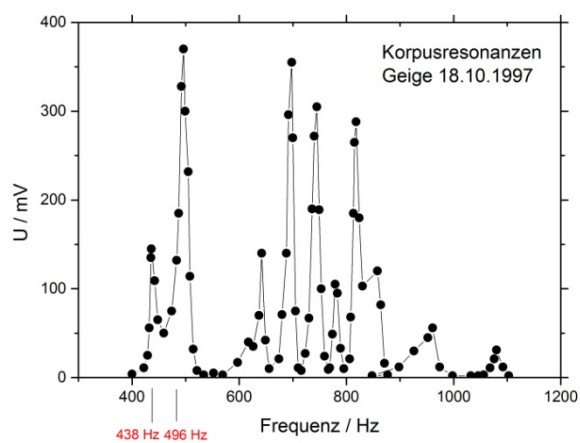


Abbildung 6 Spektrum der Schwingungen eines Geigenbodens. Die beiden in Rot hervorgehobenen Peaks (438 Hz und 496 Hz) sind Kandidaten für die in der Literatur mit *B1-* und *B1+* bezeichneten Korpusresonanzen der Geige.

Auch wenn die Zuordnung 438 Hz (*B1-*) und 496 Hz (*B1+*) nicht zu beweisen ist: es wurde gezeigt, dass es sich um Resonanzen handelt, bei denen der Korpus (hier der Geigenboden) schwingt

## Anmerkungen und Literatur

- <sup>1</sup> Bissinger, G.: *Structural acoustics of good and bad violins*, J. Acoust. Soc. Am. 124, 1764 (2008).
- <sup>2</sup> Coffey, J.: *The Air Cavity, f-Holes and Helmholtz Resonance of a Violin or Viola*, <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Air-Cavity%2C-f-holes-and-Helmholtz-Resonance-of-Coffey/b1bb71ba93b6c3a1ffca36da68f51c07da15e9eb>
- <sup>3</sup> Bissinger, G., und Gregorian, A.: *Relating Normal Mode Properties of Violins to Overall Quality Signature Modes*. Catgut Acoustical Society Journal 4 (8), 73-45 (2003).
- <sup>4</sup> Chladni, Ernst Florens Friedrich (Physiker und Naturforscher, 1756-1827): *Die Akustik*, Leipzig, 1830. z. B. Bibliothek des Max-Planck- Instituts für Wissenschaftsgeschichte, <http://www.mpiwg-berlin.mpg.de/de/index.html>