

Zur Physik von Weingläsern

GERT DENNINGER

Dieses Dokument ist eine Ergänzung zum Artikel „Das Ohr trinkt mit“ in **Physik in unserer Zeit**, 44. Jahrgang 2013, Nr. 3, S. 142.

Resonanzfrequenz

Resonanzfrequenz

Zu einer groben quantitativen Abschätzung der Resonanzfrequenz f eines Grogglases kommt man, wenn man sich dieses als einen Zylinder vom Radius r vorstellt, der aus einer Platte gebogen wurde. (Die Zylinderform wird durch ein Grogglas besser erfüllt als durch ein Weinglas.) In einer Platte pflanzt sich die Biegewelle näherungsweise mit einer Geschwindigkeit von

$$v = f\lambda = (\pi u f d / \sqrt{3})^{1/2}$$

fort, wobei f und λ Frequenz und Wellenlänge, u die Schallgeschwindigkeit in der Platte und d die Dicke der Platte darstellen. Im Falle der Grundschiwingung beträgt der Umfang des Glases gerade zwei Wellenlängen $2\lambda = 2\pi r$.

Setzt man dies in die obige Gleichung ein und löst nach f auf, so erhält man

$$f = u d / (\sqrt{3} \pi r^2).$$

Für das von uns benutzte Glas ergibt sich mit $d = 1$ mm, $2r = 61$ mm und der Schallgeschwindigkeit in Glas $u = 5300$ m/s eine Resonanzfrequenz $f = 1047$ Hz. Mit Hilfe des Klaviers stellen wir eine perfekte Übereinstimmung des Weinglastons mit dem dreifach gestrichenen Cis, also einer Frequenz von 1109 Hz fest. Im Rahmen der groben Abschätzung erhalten wir also gute Übereinstimmung.

In jüngster Zeit hat French eine detaillierte Ableitung der Theorie für Weingläser gegeben, die „mit einigem Erfolg auf reale Weingläser und andere derartige Gefäße“ [3] angewandt werden können.

Quelle: H.-J. Schlichting, C. Ucke, *Phys. Unserer Zeit* **1995**, 26(3), 139.

Literatur

[3] A. P. French, *Am. J. Phys.* **1983**, 51, 688.

Zweifach aufgespaltene Schwingungen

Nicht nur die Grundschwingung von Weingläsern ist zweifach aufgespalten, sondern auch alle Oberschwingungen bestehen immer aus zwei nahe beieinander liegenden Resonanzen. Jedes Glas hat alle seine Schwingungsmoden doppelt, wobei die Aufspaltungen Δf_i für die Grundschwingung und die Oberschwingungen unterschiedlich sind. Misst man Gläser aus einem Glasset, so hat jedes einzelnen Glas sein eigenes, unterschiedliches Aufspaltungsmuster. Es gibt im Regelfall keine exakt gleichen Gläser innerhalb eines Sets, und jedes Glas kann anhand seines individuellen Aufspaltungsmusters eindeutig identifiziert werden. Exemplarisch zeigen wir die Resultate an einem Rotweinglas-Set von Nachtmann, Serie „Vivendi“ (Abbildung 1).

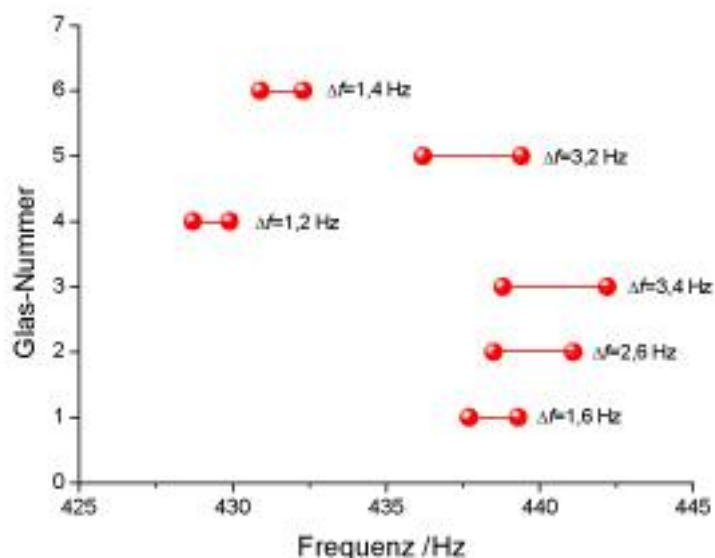


Abb. 1 Aufgetragen ist die Lage der beiden Resonanzfrequenzen der Grundschwingung jeweils bei den 6 Gläsern eines Rotweinsets der Fa. Nachtmann, Serie „Vivendi“.

Wohlklang beim Anstoßen

Beim Anstoßen zweier Gläser erhält man mindestens vier Grundtöne, hinzu kommen in der Regel eine Reihe von Oberschwingungen (siehe Artikel im Heft). Beim untersuchten „Vivendi“-Set (Abbildung 1) klingen die Gläser 1, 2, 3 und 5 sehr gut zusammen, aber Glas 1 mit Glas 4 klingt völlig schräg. Glas 4 ist sozusagen das „schwarze Schaf“ in dieser Familie, es harmonisiert höchstens mit Glas 6. Was kann man dagegen tun?

Man füllt zum Beispiel Gläser 1-3 soweit, dass ihre Frequenzen um etwa 12 Hz gesenkt werden. 12 Hz sind ungefähr 2,7 % und eine Füllung auf 1/3 bewirkt dies. Dann ist das Glas 4 aber immer noch leer! Füllt man Glas 4 nur zu 1/4 und die Gläser 1-3 zu etwa 40 %, dann wird der Klang beim Anstoßen harmonisch.

Einfluss der Luft

Ein Weinglas befindet sich im Regelfall in normaler Umgebung und schwingt in Luft. Hat diese Luft einen merklichen Einfluss auf die Schwingungsfrequenz und die Resonanzbreiten? Die Vermutung läge nahe, dass die kleine Luftreibung zur Dissipation von Schwingungsenergie führt und dadurch die Resonanzen deutlich breiter würden als bei einer Schwingung im Vakuum. Da die Güte der Schwingung jedoch schon in Luft sehr hoch ist (Resonanzfrequenz dividiert durch Breite = $510 \text{ Hz}/0,17 \text{ Hz} = 3000$), sollte sich die Resonanzfrequenz kaum merklich ändern. Diese Vermutung wird durch Experimente allerdings praktisch vollständig widerlegt.

Evakuiert man den Raum um das Weinglas in einem geeigneten Rezipienten (zylindrischer Glaszylinder) und misst die Schwingungen mit geeigneter Messtechnik, etwa per Mikrowellenradar-Doppler-Technik oder Kontaktmikrofon, so stellt man zwar eine leichte Reduktion der Resonanzbreite im Vakuum fest. Aber viel auffälliger ist eine merkliche, unerwartete Erhöhung der Resonanzfrequenz im Vakuum. Um den Einfluss des umgebenden Gases näher zu untersuchen, füllt man den Glaszylinder mit einem relativ schweren Gas, Schwefelhexafluorid SF_6 . Dann beobachtet man eine deutliche Erniedrigung der Resonanzfrequenz, zudem eine sichtbare Verbreiterung der Resonanzlinie.

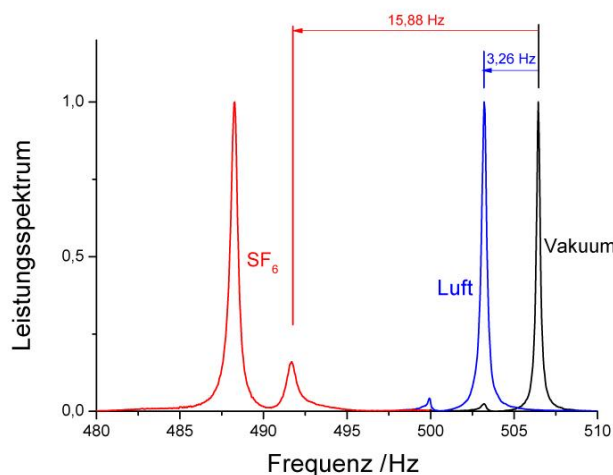


Abb. 2 Änderung der Resonanzfrequenzen bei Vakuum und SF_6 -Atmosphäre.

In Abbildung 2 sind die Messergebnisse exemplarisch für die Grundschwingung eines Glases gezeigt. Diese recht starke Änderung der Resonanzfrequenz mit dem Umgebungsgas kann überhaupt nicht mit der erwarteten sehr kleinen Abnahme durch die Reibung erklärt werden. Für Resonanzgüten von 3000 ist dieser Effekt im $\text{Sub-}10^{-6}$ -Bereich und nicht im Prozentbereich.

Die Ursache für die deutliche Frequenzverschiebung liegt vielmehr darin, dass sich auf dem Glas eine Grenzschicht des Gases ansammelt, die mitbewegt werden muss und damit die

Masse erhöht und die Frequenz senkt. Dann sollte die Frequenzänderung linear mit der Dichte des Gases und damit proportional zur molaren Masse sein. Genau dieses zeigen die Experimente unter Vakuum und mit Luft und SF₆.

Die Resonanzfrequenzen kann man sehr leicht mit Genauigkeiten von 10 mHz messen. Innerhalb dieser Genauigkeit hängt die Resonanzfrequenz eines Weinglases auch schon deutlich messbar vom Luftdruck ab! Eine Luftdruckänderung von nur 3 hPa ändert die Resonanzfrequenz des Glases um gerade messbare ca. 10 mHz. In einem Passagierflugzeug mit einer üblichen Kabinendruckhöhe von 2500 m im Reiseflug hätte dieses Weinglas eine um etwa 1 Hz höhere Resonanzfrequenz.

Anwendung als Drehratensensor

Auf den ersten Blick scheinen direkte Anwendungen fern zu liegen. Fachdidaktisch ist das System schwingendes Weinglas ein exzellentes Beispiel um in die Eigenschaften mechanischer Schwingungen einzuführen, sie experimentell vorzuführen und auszuwerten. Solche Experimente sind geeignet für Anfängervorlesung, Praktika und mit Einschränkungen auch für den Schulunterricht. Für die Live-Vorführung im Hörsaal eignen sich Audio-Analyser-Programme wie Spectrum Lab resp. Analyser 2000. Die eigentlichen hochpräzisen Analysen führt man am besten mit MATLAB durch. Abbildung 3 zeigt einen einfachen Aufbau für die Demonstration des Drehratensensor-Prinzips, das in Raumsonden eingesetzt wird (siehe Text im Heft).



Abb. 3 Ein drehendes Weinglas als Drehratensensor. Der experimentelle Nachweis ist direkt im Spektrum zu erkennen und ist selbst in dieser einfachen Anordnung fast quantitativ.

Bezugsquellen

Gläser: alle handelsüblichen Rotwein- oder Weißwein-Gläser, keine speziellen Erfordernisse.

Analyser 2000: www.brownbear.de/toc.htm

Spectrum Lab: www.qsl.net/dl4yhf/spectra1.html