

## BIG B4NG challenge, 19. Wettbewerb Aufgabe 2

Diese Aufgabe wird vom Fachbereich Physik der Leibniz Universität Hannover gestellt.

Weitere Informationen zum Angebot der Physik für Schülerinnen und Schüler findet ihr unter <http://www.praktikumphysik.uni-hannover.de/SuS>

### Physik pur!

In dieser Aufgabe geht es um die Akustik von Schalen und Gläsern. Wer bspw. beim Zuprosten zwei Weingläser zusammen stößt, erzeugt einen Klang – je nach Qualität des Glases einen mehr oder weniger schönen. Solche Klänge physikalisch zu untersuchen, ist das Ziel dieser Aufgabe.

Um die physikalische Beschreibung möglichst einfach halten zu können, machen wir uns ein einfaches physikalisches Modell (Abb. 1):

Die Schale bzw. das Glas habe eine zylindrische Form der Höhe  $H$  und mit dem Radius  $R$ . Die Wanddicke sei  $d$ . Der Stiel spielt keine physikalische Rolle. Er verhindert lediglich, dass das schwingende System hin und her wackelt.

Im unteren Teil der Abbildung sind die unterschiedlichen Möglichkeiten der Randschwingungen gezeigt. Sie sind um  $45^\circ$  gegeneinander versetzt. Die farbigen Punkte markieren jeweils die Schwingungsknoten, also die Stellen, an denen keine Auslenkung auftritt. Man spricht von den zwei Grundmoden der Randschwingung. Abb. 2 zeigt die Position der Schwingungsknoten der zwei Grundmoden bei einer Suppenterrine. Die Asymmetrie der Terrine führt dazu, dass die beiden Grundmoden zwei deutlich unterschiedliche Eigenfrequenzen haben. Die Messungen dazu werden weiter unten vorgestellt.

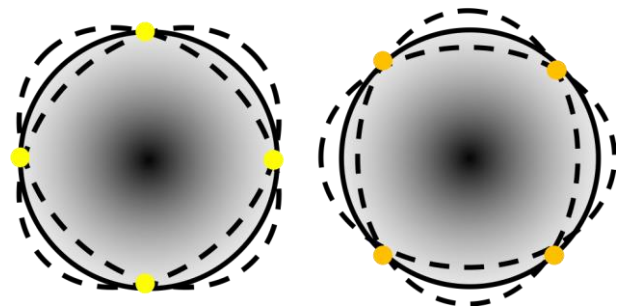
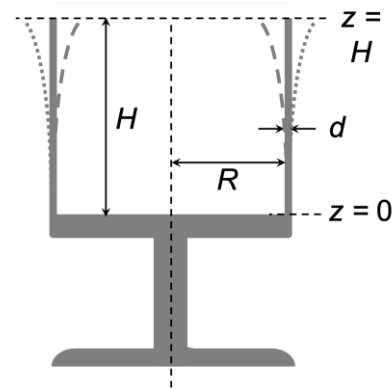


Abbildung 1: Schwingungen des Weinglases, von der Seite und von oben

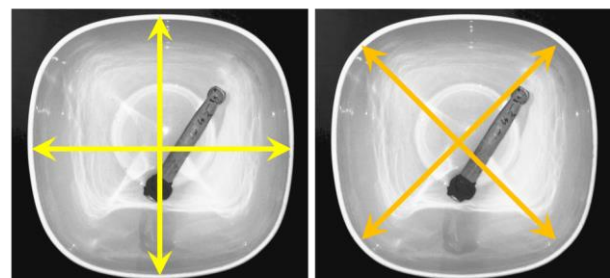


Abbildung 2: Schwingende Terrine von oben; die Pfeile zeigen die Positionen der Schwingungsknoten; in der Schale liegt der Klöppel hier nur zur Ansicht.

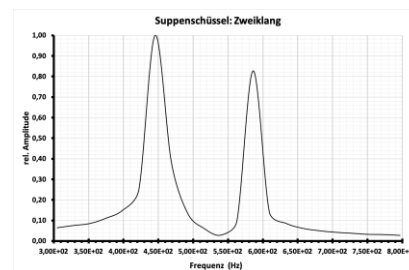
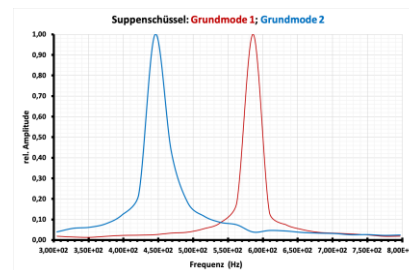
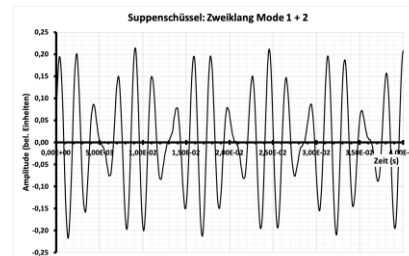
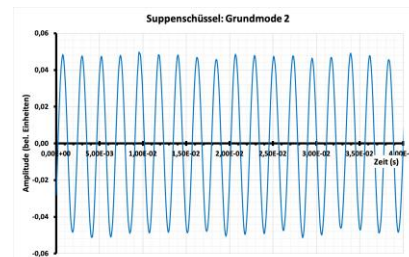
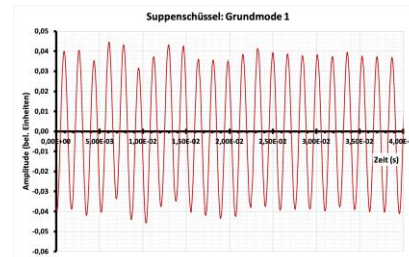
Bei dieser Aufgabe werdet ihr die Grundmoden schwingender Schalen oder Gläser experimentell untersuchen:

- Welche Klangarten treten auf?
- Wovon hängen die Frequenzen der Schwingungsmoden ab?
- Wie kann man den Unterschied der Modenfrequenzen vergrößern?
- Wie wirkt sich eine Befüllung mit Wasser aus?

**Zur Orientierung: Die Akustik der Suppenterrine**

Um euch die Orientierung bei diesem Experiment zu erleichtern, haben wir als ein Beispiel die Akustik der Suppenterrine aus Abb. 2 untersucht. Als Klöppel wurde eine Holzwäscheklammer verwendet, deren eines Ende mit einem dicken Gummiband umwickelt wurde, um den Anschlag zu dämpfen. Zur Aufnahme der Schwingungen und zur Berechnung der Audiospektren haben wir die Handy-App phyphox verwendet. Dazu ausführlich mehr weiter unten.

Je nach Stelle, an der die Schüssel angeschlagen wird, lässt sich jeweils eine der Schwingungsmoden oder beide gleichzeitig anregen. Abb. 3 zeigt die Ergebnisse: Die beiden Grundmoden haben deutlich unterschiedliche Frequenzen: Die Anzahl der Schwingungen ist bei der Mode 1 größer. Berechnet man die Audiospektren (phyphox!), wird dies bestätigt. Beide Peaks wurden getrennt gemessen, aber in ein Diagramm gezeichnet. Ihre unterschiedliche Lage verrät die unterschiedlichen Peak-Frequenzen: 586 Hz bzw. 422 Hz – fast eine Quart auseinander. Den Zweiklang erhält man, wenn man den Schüsselrand so anschlägt, dass beide Schwingungen zugleich erklingen. Bildteil c) zeigt das Schwingungsbild und Bildteil e) das Audiospektrum. Die zwei Peaks aus Abb. 3d) sind wieder zu erkennen. Der Anteil mit der höheren Frequenz ist etwas kleiner, beim Anregen des Zweiklanges wurde diesem Teil offenbar weniger Energie zugeführt.



b)

c)

d)

e)

**Abbildung 3:** Schwingungsbilder der Suppenschüssel; a) Schwingung Mode 1; b) Schwingung Mode 2; c) Schwingung Zweiklang 1&2; d) Audiospektrum Mode 1/Mode 2; e) Audiospektrum Zweiklang

Ein bekanntes Phänomen ist: Je mehr Wasser eingefüllt wird, desto tiefer wird der Ton. Natürlich ist das auch bei unserer Schüssel so, wie Abb. 4 zeigt, hier wurden beide Grundmoden getrennt dargestellt.

**a) Grundlagenteil (10 Punkte): Das Messgerät**

Als Messgerät verwendet ihr euer Smartphone zusammen mit der Experimentier-App phyphox des 2. Physikalischen Instituts der RWTH in Aachen. Abb. 5 zeigt ein Screenshot des Programms zur Akustikmessung, das ihr hier benötigt.

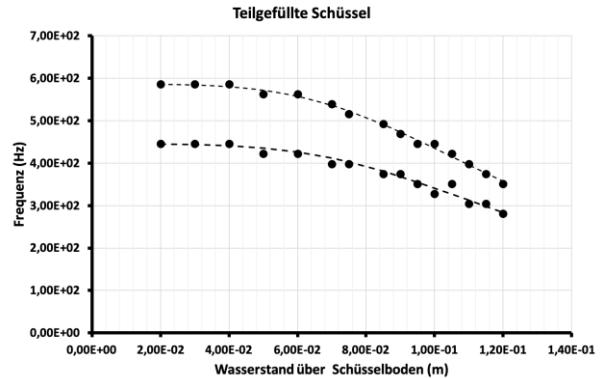
**Aufgabe 1:** Der Grundlagenteil befasst sich mit der Erkundung der App. Auf der Webseite [www.phyphox.org](http://www.phyphox.org) findet ihr eine ganz ausführliche Anleitung für den Download und das Experimentieren. Dr. Sebastian Staacks, der Entwickler von phyphox erklärt dort genau, wie alles funktioniert. Probiert es aus!

**1.1** Zuerst ladet ihr die App auf euer Smartphone und bringt sie zum Laufen. Startet nun das Experiment „Audio Spektrum“ – und los geht es.

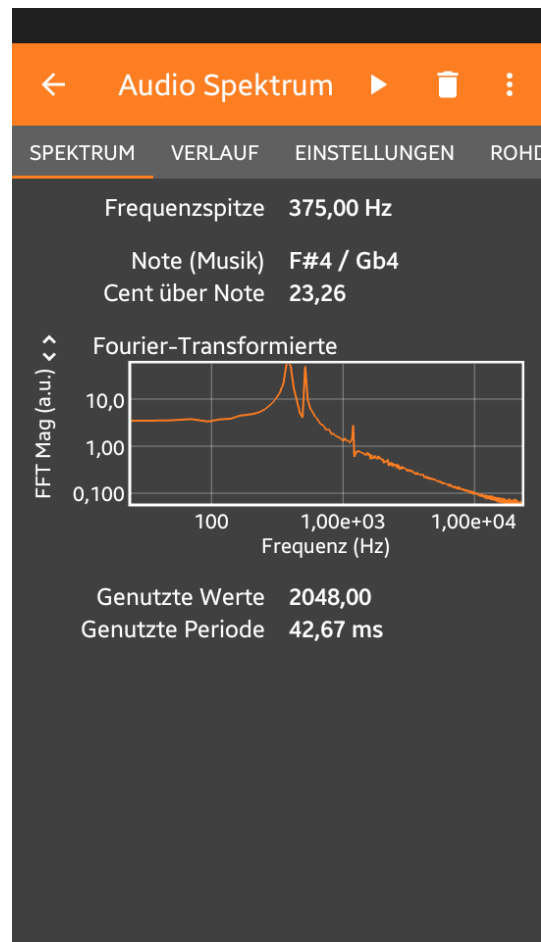
**1.2** Probiert das Programm mit unterschiedlichen Schallquellen (Blockflöte, Gitarre, Stimmgabel, Stimme) aus. Zur Teilnahme am Wettbewerb müsst ihr uns eine sorgfältige Dokumentation für mindestens drei unterschiedliche Instrumente schicken. Geeignet sind dazu Screenshots der Messergebnisse (wie Abb. 5) zusammen mit einer Beschreibung, was ihr untersucht habt. Überprüft, ob die Note (Musik) stimmt.

Natürlich könnt ihr auch die anderen tollen phyphox-Experimente ausprobieren.

**Wichtig** (damit beim Anschlagen nichts kaputt geht): Fertigt euch aus einem Holzstiel einen Klöppel, indem ihr um ein Ende mehrfach ein dickes Gummiband schlingt.



**Abbildung 4:** Je höher der Wasserspiegel über dem Boden ist, desto niedriger wird die Frequenz. Gestrichelt ist eine angepasste theoretische Kurve



**Abbildung 5:** Screenshot von phyphox

## Aufgabe 2

2.1 Sucht euch nun ein Gefäß (Weinglas, Schüssel), das richtig gut klingt, wenn es mit dem Klöppel angeschlagen wird, und erzeugt aussagekräftige Bilder der dazu gehörenden Audio-spektralen. Schickt uns drei gelungene phyphox-Screenshots.

2.2 Macht für die Teilnahme am Wettbewerb ein Foto eures Versuchs.

### b) Mittlerer Teil (10 Punkte): Messungen

Den Anfang eurer Messungen bildet die Abhängigkeit der Schwingung von der Füllhöhe mit Wasser. Sucht ein Gefäß, das noch gut klingt, auch wenn es schon recht voll ist.

- Überprüft qualitativ, wie sich die Schwingungsfrequenz  $f$  mit zunehmender Füllhöhe verändert. In manchen Bereichen verändert sie sich schnell mit zunehmender Höhe, in anderen Bereichen nur sehr langsam. Bestimmt diese Bereiche.
- Dort, wo sich  $f$  stärker mit der Füllhöhe ändert, benötigt ihr mehr Messpunkte, wo sich nur wenig tut, weniger.
- Tragt in einer Tabelle  $f$  als Funktion der Füllhöhe  $z$  (Abb. 6) ein. Nehmt für eine Genauigkeitsbetrachtung wenigstens 5 Messreihen auf und berechnet daraus für jede Höhe  $z$  den Mittelwert  $\langle f \rangle$  und den Standardfehler  $u(f)$ .
- Zeichnet ein Diagramm, in dem ihr  $(f(z=0)/\langle f(z) \rangle)^2$  gegen  $(z/H)^4$  auftragt. Wenn alles richtig gelaufen ist und die Form eures Klangerzeugers zu unserem einfachen Modell passt, sollten die Messpunkte ungefähr auf einer Geraden mit dem Achsenabschnitt 1 liegen:

$$\left( \frac{f(z=0)}{\langle f(z) \rangle} \right)^2 = 1 + a \left( \frac{z}{H} \right)^4.$$

Bestimmt mithilfe linearer Regression einen Zahlenwert für  $a$ .

### c) Für die Profis (10 Punkte):

Auf der Homepage des Schülerlabors foeXlab (<https://www.praktikumphysik.uni-hannover.de/foexlab.html>) findet ihr die Zip-Datei weinglas.zip mit einer wave-, einer txt- und einer xls-Datei. Die Wave-Datei enthält ein Sample des Kluges des Weinglases aus Abb. 7: Mit einem kleinen Magneten wurde eine deutliche Asymmetrie erzeugt. Die beiden Grundmoden haben damit, ähnlich wie bei der Suppenschüssel in der Einführung, unterschiedliche Eigenfrequenzen, die eine etwas höher, die andere etwas tiefer. Die Wavedatei ist zum Anhören gedacht, die txt-Datei eignet sich gut zur Analyse.

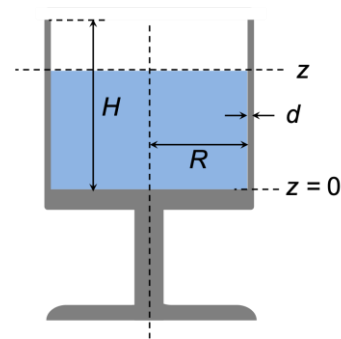
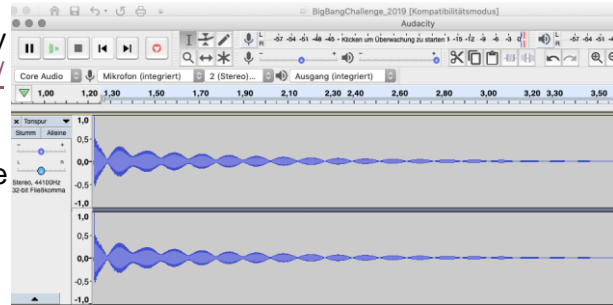


Abbildung 6: Geometrie des mit Wasser teilweise gefüllten Gefäßes.



Abbildung 7: Das asymmetrische Weinglas

Ladet die Wave-Datei auf euren Computer und importiert sie in das Programm audacity (der Download von <https://www.audacity.de/> ist kostenlos). Ihr solltet jetzt ein Bild etwa wie Abb. 8 sehen. Die Einzelschwingung ist so nicht aufgelöst, aber die sog. Einhüllende zeigt ein Zu- und Abnehmen der Amplitude und damit eine entsprechende Zu- und Abnahme der Lautstärke. Das Phänomen wird als Schwebung bezeichnet. Die Frequenz der Lautstärkeänderung ist die sog. Schwebungsfrequenz. Ihr könnt euch auch eine eigene Klangdatei erzeugen. Wichtig ist: Die Schwebung muss gut erkennbar sein.



**Abbildung 8:** Die Zeitreihe der Schwingung mit audacity dargestellt; deutlich ist die Schwebung zu erkennen

Hier wurde die Asymmetrie durch den kleinen Magneten erzwungen. Häufig fehlt den Weingläsern die Rotationsasymmetrie von ganz allein. Durch Ungenauigkeiten bei der Produktion gibt es dickere und weniger dicke Stellen der Glaswandung. Den Unterschied der Modenfrequenzen könnt ihr dann wieder durch entsprechende Schwebungen erkennen.

### Aufgabe 1

Woran *hört* bzw. sieht man, dass (mindestens) zwei unterschiedliche Frequenzen an der Klangentstehung beteiligt sind? Wie würde die Zeitreihe für einen reinen Ton aussehen?

### Aufgabe 2

Eure Aufgabe ist, die Frequenzen der Töne zu bestimmen, die an dem Klang beteiligt sind.

- Bei welcher Frequenz etwa liegt der Hauptteil des Klanges?
- Mit audacity kann man auch ein Audiospektrum erzeugen: „Spektrum zeichnen“ im Menüpunkt „Analyse“. Leider ist die Auflösung zu schlecht. Aber man sieht, welche Frequenzen beteiligt sind.
- Man kann die Daten aber exportieren und mit einer größeren Frequenzauflösung anzeigen. Den Export haben wir für euch vorgenommen: Weinglas.xls enthält die Daten. Mit einem Tabellenkalkulationsprogramm könnt ihr die Daten darstellen. Bei optimaler Frequenzachse sieht man deutlich, aus welchen Tonfrequenzen der Zweiklang aufgebaut wurde. Bestimmt diese zwei Werte.

### Aufgabe 3

Mathematisch werden Schwingungen z. B. durch eine Sinusfunktion dargestellt:

$$A = A_0 \sin(2\pi \times f \times t).$$

Zeigt nun, dass die additive Überlagerung zweier Schwingungen gleicher Amplitude, aber unterschiedlicher Frequenz  $A_1(t) = A_0 \times \sin(2\pi \times f_1 \times t)$  bzw.  $A_2(t) = A_0 \times \sin(2\pi \times f_2 \times t)$  zu folgendem Klang führt: Eine Schwebung mit der Schwebfrequenz  $(f_1 - f_2)/2$  und einer mittleren hörbaren Frequenz von  $(f_1 + f_2)/2$ .

**Viel Erfolg!**

## Allgemeine Hinweise

**Einsendeschluss: Sonntag, 17. November 2019, 19:59 Uhr.**

Gebt eure Lösungen über unser Portal ab: <https://portal.studienberatung.uni-hannover.de/anmeldungen/users/login>

Zulässige Dateiformate sind: PDF für die zusammengeschriebene Lösung (mit eingebetteten Bildern) sowie unter Windows gängige Videoformate, die sich ohne Installation von zusätzlicher Software abspielen lassen, z. B. mp4.

Die Dateien sollten nicht größer als 7,5 MB sein (die Dateien können gezippt sein)! Bitte gebt auch euren Teamnamen, die Namen der Gruppenmitglieder sowie deren Schulen an. Bitte benennt eure hochgeladenen Dateien nach dem Gruppennamen.

**ACHTUNG bei Zip-Dateien!** Um sicherzugehen, dass eure Dateien wirklich fehlerfrei und für die Korrektoren/-innen zu öffnen sind, solltet ihr eure Zip-Dateien etc. noch mal von eurem Account herunterladen und öffnen. Dateien, die sich nicht öffnen lassen, können nicht bewertet werden!

Gebt eure Lösungen auch dann ab, wenn ihr nicht alle Fragen beantworten konntet! Vielleicht gelingt euch das ja bei den kommenden Aufgaben.

Die Teilnahmebedingungen und weitere Informationen findet ihr unter: [www.uni-hannover.de/bigbangchallenge](http://www.uni-hannover.de/bigbangchallenge)

Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.