

## Physik und Wein

- Eine Experimentierreihe (auch ohne Alkohol) -

Lutz Kasper\*, Patrik Vogt<sup>+</sup>

\* Pädagogische Hochschule Schwäbisch Gmünd, Abteilung Physik,

<sup>+</sup> Institut für Lehrerfort- und -weiterbildung Mainz

[lutz.kasper@ph-gmuend.de](mailto:lutz.kasper@ph-gmuend.de), [vogt@ifl.bildung-rp.de](mailto:vogt@ifl.bildung-rp.de)

### Kurzfassung

In diesem Beitrag werden Fragen im Kontext der Alltagsphysik experimentell untersucht. Inhalte sind u. a. die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mithilfe des Plopp-Geräuschs beim Entkorken einer Weinflasche sowie mit verschiedenen geformten (Wein-)Gläsern, die Bestimmung des Drucks in einer Sektflasche, die Mechanik von Korkenziehern, die Verwandlung eines bereits ausgebauten Rotweins zu einem Blanc de Noirs, der Vergleich verschiedener Möglichkeiten des schnellen Dekantierens sowie weitere optische und akustische Phänomene an Weingläsern. Die vorgestellten Experimente folgen zwar dem üblichen Fortgang einer Weinprobe, können aber auch ohne den Einsatz von Wein gut in den Physikunterricht integriert werden.

### 1. Einleitung

Physik und Wein? Gerät hier die Kontextorientierung nicht doch auf Abwege? Zugegeben, Wein sollte im Schulkontext eine zurückhaltende Rolle spielen. Und auch als Physiklehrkraft will man vielleicht zum Feierabend einmal mit ganz „undienstlicher“ Absicht einen Wein genießen. Und doch schließt das nicht aus, mit (noch) wachem Verstand, geübten Blick und der notwendigen Neugierde die Physik auch hier im Alltag zu entdecken. Wie so oft ergeben sich aus solchen Beobachtungen faszinierende Fragen und Vermutungen, die nach weiteren Experimenten verlangen. Einen Einblick in einige experimentelle „Nachwirkungen“ solcher Beobachtungen wird im Folgenden gegeben. Die meisten der hier vorgestellten Experimente sind – zumindest in Varianten – auch ganz alkoholfrei in der Schule durchführbar. Insofern lädt der Beitrag nun zu einer Weinprobe in 10 Experimenten ein.<sup>1</sup>

### 2. Öffnen von Flaschen

#### 2.1. Druck in Sektflaschen

Mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeits-Videoanalyse eines aus einer Sektflasche herauschießenden Korkens soll der vorherrschende Überdruck infolge der bei der Gärung entstandenen Kohlensäure abgeschätzt werden. Die zwischen Korken und Flaschenhals wirkende Reibungskraft ist zu berücksichtigen.

##### 2.1.1. Aufbau und Durchführung

Das selbständige Herausschießen eines Korkens aus einer Sektflasche wird mit dem Hochgeschwindigkeitsmodus einer Digitalkamera (1000 fps, z. B. Casio Exilim EX-ZR700) aufgezeichnet.

In der Regel reicht der in der Flasche herrschende Druck nicht aus, um die Haftreibungskraft zu überwinden. Daher wird der Korken nach Beginn der Aufnahme etwas per Hand gelöst und das Ende des Flaschenhalses auf dem Korken mit einem Stift markiert.

Zur Bestimmung der zwischen Flaschenhals und Korken wirkenden Reibungskraft wird der Plastikkorken durchbohrt und ein Haken mit Kontermutter entsprechend der Abb. 1 angebracht. Um die maximale Haftreibungskraft zu ermitteln, wird die Flasche mit dem präparierten Korken komplett verschlossen und im Anschluss durch lotrechtes Nachobenziehen mit einem geeigneten Kraftmesser (z. B. 250 N) entkorkt (Abb. 2). Um die Reibungskraft möglichst exakt zu bestimmen, bietet es sich infolge der sehr schnell ablaufenden Bewegung an, diesen Vorgang ebenfalls zu videografieren (240 fps). Im Versuchsbeispiel (Rotkäppchen Sekt, trocken) ergab sich die Haftreibungskraft zu  $F_{R,max} = 190 \text{ N}$ .

Zur Ermittlung der beim selbständigen Entkorken vorliegenden Haftreibungskraft wird der Korken bis zur Markierung eingeführt und analog verfahren. Hierbei ergab sich eine Haftreibungskraft von 75 N.



Abb. 1: Präparierter Sektorken

<sup>1</sup> Eine deutlich größere Auswahl an Experimenten wird von den Autoren in dem Buch „Physik & Barrique – Eine Weinprobe in

33 Experimenten“ vorgestellt, das 2022 bei Springer Spektrum erscheinen wird.



Abb. 2: Bestimmung der Haftreibungskraft

### 2.1.2. Auswertung des Experiments

Bei einer zurückgelegten Strecke von  $\Delta s \approx 0,06$  m und der dafür benötigten Zeit  $\Delta t = 4$  ms ergibt sich die Beschleunigung zu:

$$a = \frac{2 \cdot \Delta s}{\Delta t^2} = 7500 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Danach bewegt sich der Korken mit einer näherungsweise konstanten Geschwindigkeit von 26 m/s weiter (Abb. 3 und Abb. 4). Dieser Wert stimmt größenordnungsmäßig gut mit dem in [1] angegebenen Wert von 21 m/s überein.



Abb. 3: Stroboskopaufnahme der Bewegung, dargestellt mit der Software „measure Dynamics“

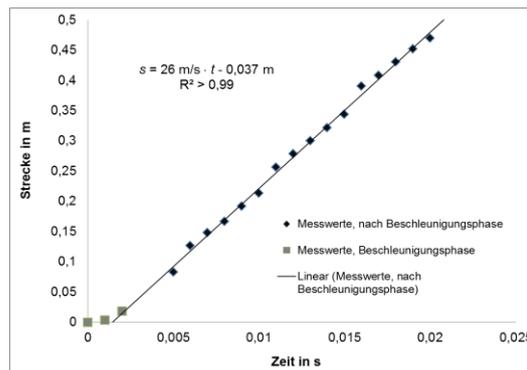


Abb. 4: Weg-Zeit-Diagramm des Sektkorkens

Die Tatsache, dass der Korken sich nicht selbständig löst, ermöglicht eine Abschätzung des Drucks nach oben. Es gilt:

$$p_{\max} = \frac{F_{R,\max}}{\pi \cdot R^2} \approx 7 \text{ bar}$$

(Haftreibungskraft bei komplett verschlossener Flasche  $F_{R,\max} = 190$  N, Innendurchmesser des Flaschenhalses  $R = 9,4$  mm). Möchte man den Absolutdruck in der Flasche angeben, so muss zu dem Überdruck von 7 bar noch der Atmosphärendruck von etwa 1 bar addiert werden.

Zur Abschätzung des Drucks nach unten, wird die Reibungskraft vernachlässigt. Mit der aus der Videoanalyse bestimmten Beschleunigung  $a$  und der Korkenmasse  $M = 7 \cdot 10^{-3}$  kg gilt:

$$p_{\min} = \frac{F_B}{\pi \cdot R^2} = \frac{M \cdot a}{\pi \cdot R^2} \approx 2 \text{ bar}$$

Um den tatsächlich vorhandenen Druck zu berechnen, muss die Gesamtkraft berücksichtigt werden, die der Summe aus Reibungskraft und beschleunigender Kraft entspricht<sup>2</sup>:

$$p = \frac{F_R + F_B}{\pi \cdot R^2} = \frac{F_R}{\pi \cdot R^2} + p_{\min} \approx 4,7 \text{ bar}$$

Da laut Richtlinie der Europäischen Union Qualitätsschaumwein (also Sekt) bei 20 °C einen auf Kohlendioxid zurückzuführenden Überdruck von mindestens 3,5 bar aufweisen muss [2], erscheint das Ergebnis der Abschätzung plausibel.

### 2.2. Entkorken mit kraftumformenden Einrichtungen

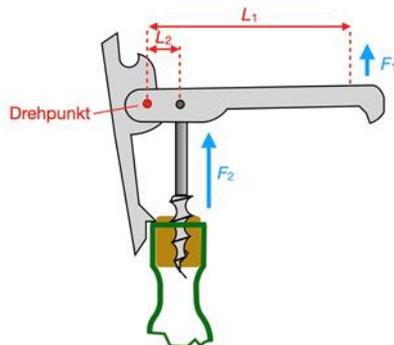
In Korkenziehern werden nicht selten die Hebelgesetze zur Verringerung der notwendigen Kraft genutzt. Dabei kommen neben weiteren Mechanismen wie z. B. die schiefe Ebene (in Spindeln) grundsätzlich zwei Arten der Hebel zur Anwendung, der einseitige Hebel (Abb. 5) sowie der zweiseitige Hebel (Abb. 6). Für beide Hebelarten gilt die so genannte Goldene Regel der Mechanik: Was du an Kraft sparst,

<sup>2</sup> Der Einfluss der Gewichtskraft kann bei der Betrachtung des Beschleunigungsvorgangs vernachlässigt werden ( $F_g = M \cdot g \approx 0,07$  N). Außerdem wird für die Abschätzung vereinfachend davon ausgegangen, dass die gemessene Reibungskraft während der gesamten Beschleunigungsphase konstant ist. Tatsächlich liegt

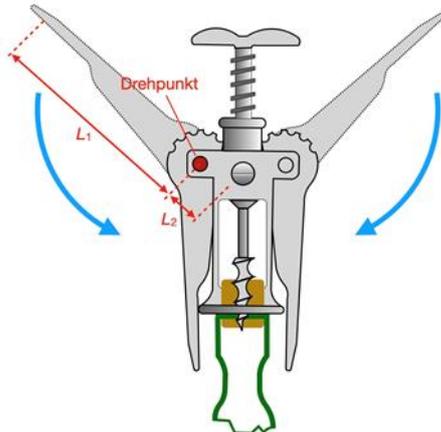
die Gleitreibungskraft beim Entkorken durchgängig über 60 N, sodass die Vereinfachung keine großen Abweichungen herbeiführt.

musst du an Weg hinzulegen. Damit ist der „Hubweg“ gemeint. Bezogen auf die Hebelarmlängen gilt für beide Hebelarten die Produktgleichheit der zusammengehörenden Hebelarmlängen ( $L_1$ ;  $L_2$ ) und Kräfte ( $F_1$ ;  $F_2$ ):

$$F_1 \cdot L_1 = F_2 \cdot L_2$$



**Abb. 5:** Einfacher Korkenzieher nach dem Prinzip des einseitigen Hebels



**Abb. 6:** Flügelkorkenzieher mit zweiseitigem Hebel (Zusätzlich kommt hier eine Zahnstange zur Anwendung.)



**Abb. 7:** Präparierter Flügelkorkenzieher als „Lastkran“: Rechts ist die Gleichgewichtssituation hergestellt.

Mühelessen lassen sich mit dem „Korkenzieher-Kran“ Lasten heben. In einem Experiment mit dem Flügelkorkenzieher werden mit drei Federkraftmessern die Kräfte bestimmt, die an beiden Hebelarmen und an der Korkzieherspirale wirken (Abb. 7). Gleichzeitig lassen sich die Wege an den Hebelarmen und der „Hubweg“ einfach bestimmen. Das Verhältnis dieses Hebelweges zum Hubweg entspricht in guter Näherung dem Verhältnis von „Zugkraft“ und „Hebelarmkraft“ und beträgt für den hier verwendeten Korkenzieher ca. 5:1. Dieses Verhältnis kann dann auch auf den „Ernstfall“ angewendet werden, nämlich das Herausziehen eines Korkens mit einer Kraft von nur ca. 55 N mit Flügelkorkenzieher im Vergleich zu den etwa 275 N mit einfachem Spindelkorkenzieher<sup>3</sup>.

### 2.3. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit beim Entkorken

Das gut vernehmbare Geräusch kennt vermutlich jeder: Plopp – und draußen ist der Korken. Warum klingt es gerade so? Wovon hängt der Klang ab und welche Informationen lassen sich daraus gewinnen?

Der Vorgang des Korkziehens wird begleitet von Reibung zwischen Kork und Innenwand des Flaschenhalses sowie von schnellen Änderungen des Gasdrucks im Flaschenhals. Dabei entstehen Töne verschiedener Frequenzen. Fasst man die Gas-Säule im Flaschenhals als einseitig geschlossenes Resonanzrohr auf, dann würde man bevorzugte Resonanzfrequenzen erwarten. Tatsächlich zeigt das Frequenzspektrum einer entsprechenden Tonaufnahme charakteristische Peaks (Abb. 8).



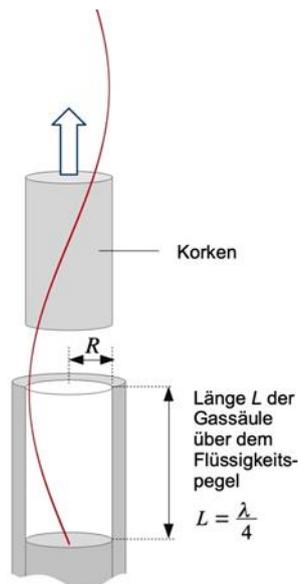
**Abb. 8:** Screenshot eines Frequenzspektrums beim Korkziehen; hier verwendete iOS-App: Spektroskop [9]

Einseitig geschlossene Resonanzröhren („gedackte Pfeifen“) weisen am geschlossenen Ende einen Schwingungsknoten, am offenen Ende einen Schwingungsbauch auf. Für die Grundschwingung ergibt sich daraus, dass eine Viertel-Wellenlänge in die Resonanzröhre passt (Abb. 9). Daraus ergibt sich als Frequenz der Grundschwingung:

$$f_0 = \frac{1}{4L} \cdot c_{\text{Gas}}$$

( $L$ : Länge der Luftsäule,  $c_{\text{Gas}}$ : Schallgeschwindigkeit des Gases im Flaschenhals)

<sup>3</sup> Der Wert wurde als Mittelwert in einer Messreihe mithilfe eines an einem Korkenzieher angebrachten Kraftmessers bestimmt.



**Abb. 9:** Wellenlänge des Resonanztons beim Korkenziehen

Für das Restgas im Flaschenhals soll die vereinfachende Annahme gemacht werden, dass es sich um Luft handelt. Eine genauere Analyse setzte die Berücksichtigung des Alkoholdampf-Anteils in diesem Volumen voraus. Vergleichende Experimente mit Wasser gefüllten Flaschen lassen aber die diese Vereinfachung als gerechtfertigt erscheinen. Für  $c_{\text{Gas}}$  kann somit  $c_{\text{Luft}}$  eingesetzt werden.

Allerdings sollte für eine bessere Abschätzung der Schallgeschwindigkeit die Länge der schwingenden Luftsäule um die Mündungskorrektur  $\Delta L$  ergänzt werden. In diese geht der Radius  $r$  des oberen Endes des Flaschenhalses ein. Für die Mündungskorrektur wird hier folgender Wert (vgl. [6]) eingesetzt:

$$\Delta L = 0,61r$$

Damit kann die Schallgeschwindigkeit beim Korkenziehen bestimmt werden:

$$c_{\text{Luft}} = 4f(L + \Delta L)$$

Eine Beispielmessung an einer 6 cm langen Gassäule und einem Innendurchmesser des Flaschenhalses von 2 cm am oberen Ende ergab eine Resonanzfrequenz von 1254 Hz. Setzt man die Werte für die korrigierte Länge ein, erhält man eine Schallgeschwindigkeit von 332 m/s. Die für dieses Experiment bestimmte Umgebungstemperatur von 23 °C lässt theoretisch eine Schallgeschwindigkeit von 345 m/s erwarten [8]. Der relative Fehler liegt somit in der Größenordnung von etwa 4 %, was für ein solch einfaches Experiment akzeptabel ist.

Für Unterrichtszwecke ist das Korkenziehen natürlich nicht gut geeignet. Jedoch reicht es für die Abschätzung der Schallgeschwindigkeit völlig aus, das „Plopp“-Geräusch mit dem aus der Flaschenöffnung schnippenden Finger zu erzeugen. Dafür wird die Flasche mit Wasser aufgefüllt. Der Alkoholdampf-Anteil kann vollkommen unberücksichtigt bleiben. Außerdem lassen sich die Längen der Luftvolumina im

Flaschenhals variieren. Bei einer solchen systematischen Abänderung der Länge  $L$  wurden jeweils die folgenden Resonanzfrequenzen durch „Finger-Ploppen“ ermittelt:

$L$ in m	$f$ in Hz	$c_{\text{Luft}}$ in m/s
0,03	2355	340
0,04	1740	321
0,05	1488	334
0,06	1225	324
0,07	1058	322
0,08	952	328

**Tabelle 1:** Messwerte der Resonanzfrequenzen beim „Fingerploppen“ an einem Flaschenhals mit verschiedenen Längen der Gassäule sowie die jeweils daraus berechnete Schallgeschwindigkeit

Die Raumtemperatur bei der Durchführung betrug 24 °C. Die theoretisch erwartete Schallgeschwindigkeit ergibt sich damit zu 345,6 m/s (vgl. [7]). Der mittlere relative Fehler beträgt somit ca. 5 %.

### 3. Einschenken und Belüften

#### 3.1. Der Venturi-Ausgießer

Eine Konstruktion, wie sie in dem hier beschriebenen Weinausgießer genutzt wird, wurde erstmals 1797 durch G. B. Venturi entwickelt und heißt deshalb auch Venturi-Düse. Man setzt diese als Ausgießer einfach auf die geöffnete Weinflasche und muss sich um die Sauerstoffzufuhr – so das Verkaufsargument – nicht weiter kümmern. Das entscheidende Merkmal erkennt man beim genauen Hinsehen: Der Wein muss beim Ausschenken durch eine Verengung fließen, an deren engster Stelle sich eine kleine Öffnung nach außen befindet (Abb. 10).



**Abb. 10:** Handelsüblicher Weinausgießer mit Venturi-Düse

Aus der Voraussetzung der Volumenerhaltung und der weiteren Annahme, dass sich die Dichte des Weins beim Einschenken nicht ändert, ergibt sich eine Gesetzmäßigkeit, die als Kontinuitätsgesetz bezeichnet wird. Für eine inkompressible Flüssigkeit,

die in einem Rohr durch zwei Stellen unterschiedlicher Querschnitte  $A_1$  und  $A_2$  mit den Geschwindigkeiten  $v_1$  und  $v_2$  strömt, gilt:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad \text{bzw.} \quad \frac{A_1}{A_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

Das Verhältnis zweier Strömungsquerschnitte ist gleich dem umgekehrten Verhältnis der zu diesen Querschnitten gehörenden Strömungsgeschwindigkeiten.

Genau das wird in diesem Weinausgießer ausgenutzt. Die Verengung im Ausgießer sorgt also für eine hohe Strömungsgeschwindigkeit. Diese wiederum führt uns zu einer weiteren Gesetzmäßigkeit, nämlich dem Zusammenhang zwischen Druck und Strömungsgeschwindigkeit: Der Druck ist in einer strömenden Flüssigkeit um so kleiner, je größer die Strömungsgeschwindigkeit an dieser Stelle ist. Quantitativ wird diese Tatsache durch die *Bernoulli-Gleichung* (ohne Einfluss der Schwerkraft) beschrieben:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{konstant}$$

Dabei ist  $p$  der statische Druck, den eine Drucksonde für ein tangential vorbeiströmendes Medium misst. Der Ausdruck  $0,5 \cdot \rho v^2$  mit der Dichte  $\rho$  des Mediums gibt den Staudruck an.

Aus der Bernoulli-Gleichung ergibt sich, dass der statische Druck in einem strömenden Medium um so geringer ist, je größer die Strömungsgeschwindigkeit wird. Auf diese Weise ist es möglich, dass an der Verengung der Druck verringert und durch die genau an der engsten Stelle eingebrachte Öffnung Umgebungsluft angesaugt wird. Die angesaugte Luft sorgt für den Druckausgleich und „perlt“ dabei in den strömenden Wein hinein. Damit ist das Ziel einer besseren Belüftung erreicht. Eine Prüfung der Effektivität dieser Belüftungsmethode kann hier jedoch nur als empirische Studie angeregt werden.

### 3.2. Einschenken ohne Malheur!

Gelegentlich gelingt das Einschenken nicht ohne Malheur! Besonders ärgerlich, wenn es ein Rotwein ist, der auf das weiße Tischtuch tropft. Aber ist das Kleckern Ungeschick oder Gesetzmäßigkeit?



**Abb. 11:** Gewünschte Strömung ins Glas hinein (links) und unerwünschte Strömung entlang des Flaschenhalses (Mitte und rechts)

Beim Einschenken aus der Flasche lassen sich zwei Strömungen beobachten (Abb. 11). Die gewünschte Strömung bringt den Wein ins Glas, während eine unerwünschte Strömung entlang der äußeren Glasoberfläche am Flaschenhals verläuft. Das Verhältnis dieses Strömungsmusters hängt dabei von mehreren

Faktoren ab. Ein entscheidender ist die Fließgeschwindigkeit. Hier hilft beherztes Einschenken. Ein weiterer Faktor ist die Geometrie der Kante des Flaschenhalses. Größere Krümmungsradien wirken sich hier begünstigend für das Kleckern aus. Abhilfe können spezielle scharfkantige Ausgießer schaffen. Schließlich sind auch die Benetzungseigenschaften des hydrophilen Glases schuld am Malheur. Hier kann das Umwickeln des oberen Flaschenhalses mit Tesafilm helfen, dessen Eigenschaften im Vergleich zum Glas eher hydrophob sind.

## 4. Anstoßen und weitere Phänomene

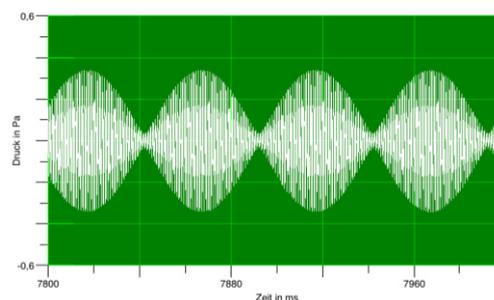
### 4.1. Akustische Schwebung mit Weingläsern

#### 4.1.1. Theoretischer Hintergrund

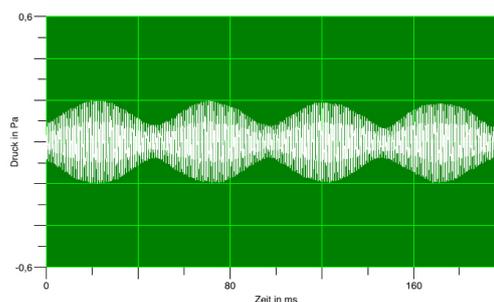
Eine spezielle Form der Überlagerung von Schallwellen ist die akustische Schwebung. Sie entsteht immer dann, wenn sich mindestens zwei Schwingungen mit geringem Frequenzunterschied überlagern. Der beobachtbare Höreindruck entspricht dann einem Ton, dessen Lautstärke periodisch variiert. Sind die Amplituden der Ausgangstöne gleich, so geht die Lautstärke zwischen den Maxima auf null zurück (vollkommene Schwebung, Abb. 12), bei ungleichen Amplituden kommt es zu einer sogenannten unvollkommenen Schwebung (Abb. 13).

Die Anzahl der Lautstärkeänderungen pro Sekunde bezeichnet man als Schwebungsfrequenz  $f_s$ , welche von den Ausgangsfrequenzen  $f_1$  und  $f_2$  abhängt und dem Betrag ihrer Differenz entspricht ([4], [5]). Es gilt also:  $f_s = \Delta f = |f_1 - f_2|$

Die Frequenz des hörbaren Tons entspricht dem Mittelwert der Ausgangsfrequenzen, was in dem hier beschriebenen Experiment jedoch nicht betrachtet werden soll.



**Abb. 12:** Oszillogramm einer näherungsweise vollkommenen Schwebung



**Abb. 13:** Unvollkommene Schwebung

#### 4.1.2. Aufbau und Durchführung

Zur Untersuchung der Schwebungsfrequenz kommen im Physikunterricht meist zwei Stimmgabeln zum Einsatz, wobei eine der beiden Stimmgabeln durch ein angehängtes Massestück absichtlich „verstimmt“ wird. So entsteht ein geringer Frequenzunterschied und es kommt zu einer akustischen Schwebung. Möchte man das Experiment von den Schülerinnen und Schülern als Hausaufgabenversuch durchführen lassen, so bietet sich die Verwendung von Weingläsern an. Zwei Weingläser des gleichen Modells sind nie vollkommen identisch und besitzen somit leicht unterschiedliche Frequenzen. Folglich müssen die Weingläser zur Erzeugung einer akustischen Schwebung nicht einmal unterschiedlich befüllt werden und können z. B. durch leichtes Anschlagen mit einem Löffel zum Schwingen gebracht werden.

Mit Hilfe eines Smartphones und einer geeigneten Tonanalyse-App (z. B. Schallanalysator [3]) kann die Schwebung visualisiert und sogar quantitativ ausgewertet werden (Abb. 14).



Abb. 14: Versuchsaufbau

#### 4.1.3. Versuchsauswertung

Zur quantitativen Auswertung des Experiments bestimmt man zunächst nacheinander die Frequenzen der genutzten Gläser. Im Versuchsbeispiel waren dies 581 Hz bzw. 592 Hz (Abb. 15 und Abb. 16). Unter Berücksichtigung der oben formulierten Gesetzmäßigkeit würde man also erwarten, dass das überlagerte Signal in einer Sekunde 11-mal ein Lautstärkemaximum erreicht.

Zur Überprüfung kann ein Oszillogramm der Überlagerung dargestellt werden, welche man am einfachsten dadurch erreicht, indem man die beiden Gläser leicht aneinanderstößt. Wie in Abb. 17 zu sehen ist, erreicht das akustische Signal in 1,34 s 17-mal ein Lautstärkemaximum, was 12,7 Lautstärkeänderungen pro Sekunde entspricht. Beachtet man, dass für das Experiment nur einfachste Mittel genutzt wurden, liefert der Vergleich mit dem theoretischen Wert ein zufriedenstellendes Ergebnis.

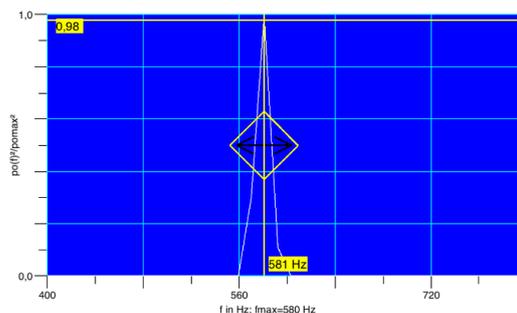


Abb. 15: Frequenzspektrum Weinglas 1

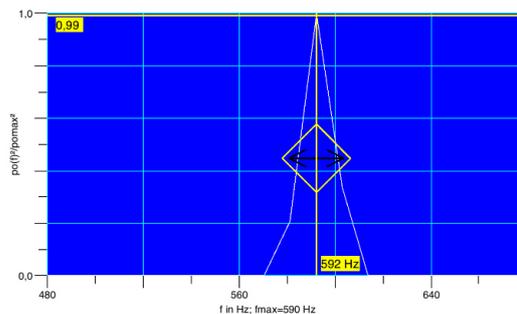


Abb. 16: Frequenzspektrum Weinglas 2

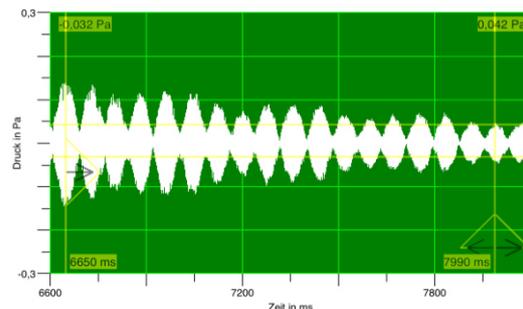


Abb. 17: Ermittlung der Schwebungsfrequenz

#### 4.2. Blanc de Noirs mit infrarotem Licht!

Ein Blanc de Noirs (franz. „Weißer aus schwarzen“) ist ein Weißwein, der aus roten Trauben (meist Spätburgunder) hergestellt wird. Auch nach dem Ausbau zu einem Rotwein kann dieser jedoch unter Nutzung der IR-Fotografie gewissermaßen in einen Weißwein und somit zu einem Blanc de Noirs „verwandelt“ werden [12]. Hierbei wird ausgenutzt, dass das Licht des nahen Infrarotbereichs (780 nm bis 3  $\mu$ m) durch den Rotwein viel weniger stark gestreut wird als das sichtbare Licht (vgl.  $\lambda^4$ -Gesetz der Rayleigh-Streuung). Wären unsere Augen also auch für infrarotes Licht empfindlich, könnten wir problemlos durch Rotwein hindurchsehen und er würde uns wie Weißwein erscheinen.

Die spektrale Empfindlichkeit des in handelsüblichen Digitalkameras genutzten CCD-Chips reicht von rund 400 bis 1100 nm (Abb. 18). Da das Licht des nahen Infrarotbereichs das Bild jedoch unscharf und kontrastärmer machen und die Farbwiedergabe verschlechtern würde, kommen in Digitalkameras Infrarotsperrefilter zum Einsatz, welche Wellenlänge oberhalb von 700 nm unterdrücken (Abb. 19). Entfernt

man diesen Filter aus dem Strahlengang einer abgelegten Digitalkamera und nutzt zusätzlich einen Infrarotdurchlassfilter (Abb. 20), der vor das Objektiv gehalten oder aufgeschraubt wird, so ergibt sich eine preiswerte Möglichkeit zur digitalen Infrarotfotografie.

Ein Beispielbild eines tiefdunklen Rotweins, aufgenommen mit einem Infrarotdurchlassfilter von smardy (Grenzwellenlänge 720 nm) zeigt die Abb. 21 (rechts). Der oben beschriebene Effekt ist deutlich zu erkennen und der Rotwein scheinbar klar wie Wasser.

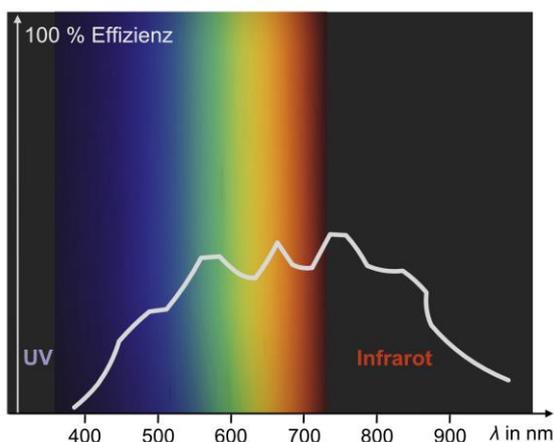


Abb. 18: Empfindlichkeitskurve von handelsüblichen CCD-Chips

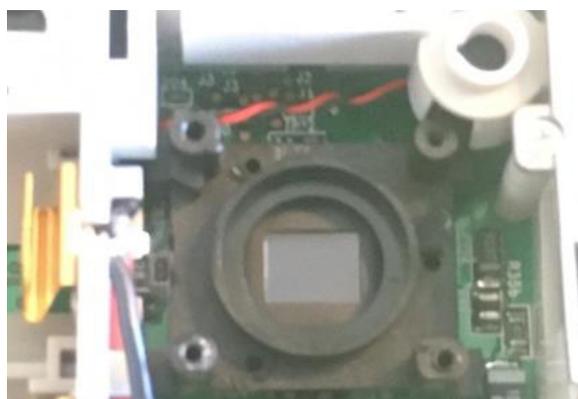


Abb. 19: Digitalkamera mit IR-Filter



Abb. 20: Infrarotdurchlassfilter, zum Aufschrauben auf das Kameraobjektiv



Abb. 21: Rotwein, aufgenommen mit sichtbarem Licht (links), IR und sichtbarem Licht (Mitte), nur IR (rechts)

## 5. Verschiedene Verfahren zur Schallgeschwindigkeitsbestimmung

### 5.1. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Zylindergläsern

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Luft, stellt die Untersuchung der Eigenfrequenz von Resonatoren dar. Hierzu können zum einen Röhren bzw. Pfeifen zum Einsatz kommen, die man als Quincke-Röhre behandelt, zum anderen Hohlräume, Weingläser oder Flaschen, die man als Helmholtzresonatoren ansieht (vgl. 5.2 und 5.3). Als gedackte Pfeifen eignen sich z. B. größere Gläser wie ein Bierkrug oder das in der Pfalz beheimatete „Schoppenglas“ mit einem Fassungsvermögen von 0,5 l („Pfälzer Röhre“, Abb. 22). Zum Auffinden seiner Resonanzfrequenz erzeugt man mit einer geeigneten App ein weißes Rauschen (Abb. 23) und bestimmt gleichzeitig, die vom Resonanzkörper verstärkte Frequenz (Abb. 24). Bei einer Glashöhe von  $l = 0,15$  m, einem Glasradius von  $R = 3,7$  cm und einer Raumtemperatur von  $24$  °C ergibt sich die Schallgeschwindigkeit in Luft zu:

$$l + \Delta l = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f}$$

Mit der Mündungskorrektur  $\Delta l = 0,61R$  (nach Levine & Schwinger, [6]) und einer gemessenen Eigenfrequenz von 495 Hz erhält man

$$c = (l + 0,61R) \cdot 4f \approx 342 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

was sehr gut mit dem Literaturwert von 346 m/s überein [7].



Abb. 22: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit einem Pfälzer Schoppenglas

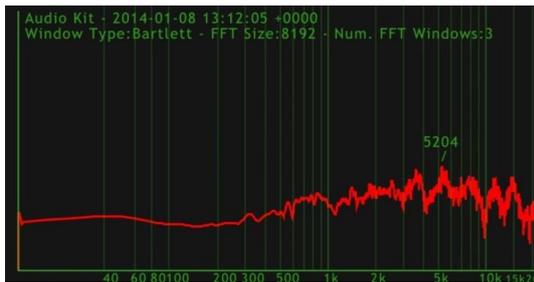


Abb. 23: Frequenzspektrum des weißen Rauschens ohne Resonanzröhre, aufgenommen mit Audio Kit [13]

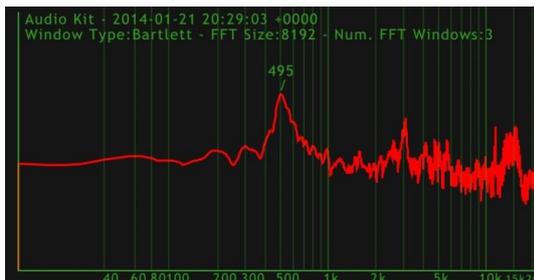


Abb. 24: Frequenzspektrum mit Resonanzröhre, aufgenommen mit Audio Kit

### 5.2. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in bauchigen Gläsern

Bei der Untersuchung eines Rotweinglases geht man analog vor (Abb. 25), nutzt bei der Auswertung jedoch die Beziehung für den Helmholtzresonator [8] mit der Korrektur  $\Delta l = \frac{\pi}{4} R$ :

$$f = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{A}{V \cdot (l + 2\Delta l)}}$$

Einsetzen der Zahlenwerte ( $c = 345 \text{ ms}^{-1}$  (bei  $\vartheta = 23 \text{ °C}$ ),  $R = 0,04 \text{ m}$ ,  $V = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ ,  $A = 5,03 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ ,  $l = 0$ ) liefert eine theoretische Eigenfrequenz des Resonators von 590 Hz, was gut mit dem Messwert von 601 Hz übereinstimmt.

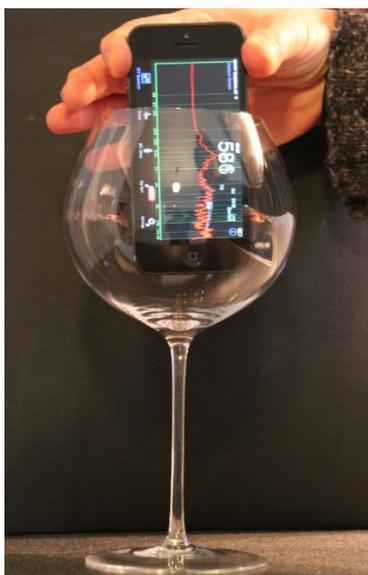


Abb. 25: Ein Rotweinglas als Helmholtz-Resonator



Abb. 26: Die Resonanzfrequenz des verwendeten Rotweinglases beträgt 601 Hz, aufgenommen mit Audio Kit

### 5.3. (Wein-)Flaschen als Helmholtz-Resonatoren

Nachdem gezeigt ist, dass bauchige Weingläser als akustische Hohlraumresonatoren sehr gut der Helmholtz-Theorie genügen, können wir fragen, ob auch auf Weinflaschen diese Theorie anwendbar ist. Wenn es so wäre, dann müsste sich auch die typische beim Anblasen einer leeren Weinflasche hörbare Frequenz vorhersagen lassen.

Eine verbreitete Flaschenform ist die Bordeauxflasche (Abb. 27 b). Ihre Kennzeichen sind die so genannten Schultern und – hier von besonderem Interesse – der lange Flaschenhals mit konstantem Durchmesser. Für die Vorhersage der Frequenz soll die Flasche als Helmholtz-Resonator aufgefasst werden. Für die Grundfrequenz solcher Resonatoren mit langem Hals (im Vergleich zur Öffnung) gilt die folgende Gleichung ([10], S. 225):

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi \cdot R^2}{V \cdot L}}$$

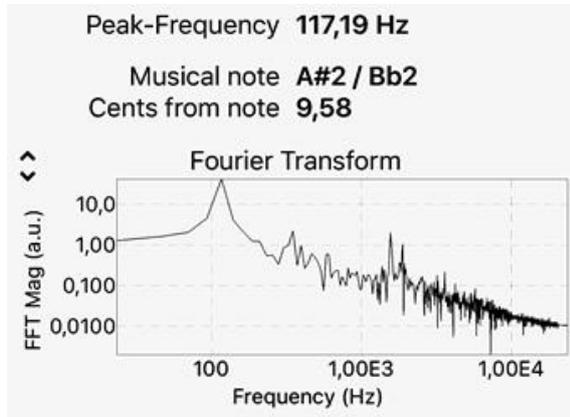


Abb. 27: Modelle für Helmholtz-Resonatoren mit und ohne Hals

Dabei ist  $c$  die Schallgeschwindigkeit, für die hier (bei der Umgebungstemperatur von  $25 \text{ °C}$ )  $346 \text{ m/s}$  eingesetzt werden.  $R$  ist der Radius der Flaschenöffnung und beträgt  $1 \text{ cm}$ .  $L$  als Länge des Flaschenhalses beträgt hier  $8 \text{ cm}$ . Das Volumen  $V$  einer Standardflasche beträgt  $0,75 \text{ Liter}$ .

Setzt man alle Größen in die Gleichung für die Frequenz ein, erhält man die theoretisch zu erwartende Grundfrequenz von  $f_0 = 126 \text{ Hz}$ . Zur experimentellen Überprüfung dieser Vorhersage wird wieder ein Smartphone oder ein anderes Gerät mit einer Mög-

lichkeit der Frequenzmessung benötigt. Das Frequenzspektrum der angeblasenen Bordeauxflasche ist in Abb. 28 gezeigt. Dort wird die Peak-Frequenz mit gerundet 117 Hz angegeben. Somit weist die theoretische Vorhersage einen relativen Fehler von etwa 8 % auf und die Helmholtz-Näherung ist damit auch für Weinflaschen ein akzeptables Modell.



**Abb. 28:** Frequenzspektrum einer angeblasenen Weinflasche (App: Phyphox [11])

## 6. Literatur

- [1] Pommeranz, H.-P. (2008). Die explosive Kraft des Sektes. Begleitmaterial zur Fernsehsendung ECHT! vom 05.02.2008, mdr Fernsehen.
- [2] Amtsblatt der Europäisch. Verordnung (EG) Nr. 479/2008 des Rates vom 29. April 2008 über die gemeinsame Marktorganisation für Wein, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1493/1999, (EG) Nr. 1782/2003, (EG) Nr. 1290/2005, (EG) Nr. 3/2008 und zur Aufhebung der Verordnungen (EWG) Nr. 2392/86 und (EG) Nr. 1493/1999. Verfügbar unter: <https://ogy.de/Physik-Wein-1> (Stand: 11/2014)
- [3] Schallanalysator, Downloadmöglichkeit: <https://ogy.de/SchallanaAndroid> (Android), <https://ogy.de/SchallanaiOS> (iOS)
- [4] Demtröder, W. (2013). Experimentalphysik 1. Mechanik und Wärme. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- [5] Kuhn, J., Vogt, P. & Hirth, M. (2014). Analyzing the acoustic beat with mobile devices. In: The Physics Teacher 52, S. 248-249. (DOI: 10.1119/1.4868948)
- [6] Levine, H. & Schwinger, J. (1948). On the radiation of sound from an unflanged circular pipe. In: Phys. Rev. 73, 383.
- [7] Online-Rechner für die temperaturabhängige Schallgeschwindigkeit in Luft. Verfügbar unter: <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-schallgeschw.htm> (05/2014)
- [8] Lüders, K., von Oppen, G. (2008). Bergmann · Schaefer – Lehrbuch der Experimentalphysik (Band 1). Berlin, New York: Walter de Gruyter.
- [9] Download der App *Spektroskop*: <https://itunes.apple.com/de/app/spektroskop/id517486614>
- [10] Trendelenburg, F. (1950). Einführung in die Akustik. Berlin / Göttingen / Heidelberg: Springer-Verlag
- [11] Phyphox, Downloadmöglichkeit: <https://phyphox.org/download/>
- [12] Mangold, K., Shaw, J. A. & Vollmer, M. (2015). Rotwein zu Wasser. Infrarotfotografie mit kommerziellen Digitalkameras. In: Phys. Unserer Zeit 1 (46), S. 12-16.
- [13] Downloadmöglichkeit der App „Audio Kit“: <https://apps.apple.com/de/app/audio-kit/id376965050>