

Unsichtbares sichtbar machen: Schallwellenfronten im Bild

Ewa Rehwald*

*Institut für Didaktik der Physik, Westfälische Wilhelms-Universität, Wilhelm-Klemm-Str. 10, 48149 Münster

Kurzfassung

Der Bedarf an Visualisierungen von Schallwellen ist groß. Das Internet bietet eine Fülle von Applets und Animationen zu diesem Thema, es handelt sich aber immer um Simulationen, also Visualisierungen von Theorie. Experimentelle Visualisierungsmöglichkeiten von Schallwellen dagegen gibt es nur im Bereich von stehenden Wellen. Für sich ausbreitende Wellen wird in Schule und Lehrerbildung auf die Analogie der Wasserwellen in der Wellenwanne zurückgegriffen mit der Behauptung, Schall verhalte sich wie Wasser.

Der folgende Artikel stellt eine experimentelle Methode vor, Bilder von Schallwellenfronten zu erzeugen. Hierbei wird die Überlagerung von Mikrofon- und Lautsprecher-Signal von einer Diode als Lichtsignal ausgegeben. Eine vom Mikrofon und Diode abgerasterte Ebene fügt sich in der Kamera zu einem Wellenfrontenbild zusammen. Beispiele verschiedener Versuchsanordnungen werden vorgestellt und ausgewertet.

1. Einleitung

Bilder vom Schall begegnen uns in vielen Bereichen unseres Lebens. Noten können als Sichtbarmachung von Schall angesehen werden, im Comic finden wir lautmalersprachliche Sprache, dazu Bewegungslinien, auseinanderfliegende Sterne, bunte Farben. Bei einer Schallplatte hat sich die Schwingung einer Membran in das Höhenprofil eines Rohlings eingebrannt, bei Computer, Handy und im Auto begegnen uns Icons mit Lautsprechern, von denen scheinbar Schallwellenfronten ausgehen. All diese Beispiele können als Bilder vom Schall interpretiert werden, die wir als selbstverständlich erachten.

Dass ihre Lesart jedoch sehr voraussetzungsvoll ist und erst eingeübt werden muss, wird uns höchstens bei Musiknoten bewusst. Doch auch ein Bildsymbol wie in Abbildung 1 links dargestellt, fußt auf physikalischen Annahmen, die es erstmal zu verstehen gilt. Ihre falsche Interpretation ist rechts zu sehen: Hier wurde entweder die Logik der Darstellung nicht verstanden oder ästhetischen Aspekten Vorzug gegeben.

Der folgende Artikel beschreibt eine Methode der Sichtbarmachung von Phasendifferenzen zweier Signale (eines Lautsprecher- und eines Mikrofon-Signals), die als Visualisierung von Schallwellenfronten interpretiert werden kann. Die entstehenden Bilder sind höchst aufschlussreich und ermöglichen ein tiefgehendes Verständnis der Gesetzmäßigkeiten vom Schall. Zum ersten Mal können Experimente zum Schall tatsächlich mit Schall durchgeführt werden. Analogien von Wellenwannen oder Applets werden nicht mehr benötigt

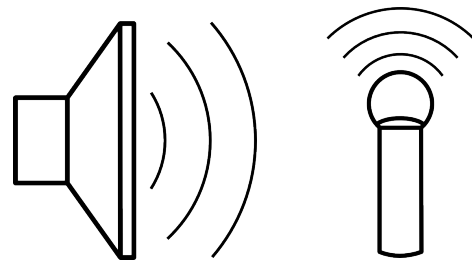


Abb. 1: Links: Schematischer Lautsprecher mit davon ausgehenden Schallwellenfronten [1]. Rechts: Ein nach gleichem Prinzip konstruiertes Mikrofon. Die Richtung der Schallwellenfronten deutet an, dass das Mikrofon Schallwellen aussendet, was nicht der Fall ist. [2]

bzw. bekommen eine neue Qualität. Die Aussage, Schallwellen verhalten sich wie Wasserwellen, wird nun zu einer Frage umformuliert, die über den Vergleich von vorliegenden Bildern und Beobachtungen in der Wellenwanne beantwortet werden kann.

2. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau basiert auf einer Veröffentlichung von Winston E. Kock mit dem deutschen Titel „Schall, sichtbar gemacht“ [3] (erschieden in der Reihe „Verständliche Wissenschaften, Band 112). Der Autor schlägt einen Versuchsaufbau vor, bei dem eine Glühlampe an das elektrische Signal eines Mikrofons und ein zweites vom elektrischen Oszillator erzeugtes Signal angeschlossen

wird. Indem das Mikrofon mit der daran befestigten Lampe vor einem Lautsprecher hin und her bewegt wird, verändert sich ständig die Phase der beiden Signale und die Glimmlampe geht an oder aus. Das Leuchtverhalten wird fotografisch festgehalten.

Wir haben den Versuchsaufbau leicht abgewandelt. Dafür wurden folgende Komponenten benötigt:

- Lautsprecher (in unserem Fall Visaton Hochtöner 2000-20000Hz)
- Frequenzgenerator
- Niederfrequenzverstärker
- Mikrofonverstärker (Phywe)
- Mikrofon
- Leuchtdiode mit Vorwiderstand
- Vorrichtung zum Abfahren einer Ebene (z.B. X-Y-Schreiber)
- Fotokamera mit Funktion der Dauerbelichtung
- Stativ

Die Komponenten werden gemäß der Schaltskizze aus Abbildung 2 geschaltet. Der Frequenzgenerator versorgt den Lautsprecher mit einem Sinuston. Das sich davor befindende Mikrofon empfängt dieses Signal mit einer je nach Ort variierenden Phasenverschiebung und einer etwas kleineren Amplitude. Diese muss verstärkt werden, damit Lautsprecher- und Mikrofonsignal von gleicher Größenordnung sind. Die Signale vom Frequenzgenerator und Mikrofonverstärker werden im Niederfrequenzverstärker überlagert. Sein Ausgang ist mit einer Leuchtdiode verbunden, die am Mikrofon angebracht ist.

Die Intensität der Diode ist proportional zu $1 + \cos\varphi$ und nicht von der Zeit abhängig. Sind beide Signale in Phase, interferieren sie konstruktiv; das Signal ist stark genug, um die Diode zum Leuchten zu bringen. Sind die Signale um 180° phasenverschoben, löschen sie sich bei gleicher Amplitude vollständig aus, die Diode leuchtet nicht. Der grau schattierte Hintergrund in der Schaltskizze deutet an, dass Mikrofon und Diode in alle Richtungen frei beweglich sind und der Raum vor dem Lautsprecher in einer Ebene abgerastert wird. Eine Kamera mit Dauerbelichtung nimmt diesen Abrasterungsprozess auf, die Fotos können später ausgewertet werden.

3. Schülerexperimente

Im einfachsten Fall kann der vorgeschlagene Versuchsaufbau mit Hilfe eines Stabes und von Hand ausgeführter Bewegung umgesetzt werden. Am vorderen Ende wird das Mikrofon und die Diode angebracht, möglichst so, dass das Mikrofon der

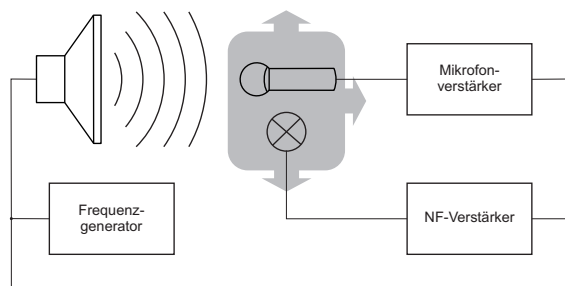


Abb. 2: Schaltskizze: Im Niederfrequenzverstärker werden die Signale vom Frequenzgenerator und Mikrofonverstärker addiert und auf die Diode geleitet. Mikrofon und Leuchtdiode sind in einer Ebene frei beweglich.

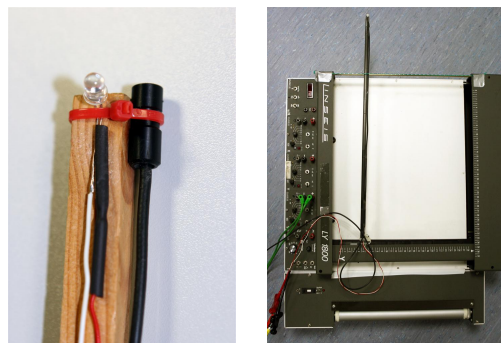


Abb. 3: Links: Das Mikrofon und die Leuchtdiode am Kopf des Stabes. Rechts: Der verwendete X-Y-Schreiber mit dem Karbonrohr als „Arm“.

Schallquelle, die Diode der Kamera zugewandt sind (vgl. Abbildung 3). In Abbildung 4 sind die benötigten elektrischen Komponenten dargestellt.

Der Stab wird am Lautsprecher startend auf und ab geschwungen und dabei langsam nach hinten geführt. In Abbildung 5 kann man das entstehende Signal schon erahnen, die Raumbeleuchtung ist jedoch zu stark. Durch die Einstellung Dauerbelichtung an der Kamera muss im Raum fast vollständige Dunkelheit herrschen oder der Hintergrund mit einem dunklen Tuch abhängt werden.

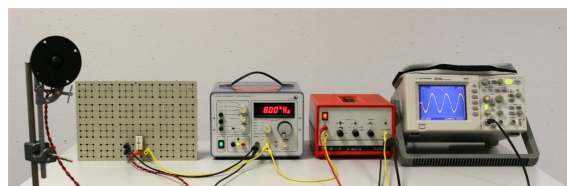


Abb. 4: Lautsprecher mit Kondensator, Frequenzgenerator, Niederfrequenzverstärker und ein Oszilloskop, um die beiden Amplituden aufeinander abzustimmen.

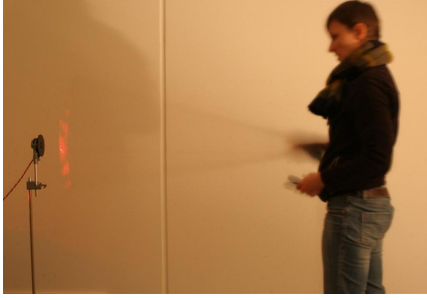


Abb. 5: Das Hin- und Herschwingen des Stabes lässt ein Wellenfrontenmuster entstehen.

Abbildung 6 vermittelt uns eine Idee, wie die Phasenunterschiede der beiden Signale zu deuten sind. Der Schall breitet sich radial um den Lautsprecher aus, d.h. in gleicher Entfernung zur Schallquelle sind die Wellenfronten in Phase. Die Überlagerung des Lautsprecher- mit dem Mikrofonsignal bringt diese Ortsabhängigkeit zum Vorschein. Sind beide in Phase, interferieren sie konstruktiv und die Diode leuchtet. Außer Phase bleibt sie aus. Wir erhalten ein Helligkeitsmuster, welches als Schallwellenfronten eines Lautsprechers interpretiert werden kann, ähnlich der Wellenausbreitung in einer Wellenwanne, die zu einem bestimmten Zeitpunkt fotografiert worden ist. Für einen solchen „Schnappschuss“ muss bei unserem Versuch die Kamera mehrere Minuten lang belichtet werden.

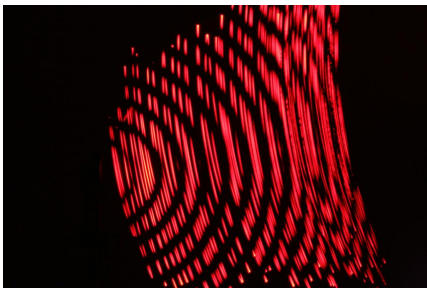


Abb. 6: Das resultierende Bild des Wedelvorgangs nach ca. 1 min. Belichtungszeit. Es zeichnen sich konzentrisch verlaufende hell-dunkel Muster um die Schallquelle ab, die als Schallwellenfronten interpretiert werden können.

Bei sehr schnellen Bewegungen des Stabes reicht bereits die Trägheit des Auges, um eine Ahnung von Schallwellenfronten zu bekommen. Will man diese präzise sichtbar machen, sind eine gute Körperbeherrschung und etwas Übung Voraussetzung. Die einzelnen Auf- und Abbewegungen des Stabes sollten möglichst in gleichem Tempo mit gleichen Abständen und vor allem in einer Ebene ausgeführt werden. Zur Ermittlung der Wellenlänge reicht es, den Stab entlang eines Lineals von

der Schallquelle wegzuführen und den Abstand zwischen zwei Leuchtsignalen zu messen.

4. Aufbau mit X-Y-Schreiber

Für komplexere Versuchsaufbauten liegt die Notwendigkeit zur Automatisierung des Abrasterungsprozesses auf der Hand. Kock hat eigens dafür einen motorgetriebenen auf Schienen gleitenden Schwenkarm gebaut. Wir hatten das Glück, im Besitz eines alten X-Y-Plotter zu sein, den wir etwas umfunktioniert haben: An die ursprünglichen Stifte wurde ein 55 cm langes Karbonrohr mit 0,5 cm Durchmesser befestigt, das als Halterung für Leuchtdiode und Mikrophon dient (vgl. Abbildung 3 rechts). Da dabei ein recht großer Hebel entsteht, wird das Rohr am äußeren Ende des Plotters von einem senkrecht eingespannten Metallstab gestützt. Um eine minimale mechanische Belastung zu gewährleisten wurde der Plotter meist in liegender Position betrieben, sodass von oben fotografiert werden konnte. Wenn erforderlich, kann dieser auch senkrecht aufgestellt werden, wie es bei den Aufnahmen zur Brechung der Fall war.

5. Versuchsanordnung

Abbildung 7 zeigt eine mögliche Versuchsanordnung zur Aufnahme von Schallwellenfronten einer Schallquelle. Der X-Y-Schreiber befindet sich außerhalb des Bildes, man sieht den Arm mit Mikrophon und Diode von oben in das Bild hineinragen. Ihm gegenüber steht der Lautsprecher. Es bietet sich an, alle Komponenten und den Boden mit Schaumstoff zu umhüllen, um Reflexionen zu minimieren. Links und rechts sind die Beine des Kamerastativs zu sehen. Im Folgenden rastert der Plotter die Ebene vor dem Lautsprecher im Bild von unten nach oben ab. Die nachfolgenden Bilder wurden zur besseren Orientierung aus Versuchsanordnung und Dunkelbild des Lichtsignals überlagert.

Der Vorteil eines gleichmäßigen Abrasterns ist, dass neben der Information über Phasenunterschiede auch Aussagen über die Schallintensität gemacht werden können. Unmittelbar vor der

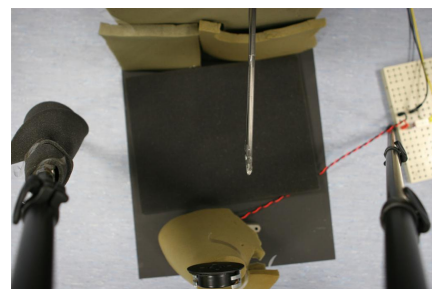


Abb. 7: Versuchsanordnung.

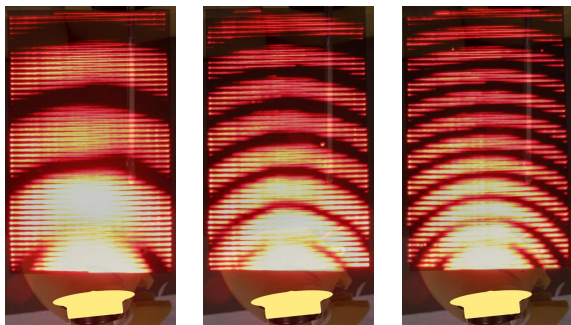


Abb. 8: Schallwellenfronten in Abhängigkeit von der Frequenz. Von links nach rechts: 4000 Hz, 8000 Hz, 12000 Hz.

Schallquelle, wo das Mikrophon ein sehr starkes Signal empfängt, erscheint das Leuchtmuster viel heller als in weit entfernten Bereichen. Um der Fehlvorstellung vorzubeugen, dass an dunklen Stellen des Bildes kein Schall zu hören sei, empfiehlt es sich, in einem separaten Versuch das Frequenzgeneratorsignal vom Verstärker abzukoppeln und nur das Mikrophonsignal auf die Diode zu leiten. Es entsteht ein Bild, welches lediglich Aussagen über die Schallintensität enthält, die in Leuchtintensität übersetzt worden ist. Werden hierbei zwei oder mehrere Schallquellen benutzt, entstehen entlang radial verlaufender Linien tatsächlich auch Bereiche, in denen nahezu Stille herrscht. (Vgl. Kock).

Es bieten sich unzählige Möglichkeiten für Versuchsanordnungen. Während Kock seinen Schwerpunkt auf Analogieexperimente vom Schall und Licht (Linse, Lichtleiter, Prisma...) gelegt hat, war unser Anliegen grundlegender: Die fundamentalen Prinzipien vom Schall wie Frequenzabhängigkeit, Reflexion, Interferenz, Beugung, stehende Wellen und Brechung sollten untersucht und sichtbar gemacht werden.

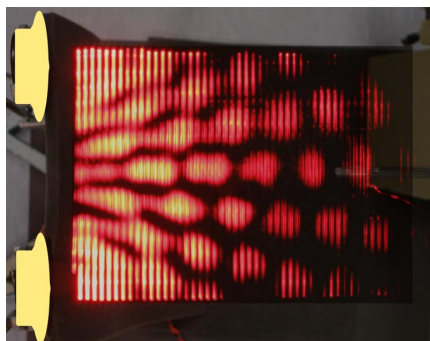


Abb. 9: Zwei Schallquellen (8000 Hz) interferieren miteinander. Es kommt nicht zu einer Überlagerung zweier konzentrischer Signale, sondern zu konstruktiver und destruktiver Interferenz.

6. Frequenzabhängigkeit

Abbildung 8 zeigt Aufnahmen von Signalen eines Lautsprechers, die in ihrer Frequenz variieren. Bereits auf den ersten Blick lässt sich ein Zusammenhang von Frequenz und Wellenlänge feststellen. Wissen wir, wie groß das abgefahrenere Feld ist (in unserem Fall 33 cm), können wir grafisch die Wellenlänge ermitteln, die dem Abstand zweier Leuchtmaxima entspricht. Für 8 kHz beträgt $\lambda=4,3$ cm, so dass wir einen Wert von 344 m/s für die Schallgeschwindigkeit in Luft erhalten.

7. Reflexionen und Interferenz

Reflexionen tauchen während des Experimentierens immer wieder als ungewollte Abweichung von „idealen“ Schallwellenfronten auf. Das ursprüngliche Lautsprechersignal wird an Wänden oder herumstehenden Gegenständen reflektiert und interferiert mit nachfolgenden Wellenfronten. Meistens lassen sich Reflexionen mit Auspolsterungen aus Schaumstoff verhindern. Es empfiehlt sich, vor jeder Versuchsreihe ein oder mehrere Bilder wie in Abbildung 8 aufzunehmen, um den Versuchsaufbau zu kalibrieren und äußere Störungen auszuschließen.

Abbildung 9 zeigt das Interferenzmuster zweier Lautsprecher, bei dem deutlich Zonen destruktiver aber auch konstruktiver Interferenz zu sehen sind. Entlang der dunklen Bereiche, die radial vom Zwischenraum der Lautsprecher ausgehen, löschen sich die beiden Signale aus. Dort dürfte der Sinuston nur schwach zu hören sein. Eine zusätzliche Intensitätsaufnahme (s.o.) könnte dies noch verdeutlichen.

8. Stehende Wellen

Stehen sich zwei Schallquellen gleicher Frequenz gegenüber, entsteht zwischen ihnen eine stehende Welle. An den Seiten kommt es wie oben beschrieben zu Interferenz. Abbildung 10 links zeigt eine Aufnahme bei 10 kHz, der Abstand von den hellen Maxima beträgt genau eine Wellenlänge.

In der Mitte ist ein vergleichbares Bild von einer Wellenwanne bei 80 Hz zu sehen, welches mit sehr kurzer Auslösezeit aufgenommen wurde. Es handelt sich um eine Momentaufnahme, sodass die Abstände zwischen den hellen Bereichen wie bei den Schallwellenfronten eine Wellenlänge betragen. Betrachtet man die Wellenwanne mit bloßem Auge oder mit einer etwas längeren Belichtungszeit (10 rechts), scheinen die Abstände der hellen und dunklen Bereiche zusammengerückt zu sein. Was wir nun sehen, ist eine Mittelung des Auges über die Zeit. Die dunklen Bereiche entsprechen nicht mehr den Senken einzelner Wellen, sondern den Knotenpunkten, die alle $\lambda/2$ auftreten.

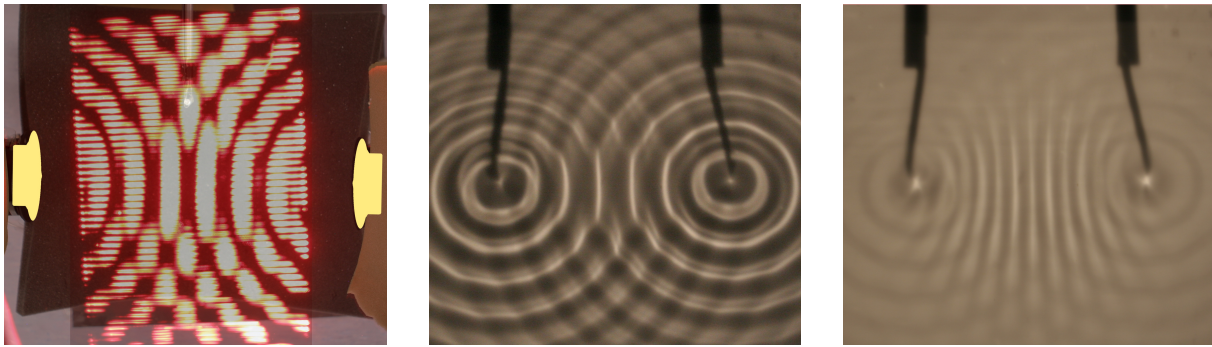


Abb. 10: Links: Eine mit Schall erzeugte stehende Welle (10000 Hz). Mitte und rechts: Stehende Wellen in einer Wellenwanne (80 Hz) mit kurzer ($1/80$ s) und längerer Belichtungszeit ($1/5$ s). Es hat den Anschein, dass die stehenden Wellen rechts zusammengedrückt seien.

9. Beugung

Beugung an einem Gegenstand fällt ins Gewicht, wenn dieser in der Größenordnung der Wellenlänge ist. In Abbildung 11 wurde eine Metallscheibe von 8,5 cm Durchmesser vor dem Lautsprecher angebracht, somit sollte ein Beugungseffekt ab ca. 4000 Hz zu beobachten sein.

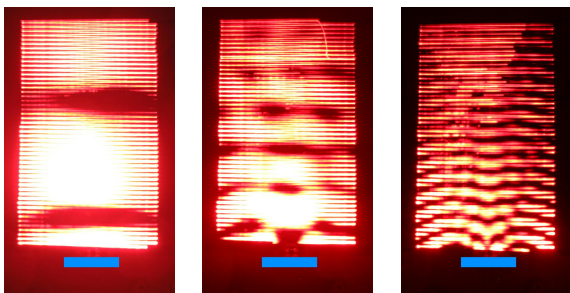


Abb. 11: Eine Metallscheibe von 8,5 cm Durchmesser (blau) dient als Hindernis. Bei 2000 Hz (links) hat sie nur wenig Effekt auf den Wellenverlauf. Bei 6000 Hz (Mitte) und 15000 Hz (rechts) kann man deutlich erkennen, dass die Wellen sich um das Hindernis herum beugen.

Der Effekt der Beugung kann auch am Lautsprecher selbst beobachtet werden, wenn man den Raum dahinter abrastert. Abbildung 12 zeigt, wie es mit zunehmender Frequenz zu starker Beugung um den Lautsprecher kommt und damit zu Interferenzen. Unter anderem, um solche Effekte zu verhindern, werden die Lautsprecherchassis in Gehäuse verbaut.

10. Brechung

Das Phänomen der Brechung kennen wir vor allem aus der Strahlenoptik. Dabei haben wir ein Abknicken des Lichtstrahls vor Augen, sobald dieser in ein optisch dünneres oder dickeres Medium übergeht. In diesem Zusammenhang wird von verschiedenen Brechungsindices gesprochen, die

mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit im jeweiligen Medium zusammenhängt. Dass damit eine Verkürzung bzw. eine Verlängerung der Wellenlänge einhergeht, wird implizit mitgedacht, aber nicht explizit erwähnt.

Brechung in der Akustik kann beobachtet werden, wenn Schall sich in unterschiedlichen Gasen ausbreitet oder ein Gas mit verschiedenen Temperaturen durchläuft. Es ist uns gelungen, Brechung von Schall in Helium in der Darstellung mit Schallwellenfronten sichtbar zu machen. Dafür wurde ein Plexiglastasten ($30 \times 20 \times 20$ cm) zunächst mit Schaumstoff ausgekleidet und mit der Öffnung nach unten auf einem Gerüst angebracht. Durch einen dünnen Schlauch, der bis an den Boden des Gefäßes ragt, wurde später Helium eingefüllt. Der X-Y-Schreiber stand senkrecht, sodass eine Ebene abgerastert werden konnte, die teilweise den Plexiglastasten ausfüllt, teilweise den Raum darunter.

Abbildung 13 links zeigt die regulären Schallwellenfronten, wenn sich innerhalb und außerhalb des Kastens Luft befindet. Wird nun in den Plexiglastasten Helium eingefüllt, ist aufgrund der um den Faktor drei höheren Schallgeschwindigkeit in dem Edelgas eine in etwa dreifache Verlängerung der Wellenlänge bei gleichbleibender Frequenz zu er-

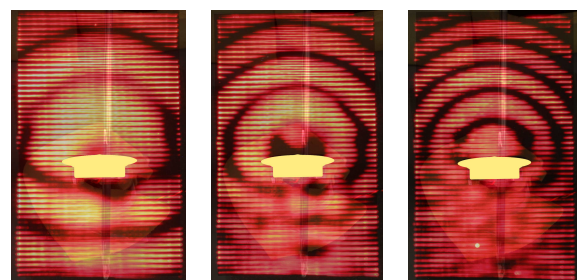


Abb. 12: Beugung um einen Lautsprecher bei 6000 Hz, 9000 Hz und 12000 Hz.

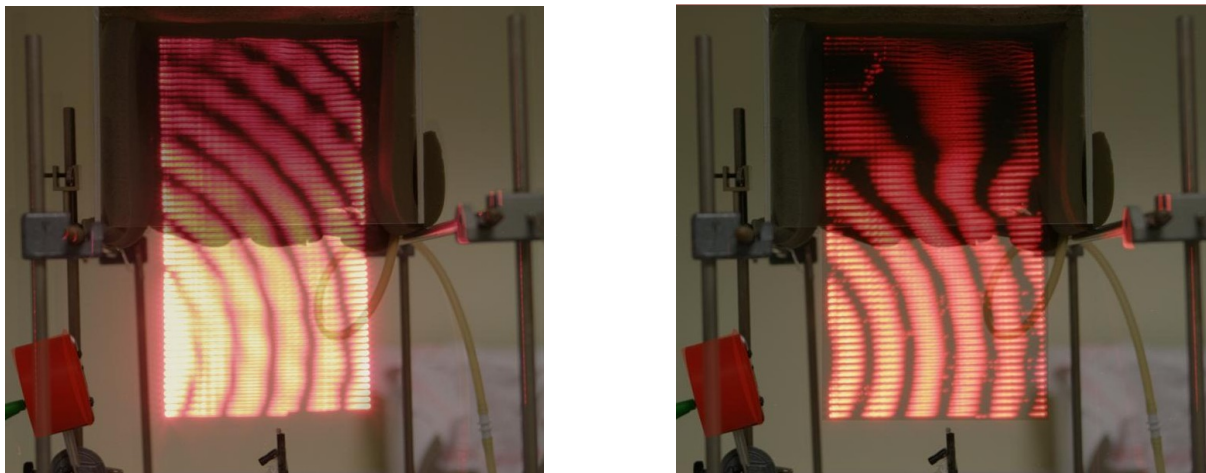


Abb. 13: Schallwellenfronten innerhalb und außerhalb eines Plexiglaskastens. Links ist dieser mit Luft, rechts mit Helium gefüllt. Man kann rechts deutlich die Brechung erkennen.

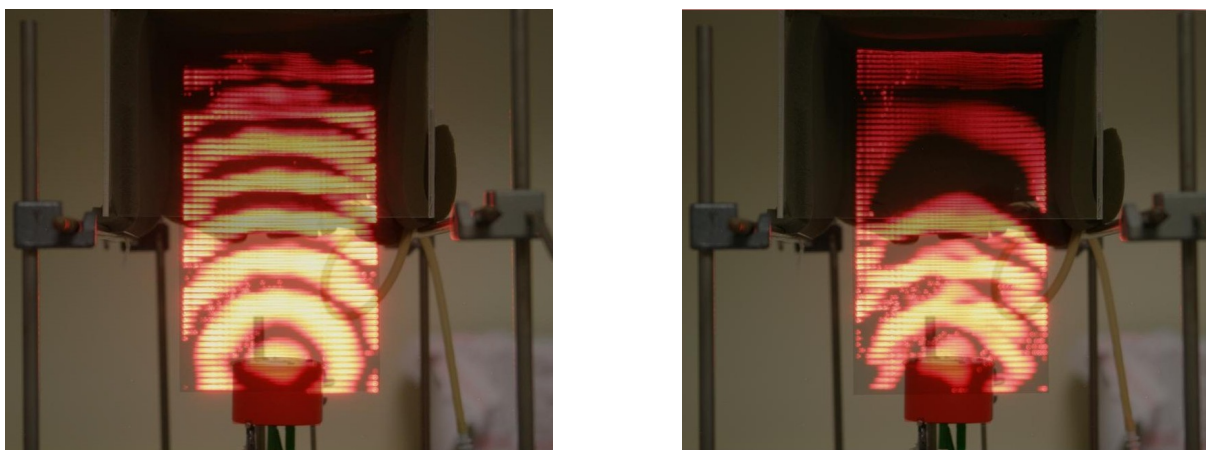


Abb. 14: Hier wurde die Schallquelle unter den Plexiglaskasten gestellt. Neben dem Effekt der Brechung kommt es zu Reflexionen am Übergang von Luft zu Helium am unteren Rand des Gefäßes.

warten. Tatsächlich kann man in Abbildung 13 rechts sehr gut erkennen, wie die Wellenlänge am Übergang von Luft zu Helium sich nach und nach streckt und die größte Ausdehnung im oberen Bereich des Kastens erreicht, wo die Heliumkonzentration am höchsten ist. Die quantitative Abschätzung ist konsistent.

Der gleiche Versuch wurde noch einmal mit einem von unten schallenden Lautsprecher durchgeführt. Abbildung 14 links zeigt die regulären Schallwellenfronten in Luft zum Vergleich. In Abbildung 14 rechts fließt stetig Helium in den Behälter. Erneut können wir eine Streckung der Wellenlänge beobachten. Gleichzeitig fällt auf, dass die Leuchtintensität der Diode kleiner ist und somit eine geringere Lautstärke angenommen werden muss. Auf der anderen Seite ist der Wellenfrontenanteil in Luft nicht so regelmäßig wie im Vergleichsbild. So kann davon ausgegangen werden, dass am Übergang von Luft zu Helium ein

Teil des Schalls zurückreflektiert wird.

Der umgekehrte Effekt, nämlich die Stauchung der Wellenlänge konnte mit Schwefelhexafluorid nachgewiesen werden.

11. Zusammenfassung

Es wurde eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht, „Schallwellenfronten“ und Schallintensitäten in Bildern festzuhalten. Zahlreiche Versuchsanordnungen, die bislang nur theoretisch oder mit Hilfe der Wellenwanne als Analogie behandelt wurden, können jetzt sichtbar gemacht werden. Das Experimentieren mit Schall, der gehört und „gesehen“ wird, bietet darüber hinaus noch weitere Vorteile: Die SuS können beim vorgestellten Schülerexperiment selbst tätig werden und zur Bilderzeugung beitragen. Sie bringen ihre eigene Sinneswahrnehmung ein, wenn sie das gehörte Signal mit dem gesehenen vergleichen und verknüpfen und schaffen somit einen Selbstbezug.

Auf dieser Grundlage kann die physikalische Sehweise thematisiert werden, die sich ausschließlich für die Druckwellenfronten/Luftdruckkurve von Schall interessiert und völlig außer Acht lässt, was den Menschen daran fesselt. „Die ‚physikalische Akustik‘ enthält dann also in der Tat das, was vom Schall, von Musik bleibt für einen, der taub ist.“^[4]

12. Literatur

- [1] clker.com (The online royalty free public domain clip art): www.clker.com/clipart-10691.html (Stand: 4/2011)
- [2] clker.com (The online royalty free public domain clip art): www.clker.com/clipart-11171.html (Stand: 4/2011)
- [3] Kock, Winston E.: Schall – sichtbar gemacht, Berlin 1974.
- [4] Wagenschein, Martin: Rettet die Phänomene, abgedruckt in: Ders.: Erinnerungen für Morgen; Eine pädagogische Biographie, Weinheim 1983, S. 138f.