

## Akustikexperimente für das Schülerlabor

Elisa Helbig\*, Silvana Fischer\*, Ronny Nawrodt<sup>+</sup>, Holger Cartarius\*

\* AG Fachdidaktik der Physik und Astronomie, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07743 Jena

<sup>+</sup> 5. Physikalisches Institut - Abt. Physik und ihre Didaktik, Universität Stuttgart, 70550 Stuttgart  
elisa.helbig@uni-jena.de

### Kurzfassung

Das Themenfeld Akustik bietet vielfältige Möglichkeiten, um im Schulunterricht an die Alltagswelt der Schülerinnen und Schüler anzuknüpfen. Schülerzentrierte Experimente zum Thema können innerhalb der Schule jedoch nur selten durchgeführt werden, da mehrere Räume zur Verfügung stehen müssten, um gegenseitige Störungen zu vermeiden. Aus diesem Grund bietet sich der Besuch eines Schülerlabors an. Dieser Artikel stellt das Konzept und einige Beispielversuche einer Experimentierreihe vor, die für das Schülerlabor Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena entwickelt wurden. Die differenzierte Struktur der Reihe soll die Nachfrage verschiedener Schulformen der Umgebung abdecken. Insbesondere zeichnen sich die Versuche jedoch durch die überfachliche Verknüpfung zur Biologie aus, indem verschiedene akustische Bezüge zur Tierwelt und zum menschlichen Körper eingebunden werden.

### 1. Einleitung

Die Akustik weist in vielerlei Hinsicht Besonderheiten im Vergleich zu anderen schulischen Themengebieten auf, denn sie ermöglicht zahlreiche Querverbindungen zu anderen Fachdisziplinen, wie z. B. Medizin, Biologie, Musik und Technik. Die Schülerinnen und Schüler bringen einen enormen Erfahrungsschatz aus ihrer Alltagswelt mit. Eine Vielzahl an akustischen Eindrücken strömt tagtäglich auf sie ein und hat das Potenzial, ihr Interesse zu wecken.

Trotz dieser Besonderheiten wird die Akustik im Thüringer Lehrplan, so wie auch in vielen Lehrplänen anderer Bundesländer, kaum aufgegriffen, obwohl die Thematik mit differenziertem Anforderungsniveau in unterschiedlichen Klassenstufen unterrichtet werden könnte. Ein weiterer Vorteil der Lerneinheit Akustik besteht darin, dass im Rahmen der Behandlung der mechanischen Schwingungen und Wellen die aktive Mitarbeit der Lernenden in diversen Schülerexperimenten möglich wird. Im Vergleich dazu sind Seilwellen bzw. Wasserwellen eher ungeeignet, weil sie kaum Gelegenheit bieten, die Vielfalt an Wellenphänomenen zu untersuchen bzw. zu materialaufwändig sind.

Akustische Experimente mit Schallwellen können in der Regel sehr kostengünstig und mit wenig Aufwand durchgeführt werden. Hierbei tritt allerdings das Hindernis auf, dass sich die Lernenden gegenseitig stören würden und die erhöhte Lautstärke im Klassenzimmer ein konzentriertes Arbeiten erschweren würde. Viele Schulen können jedoch nicht auf mehrere Räume gleichzeitig ausweichen, um dieses Problem zu beheben. Aus diesem Grund bietet sich

ein Besuch im Schülerlabor an. Im Schülerlabor Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena können Kleingruppen zum Experimentieren auf mehrere Räume verteilt werden. Lehramtsstudierende im Fach Physik stehen für die Betreuung der Versuche in den einzelnen Räumen zur Verfügung und können aufkommende Fragen der Lernenden beantworten.

Aufgrund dieser Nachfrage wurde zum Themengebiet Akustik eine breit gefächerte Experimentierserie konzipiert und aufgebaut. Im folgenden Abschnitt werden die Grundlagen des Thüringer Lehrplans erläutert, auf denen die Versuchsreihe beruht. Diese werden im dritten Abschnitt mit der Bedeutung der Akustik im Alltag der Schülerinnen und Schüler verglichen. Der vierte Abschnitt geht speziell auf die überfachliche Verbindung zur Biologie ein und stellt einige Beispiele aus der Tierwelt vor, die das Schülerinteresse wecken können. Der fünfte Abschnitt gibt einen Überblick über die didaktische Aufbereitung und die Gestaltung der Anleitungen zu den Versuchen, bevor im sechsten Abschnitt drei konkrete Versuche beschrieben werden. Der Artikel endet mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Aspekte und gibt einen Ausblick, welche Arbeitsschritte in Zukunft folgen werden, um die Versuchsreihe und ihre Einbettung in den schulischen Unterricht weiter zu verbessern.

### 2. Akustik im Thüringer Lehrplan

Der Themenbereich Akustik ist in den Lehrplänen der meisten deutschen Bundesländer kein eigenständiger Komplex, sondern Bestandteil der Behandlung von mechanischen Schwingungen und Wellen. Im

Thüringer Lehrplan ist das Thema der mechanischen Schwingungen und Wellen erstmals in Klassenstufe 9/10 im Themenbereich „Bewegungen, Kräfte und Erhaltungssätze“ vorgesehen. Es folgt auf das Thema der beschleunigten Bewegungen, so dass ein Verständnis für die periodisch schwankende Geschwindigkeit und Beschleunigung abgesichert ist. Sowohl für Gymnasial- als auch für Realschulklassen werden die gleichen Sachkompetenzen im Lehrplan beschrieben [1].

Dabei fällt auf, dass der Begriff „Schallwelle“ nicht explizit auftaucht. Der Themenbereich Akustik muss nach Vorgaben des Lehrplans demzufolge nicht zwingend aufgegriffen werden. Die Kenngrößen einer Welle könnten ebenso am Beispiel von Wasser- oder Seilwellen vermittelt werden. Schallwellen würden in diesem Fall lediglich als Beispiel für longitudinale mechanische Wellen benannt werden. Auch sind keine Schülerexperimente mit explizit akustischem Bezug vorgeschrieben.

Das Thema wird jedoch im Lehrplan für das Wahlpflichtfach Naturwissenschaft und Technik aufgegriffen. Dieses Fach soll den Erwerb fachübergreifender sowie vertiefender naturwissenschaftlicher Kompetenzen unterstützen [2]. Die physikalischen Grundlagen der Akustik sind sehr ausführlich beschrieben und auch experimentelle Anregungen sind angegeben. Im Sinne eines fachübergreifend angelegten Moduls werden die physikalischen Grundlagen stets mit biologischen (z. B. akustische Kommunikation von Tieren, Funktionsweise des menschlichen Gehörs) oder technischen Anwendungen (z. B. Sonografie in der Medizin und Funktionsweise von Hörgeräten) in Verbindung gebracht.

Im Thüringer Lehrplan für die gymnasiale Oberstufe werden die Vorgaben differenziert nach grundlegendem (gA) und erhöhtem (eA) Anforderungsniveau gegliedert. Auch hier wird erstaunlich wenig auf den Bereich der Schallwellen eingegangen. Im eA-Unterricht wird lediglich gefordert, Schall als Longitudinalwelle einordnen zu können und den akustischen Dopplereffekt erklären zu können. Die wesentlichen Welleneffekte können statt an Schallwellen auch an Wasser- oder Seilwellen demonstriert werden. Auch in den verbindlich vorgeschriebenen Schülerexperimenten für das Abitur wird nicht auf die Akustik eingegangen [1].

Warum es trotzdem sinnvoll und förderlich für den Unterrichtserfolg sein kann, stärkeren Bezug auf die Akustik und damit die Schallwellen als Beispiel für mechanische Wellen zu nehmen, wird im folgenden Abschnitt erläutert.

### 3. Bedeutung des Themenbereichs Akustik für das Schülerinteresse

Aus pädagogischer Perspektive bezeichnet Interesse einen Zustand, bei dem die Beschäftigung mit einem Unterrichtsgegenstand mit positiven Gefühlen verbunden und durch Wertschätzung gekennzeichnet

ist. Die Auseinandersetzung mit dem Unterrichtsgegenstand erfolgt also nicht, um indirekt ein anderes Ziel zu erreichen, sondern allein um des Gegenstands Willen [3].

Interessenstudien zum Unterrichtsfach Physik zeigen, dass das Interessenniveau der Schülerinnen geringer ausgeprägt ist als das der Schüler. Um diese Kluft zu beheben, kann es sinnvoll sein, den Unterricht stärker an Alltagsphänomenen und Anwendungen zu orientieren und dabei die individuellen Interessen zu berücksichtigen. Insgesamt werden drei Interessengebiete voneinander unterschieden [4]:

Physik und Technik
Lernende mit Interesse an diesem Gebiet sind allgemein an der Naturwissenschaft Physik an sich interessiert und speziell an technischen Anwendungskontexten. Diesen Bereich empfinden insbesondere die Schülerinnen als uninteressant.
Mensch und Natur
Lernende mit Interesse an diesem Gebiet lassen sich durch Anwendungen der Physik begeistern, die sich mit dem menschlichen Körper auseinandersetzen oder Naturphänomene erklären. Diesen Bereich bevorzugen sowohl Mädchen als auch Jungen am stärksten. Ganz besonders profitieren die Schülerinnen von dieser Themenverknüpfung.
Gesellschaft
Schülerinnen und Schüler mit diesem Interessenbereich wollen wissen, wie physikalische und technische Erfindungen Einfluss auf die menschliche Gesellschaft nehmen und welchen Nutzen und welche Gefahren diese Entwicklungen mit sich bringen. Obwohl Schülerinnen und Schüler diesem Bereich Interesse zuwenden, muss beachtet werden, dass der reguläre Physikunterricht eher wenige Möglichkeiten bereit hält, um diesen Bereich abdecken zu können.

**Abb. 1:** Übersicht der Interessenbereiche im Fach Physik [4].

Aus diesem Grund liegt der Fokus bei der Gestaltung der Experimentierreihe auf dem Interessengebiet „Mensch und Natur“. Das Thema Akustik bietet die Möglichkeit, zahlreiche Anwendungen aus dem medizinischen Kontext aufzugreifen. Beispiele dafür sind: die menschliche Stimme und die Funktionsweise des Ohrs, die Funktionsweise von Hörgeräten (teilweise auch Interessenbereich Technik) sowie die Ultraschalldiagnostik in der Schwangerschaft.

Es bieten sich aber auch fachübergreifende Bezüge zur Biologie an, speziell zur Tierwelt, die im dritten Abschnitt des Artikels näher beschrieben werden.

An geeigneter Stelle ist es sogar möglich, die Neugier der Schülerinnen und Schüler durch die Auseinandersetzung mit der Funktionsweise ihrer eigenen Instrumente zu gewinnen und so eine Verbindung zu ihrer außerschulischen Alltagswelt zu knüpfen. Auch für die technisch interessierten Schülerinnen

und Schüler ergeben sich passende Anwendungen. Hierbei kann beispielsweise angesprochen werden, wie Lautsprecher oder Schallpegelmesser funktionieren, wie mit Hilfe des Sonars das Relief des Meeresbodens ausgemessen werden kann oder welcher Belastung ein Flugzeug beim Erreichen der Schallgeschwindigkeit ausgesetzt ist. Der Interessenbereich „Gesellschaft“ kann bei einer Diskussion zu Auswirkungen von Lärm auf die Gesundheit des Ohrs und zu entsprechenden Schutzmaßnahmen eingebunden werden.

Das Interesse am Physikunterricht wird aber nicht allein durch den Kontext generiert, sondern auch über andere Merkmale der Unterrichtsqualität. Interesse und Motivation an einem Unterrichtsgegenstand entstehen dann, wenn ein Schüler selbstbestimmt handeln darf, sich kompetent in seinem Handeln erlebt und sozial in die Unterrichtsumgebung eingebunden ist [5]. Diese Aspekte sollen auch am außerschulischen Lernort des Schülerlabors durch eine differenzierte Versuchsauswahl und eine übersichtliche Strukturierung der Anleitungen berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 4).

#### 4. Exkurs in die Akustik der Tierwelt

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt erwähnt, greifen die Versuche Anwendungen aus Medizin, Tierwelt und Technik auf. Da die Vorstellung aller erarbeiteten Versuchsanleitungen allerdings den Umfang dieses Artikels überschreiten würde, konzentrieren sich die folgenden Ausführungen auf ausgewählte Beispiele der Tierwelt.

Dass Fledermäuse mittels Ultraschalllauten kommunizieren und jagen, ist vielen geläufig und wird auch in einigen Lehrbüchern für den Unterricht aufgegriffen. Aber kaum bekannt wird den meisten sein, dass Grillen mit ihren Beinen hören können. Sie nutzen wie die meisten Wirbeltiere eine Art Trommelfell als Schalldruckempfänger. Dieses Hörorgan befindet sich an der Basis der Unterschenkel [6]. Genauso ungewöhnlich wie das Hörorgan ist auch die Lauterzeugung der männlichen Grille. Das bekannte Zirpen kommt durch das Aneinanderreiben der Vorderflügel zustande. Die Unterseite der Flügel ist mit einem Kamm aus Chitinzähnen besetzt. Diese Schrilbleiste reibt gegen die Flügelkante und versetzt den Flügel auf diese Weise in Schwingung. Besonders wichtig für die Schallabstrahlung sind die Flügelfelder namens Harfe und Spiegelzelle. Die Geschwindigkeit der Flügelbewegung wird von den Tieren so abgestimmt, dass die Resonanzfrequenz dieser Regionen getroffen wird und die Flügelpartien besonders stark zu Schwingungen angeregt werden [6].

Und auch Honigbienen nutzen den Resonanzeffekt für die Kommunikation im Bienenstock aus. Der aus dem Sachkundeunterricht bekannte Schwänzeltanz der Arbeiterinnen kann nämlich nicht von den anderen Individuen „beobachtet“ werden. Bei völliger Dunkelheit im Stock wird er viel mehr „ertastet“. Die Tiere ziehen während ihres Tanzes mit den

Beinchen an den Wänden der Wabe und bringen sie so unter Spannung, etwa so wie bei einem gedehnten Schnippgummi. Mit der Flügelmuskulatur erzeugt die Biene Vibrationssequenzen mit einer Frequenz von etwa 250 Hz. Diese Frequenz entspricht genau der Resonanzfrequenz der gespannten Wabenstruktur. Auf diese Weise übertragen sich die Schwingungen zu anderen Tieren, welche die Sequenzen nun nachtanzen und die Information über die neue Futterquelle weitergeben können. Die Orientierung des Tiers im Raum während dieser Vibrationssequenzen gibt Auskunft über die Himmelsrichtung des Nahrungsziels [7].

Ein weiterer unbekannter, aber mindestens genauso erstaunlicher Vertreter der tierischen Akustik ist die Familie der Pistolenkrebse. Mit ihrer auffällig großen Schere können sie ein Knallgeräusch erzeugen, das dem Beutefang und der innerartlichen Kommunikation dient. Ein Teil der Schere bewegt sich beim Zusammenschnappen so schnell durch das Wasser, dass dabei durch den Unterdruck ein Kavitationsbläschen entsteht, welches kurz darauf implodiert [8]. Der Knall entsteht demnach nicht durch das Zusammenklappen der Schere, sondern durch die Implosion des Gasbläschens und erreicht deshalb einen Schallpegel von bis zu 200 dB.

Zum Abschluss dieses Abschnitts zur Tierwelt soll die Fledermaus noch einmal ausführlicher erwähnt werden. Ihre Laute bleiben dem menschlichen Gehör verborgen, weil die ausgesendeten Frequenzen zu hoch sind. Wie viele andere Wirbeltiere auch erzeugen Fledermäuse die charakteristischen Laute, indem Luft durch die Stimmlippen gepresst wird, so dass diese zum Schwingen angeregt werden. Da die Stimmlippen besonders straff gespannt sind, werden Laute mit hohen Frequenzen im Ultraschallbereich erzeugt. Die Nasen- und Rachenhöhle wirkt als Resonanzraum und verstärkt die Schwingungen, sodass mitunter Schallpegel von über 130 dB erreicht werden können [9]. Die ausgesendeten Schallsignale werden an Beutetieren oder Hindernissen in der Umgebung reflektiert und von den Tieren detektiert und ausgewertet. Da die Beutetiere in der Regel relativ klein sind, ist die empfangene Schallintensität sehr gering. Aus diesem Grund ist die Lautstärke der Rufe so hoch. Dies hat aber den Nachteil, dass der Ruf der Fledermaus die eigenen Ohren so stark beschallt, dass das zurückkommende Echo nicht wahrgenommen werden kann. Die Gruppe der Hufeisenhasen hat dafür eine besondere Anpassung entwickelt. Ihre Hörschwelle ist bei Frequenzen um 82 kHz besonders niedrig. Bei benachbarten Frequenzbereichen ist die Hörschwelle relativ hoch. Unter Ausnutzung des Dopplereffekts können die Tiere je nach Fluggeschwindigkeit Schallsignale im Frequenzbereich von 77...81 kHz aussenden, ohne diese Signale zu hören, da die Empfindlichkeit in diesem Bereich relativ schwach ist. Die Echos haben aufgrund der Bewegung des Empfängers hin zur Schallquelle eine höhere Frequenz, die genau in den

empfindlichen Bereich von etwa 82 kHz fällt [9]. Diese geschwindigkeitsabhängige Abstimmung der Ruffrequenz kann sehr exakt angepasst werden.

Die Entfernung können die Tiere bis auf wenige Millimeter genau aus der Laufzeit des Echos bestimmen. Aufgrund des geringen Ohrenabstandes ist es allerdings nicht möglich, auf Basis des Laufzeitunterschiedes auf die Richtung des Echos zu schließen. Mit Hilfe der speziell geformten Schallkeulen können die Tiere aus der Klangfarbe der Echos auf die Raumrichtung schließen, aus der das Echo sie erreicht. Durch Interferenzen an der Schallkeule werden bestimmte Frequenzanteile des Echos verstärkt und andere wiederum ausgelöscht. Die Form der Ohrmuscheln ist erstaunlich genau an die neuronalen Auswertungsprozesse der jeweiligen Art angepasst [9].

### 5. Konzeption der Experimentierreihe

Das Schülerlabor Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena wird als außerschulischer Lernort von unterschiedlichen Schulen der Jenaer Umgebung besucht. Somit kommt es den Lehrkräften entgegen, wenn die angebotenen Versuchsanleitungen Vorschläge zur Differenzierung bereithalten, da die Vorkenntnisse der Schülerinnen und Schüler zum Zeitpunkt des Laborbesuchs ganz unterschiedlich ausgeprägt sind. Manche Klassen nutzen die Experimente am Ende der Themeneinheit zur Wiederholung, andere Klassen besuchen das Schülerlabor zu Beginn der Themeneinheit, um interessante und motivierende Eindrücke zu sammeln.

Aus diesem Grund wurden Versuche konzipiert, die für die Sekundarstufe I (Klassenstufe 9/10) und die Sekundarstufe II (Klassenstufe 11/12) geeignet sind. Insgesamt sind 22 Anleitungen zu den folgenden Themenfeldern entstanden: Tonhöhe und Lautstärke, Ton/Klang/Knall/Geräusch, Schallgeschwindigkeit in Luft und Feststoffen, Schallausbreitung, Reflexion von Schall, Stehende Wellen, Resonanz, Schwebung, Interferenz, Dopplereffekt und Gehör.

In den Versuchsanleitungen zur Akustik wird versucht, die einzelnen Facetten experimenteller Kompetenz zu berücksichtigen: Fragestellung entwickeln, Vermutung aufstellen, Experiment planen, Versuch funktionsfähig aufbauen, Beobachten/Messen/Dokumentieren, Daten aufbereiten, Schlüsse ziehen/Diskutieren [10]. Das kann jedoch nicht für alle sieben Facetten in gleichem Maße erfolgen. Es ist bei einem Besuch im Schülerlabor in der Regel schon aus zeitlichen Gründen nicht möglich, die Schülerinnen und Schüler selbstständig Fragestellungen entwickeln zu lassen. Bei vorbereiteten Versuchen ist das Versuchsziel schon vorgegeben, daher entfällt diese Kompetenz. An geeigneter Stelle können die Vermutungen der Schülerinnen und Schüler jedoch erfasst werden. Auch die Kompetenz „Experiment planen“ kann in diesem Rahmen kaum berücksichtigt werden, da die Versuchsmaterialien aus organisatorischen Gründen vorweg schon vorbereitet wer-

den. Die Experimentieraufbauten sind aus diesem Grund auch stets so einfach und selbsterklärend wie möglich gehalten. Auf Wunsch der Schülerinnen und Schüler können jedoch auch kleinere Veränderungen und Ergänzungen vorgenommen werden. Der Fokus der Arbeit im Schülerlabor liegt auf den Kompetenzen Beobachten/Messen/Dokumentieren, Daten aufbereiten, Schlüsse ziehen/Diskutieren.

Eine Differenzierung wird insbesondere durch die Anpassung des Schwierigkeitsgrades erreicht. Jede Anleitung wird einem von drei Schwierigkeitsniveaus zugeordnet, welche symbolisch durch ein bis drei Lautsprecher auf den Anleitungen gekennzeichnet ist. Die Zuordnung der Schwierigkeitslevel erfolgt im Vergleich zu anderen Experimentieraufgaben des gleichen Themas.

Unabhängig vom zugeordneten Anspruchsniveau sollen die Arbeitsblätter so klar wie möglich gestaltet sein, denn umso größer ist die Selbstständigkeit der Lernenden bei der Bearbeitung der Experimentieraufgaben [11]. Wesentliche Fachbegriffe werden deshalb in einfacher Sprache erklärt. Fremdwörter, die für das physikalische Verständnis keinen Mehrwert erbringen, werden möglichst vermieden.

Die gestalterische Umsetzung der Anleitungen soll eine strukturierte Arbeitsweise unterstützen. Dazu wird die Anleitung in einzelne Abschnitte untergliedert und mit leicht wiedererkennbaren Piktogrammen versehen (für den nicht-kommerziellen Einsatz vom IDP-Münster entwickelt [12]):



#### Darum geht's:

In diesem Abschnitt werden die notwendigen inhaltlichen Grundlagen für den jeweiligen Versuch erläutert. Die Lernenden können hier ihr bereits erworbenes Wissen aus dem Schulunterricht auffrischen oder neue Kenntnisse erwerben, falls die Thematik noch nicht angesprochen wurde. Außerdem wird das Ziel des Versuchs deutlich gemacht. Um die Motivation der Schülerinnen und Schüler zu erhöhen, werden häufig Alltagserfahrungen oder Anwendungen als Aufhänger für das Experiment gewählt bzw. Vermutungen abgefragt.



#### Aufgabe:

Die Aufgabenstellung ist kurz gehalten und formuliert das Ziel als Arbeitsauftrag.



#### Materialien:

Die Materiallisten dienen vor allem der Nachvollziehbarkeit des Vorgehens bei der Nachbereitung des Versuchs im Unterricht. Für die Versuchsdurchführung im Schülerlabor werden alle benötigten Materialien am Arbeitsplatz bereitgestellt.



#### Durchführung:

Das experimentelle Vorgehen wird schrittweise gegliedert und ggf. mit knappen Anweisungen zum

Umgang mit der verwendeten Software verstehen.



#### Beobachtung und Messwerte:

In diesem Abschnitt sind die Beobachtungsaufträge und Messwerttabellen zu finden. Je nach Schwierigkeitsniveau sind die Angaben hier unterschiedlich ausführlich gestaltet.



#### Ergebnis:

Bei den Anleitungen mit leichtem und mittelschwerem Anforderungsniveau werden Ergebnisse häufig als Lückentext (teilweise mit Vorgabe der einzusetzenden Begriffe) oder als Ankreuzantwort festgehalten. Zusätzliche Hilfestellungen werden durch angelegte Diagramme (teilweise mit bereits beschrifteten Achsen) und Zeichnungen gegeben. Häufig sind auch die Einheiten und deren Umrechnung angegeben. Bei anderen Versuchen ist in diesem Abschnitt eine Berechnung durchzuführen und evtl. ein Vergleich mit einem Theoriewert vorzunehmen.



#### Bonuswissen:

Dieser Abschnitt dient der Vermittlung von Zusatzinformationen und rückt die Bedeutung des Versuchs und seiner Ergebnisse in einen überfachlichen Kontext. In der Regel werden hier Beispiele aus der Tierwelt, der Medizin oder der Technik beschrieben. Einige Versuchsanleitungen halten an dieser Stelle aber auch erweiternde Aufgaben bereit.

**Abb. 2:** Strukturierung der Versuchsanleitungen in typische Abschnitte eines Schülerprotokolls.

Für einige Versuche wird die Messung mit Hilfe der für Bildungseinrichtungen kostenfreien Software „Soundcard Scope“ [13] durchgeführt. Die Software beinhaltet einen Speicheroszillographen mit integriertem Signalgenerator, Frequenzanalysator und Audiorekorder zur Darstellung und Analyse von Sounddaten. Diese Daten werden direkt von der Soundkarte über den Mikrofoneingang des Laptops aufgezeichnet. Eine Kurzanleitung zum Umgang mit den einzelnen Funktionen wird den Schülerinnen und Schülern bereitgestellt. Experimentieraufgaben, bei denen die Software verwendet wird, werden durchgängig nicht der leichtesten Schwierigkeitsstufe zugeordnet, da die Handhabung des Programms viel Konzentration und sichere Grundlagenkenntnisse erfordert. Die Darstellung der Amplitude als Spannungssignal mit willkürlicher Einheitenwahl erfordert ein fortgeschrittenes Abstraktionsvermögen. Auch die Interpretation des gemessenen Signals und die sorgfältige Messung mit der Cursorfunktion setzen geübte experimentelle Fähigkeiten voraus. Neben dieser Software werden auch die Smartphoneapps „Phyphox“ (RWTH Aachen University) und „Schallanalysator“ (Dr. Markus Ziegler, Gymnasium Spaichingen) für ausgewählte Versuche genutzt.

Auch wenn durch die Gestaltung der Experimentieranleitung schon zahlreiche Maßnahmen zur Differenzierung umgesetzt werden, bleibt es wichtige Aufgabe der studentischen Betreuerinnen und Betreuer, die Lernenden bei der Bewältigung der Aufgaben zu unterstützen und ihnen gegebenenfalls weitere Denkanstöße zu bieten.

In vorheriger Absprache mit der Lehrkraft werden aus dem bisherigen Angebot von 22 Versuchen diejenigen für die Bearbeitung gewählt, welche dem Vorkenntnisniveau der Klasse entsprechen. Je nach Bedarf können mehrere Schwierigkeitsstufen zu einem Thema angeboten werden oder nur eine Variante, wenn diese beispielsweise als Pflichtstation von allen Schülerinnen und Schülern bearbeitet werden soll.

Die Versuche können in frei gewählter Reihenfolge bearbeitet werden. Außerdem soll es keine festgelegten Zeitintervalle geben, nach denen die Stationen gewechselt werden müssen, da eine grundlegende Differenzierungsmaßnahme darin besteht, die Arbeitsgruppen in ihrem jeweiligen Experimentiertempo arbeiten zu lassen. Es soll ausreichend Zeit bleiben, um bei den Betreuern Nachfragen stellen zu können und die Versuchsergebnisse angemessen zu diskutieren. Auf diese Weise wird versucht, den Lernenden ein ausreichendes Maß an Selbstbestimmung zu gewähren, um eine gewisse Motivation für die Auseinandersetzung mit den Versuchen aufrechtzuerhalten.

Damit den Experimentiergruppen zu jeder Zeit eine Wahlmöglichkeit geboten werden kann, müssen mehr Stationen als Schülergruppen vorbereitet werden. Dabei ist es auch möglich, Arbeitsplätze für eventuelle Pflichtstationen mehrmals aufzubauen.

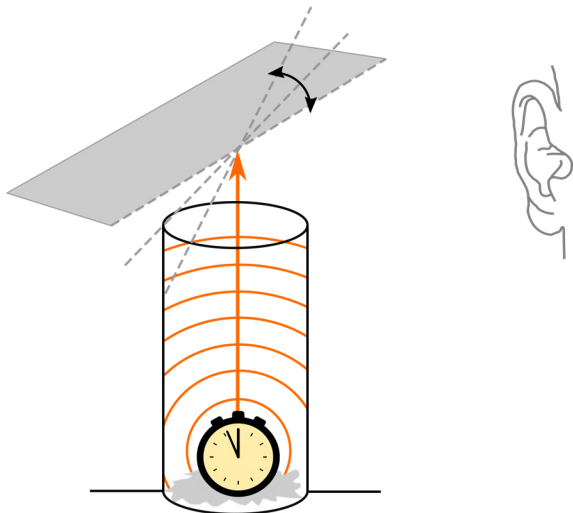
Beim Aufbau der Stationen muss bedacht werden, dass einige Versuche eine besonders ruhige Messumgebung benötigen. Es sollten demzufolge immer mehrere Praktikums- bzw. Laborräume nutzbar sein. Außerdem muss damit gerechnet werden, dass an den Stationen, an denen mit Programmen zur digitalen Messwertaufzeichnung gearbeitet wird, häufiger Hilfestellungen benötigt werden. In einer kurzen Vorbesprechung, in der den Schülerinnen und Schülern der Ablauf des Besuchs im Schülerlabor bekannt gegeben und auf die Sicherheitsrichtlinien hingewiesen wird, kann bereits eine kompakte gemeinsame Einführung in die Handhabung der Software erfolgen.

## 6. Ausgewählte Beispielversuche

In diesem Abschnitt werden drei ausgewählte Versuche genauer vorgestellt.

Der Versuch „**Reflexion von Schall**“ ist dem einfachsten Schwierigkeitslevel zugeordnet. Hierbei wird verdeutlicht, wie Schallwellen an ebenen Oberflächen reflektiert werden. Die Gültigkeit des Reflexionsgesetzes wird dabei nur qualitativ bestätigt.

Für den Versuchsaufbau werden eine hohe Dose, eine Schaumstoffunterlage, eine hörbar tickende Uhr und eine ebene Fläche benötigt (vgl. Abb. 1). Beispielsweise eignet sich dafür ein Tablett. Noch besser ist ein ebener Spiegel geeignet. Für die Messung der Lautstärke wird ein Schallpegelmessgerät (oder eine geeignete Smartphone-App) genutzt.



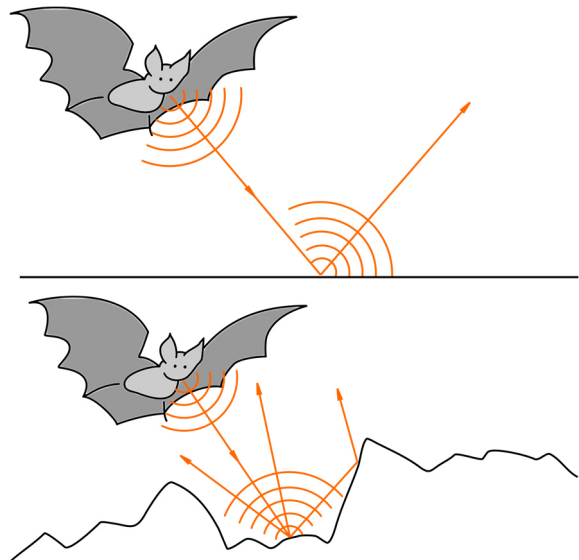
**Abb. 3:** Versuchsaufbau zur Untersuchung der Reflexion von Schallwellen.

Die Uhr wird schwingungsgedämpft auf der Schaumstoffunterlage in der Dose platziert. Die Schülerinnen und Schüler können das Ticken der Uhr nur wahrnehmen, wenn sie das Ohr direkt an die Öffnung der Dose halten. Eine Person setzt sich nun in ca. 1 m Abstand zur Dose. Das Ticken ist nicht mehr oder kaum noch wahrnehmbar. Der Experimentierpartner hält nun das Tablett über die Dose und ändert langsam den Neigungswinkel, bis der davorsitzende Schüler das Ticken wieder deutlich wahrnimmt. Der Versuch sollte unbedingt in einer ruhigen Umgebung durchgeführt werden. Mit dem Schallpegelmessgerät kann der qualitativ festgestellte Lautstärkeunterschied auch gemessen werden. Die beispielhafte Messung ergab eine Veränderung des Schallpegels von 35 dB auf 47 dB.

Bei Verwendung eines Spiegels werden die Schülerinnen und Schüler feststellen, dass das Ticken dann am deutlichsten wahrnehmbar ist, wenn sie gleichzeitig die Uhr im Spiegel sehen können. Das Reflexionsgesetz ist ihnen bereits aus der geometrischen Optik bekannt. Sie können anhand dieser Beobachtungen schlussfolgern, dass auch Schallwellen nach dem Reflexionsgesetz an ebenen Oberflächen reflektiert werden. Für einen quantitativen Nachweis wäre ein Messaufbau mit Ultraschallsensoren geeignet. Allerdings geht dabei der hörbare Sinneseindruck verloren.

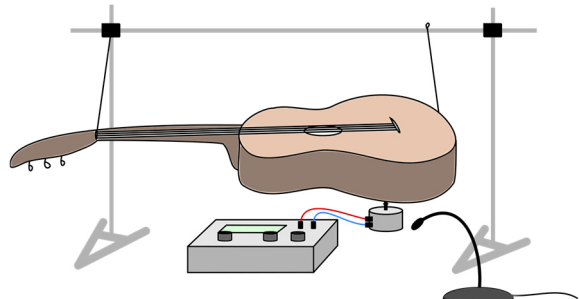
In der Versuchsanleitung werden die Schülerinnen und Schüler schließlich aufgefordert, zu vermuten, wie Schallwellen an unebenen Oberflächen reflektiert werden. Ähnlich wie in der Optik werden die

Schallwellen dabei in unterschiedliche Richtungen gestreut. Fledermäuse nutzen die unterschiedlichen Reflexionseigenschaften des Untergrundes aus, um zu erkennen, ob sie sich über Wasseroberflächen bewegen, an denen sie trinken können. An diesen werden die ausgesendeten Ultraschalllaute von den Tieren wegreflektiert. Das registrierte Echo ist also deutlich leiser als über rauen Landoberflächen, an denen der Schall teilweise zu den Tieren zurückreflektiert wird (vgl. Abb. 2). Diese Versuchsidee basiert auf den Ausführungen von [14].



**Abb. 4:** Unterschiedliche Reflexionseigenschaften von Wasseroberflächen (oben) und Landoberflächen (unten).

Der zweite ausgesuchte Versuch ist dem mittleren Schwierigkeitslevel zugeordnet und untersucht die „**Resonanz von Gitarrensaiten**“. Dabei soll demonstriert werden, dass ein System durch eine externe Anregung zu Schwingungen angeregt werden kann. Dabei gibt es nicht nur eine Eigenfrequenz, die zu Resonanz führt, sondern neben der Grundschwingung weitere Obertöne, die ebenfalls Eigen-schwingungen des Systems darstellen.



**Abb. 5:** Versuchsaufbau zur Untersuchung der Resonanz von Gitarrensaiten mit einem Vibrationsgenerator.

Bei diesem Versuch werden die Saiten einer akustischen Gitarre durch einen Vibrationsgenerator zu Schwingungen angeregt. Für den Betrieb des Vibra-

tionsgenerators wird außerdem ein Frequenzgenerator benötigt. Um die Schwingungen der Saiten auch sichtbar zu machen, können kleine Polystyrolkugeln auf die Saiten gelegt werden. Für die Messwertaufnahme stehen ein Laptop mit der Software „Soundcard Scope“ und ein Mikrofon mit Klinkestecker zur Verfügung (vgl. Abb. 3).

Die Schülerinnen und Schüler sollen anhand der vorgegebenen Eigenfrequenzen der einzelnen Saiten überprüfen, ob Resonanz zu beobachten ist, wenn der Körper der Gitarre durch den Vibrationsstift zu Schwingungen dieser Frequenz angeregt wird. Außerdem soll ausprobiert werden, ob auch ein ganzzahliges Vielfaches der angegebenen Frequenz die entsprechende Saite zu Resonanz anregt. Dies ist erfüllt, da sich auch für ein ganzzahliges Vielfaches stehende Wellen entlang der Saiten ausbilden können. Zum Schluss des Versuchs wird gezeigt, dass sich der Klang dieser Saite aus genau den festgestellten Resonanz- bzw. Eigenfrequenzen zusammensetzt.

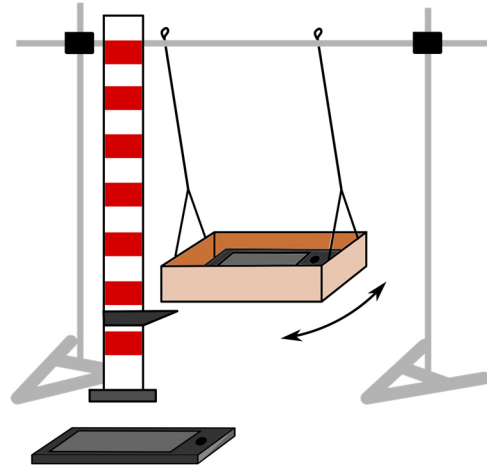
Beispiele für Resonanzerscheinungen finden sich auch im Tierreich. Das Zirpen der Grillen ist nur deshalb so laut, weil die Tiere mit dem Schrillkamm an ihrer Flügelunterseite Töne erzeugen, deren Frequenz exakt mit der Eigenfrequenz bestimmter Flügelzellen übereinstimmt. Die Flügel schwingen also beim Zirpen mit und verstärken den Schall. Alternativ kann hier die Resonanzübertragung der Muskelvibration bei tanzenden Bienen als Beispiel aufgeführt werden. Die Versuchsidee basiert auf den Ausführungen zu Obertönen von [15].

Zum schwierigsten Level gehört der Versuch zum **„Dopplereffekt bei Schwingungen“**, der die Frequenzveränderung bei einer Schwingungsbewegung untersucht. Ziel ist es, aus einer gemessenen Frequenzdifferenz auf die Geschwindigkeit der Schaukel zu schließen. Der Wert soll zum Schluss mit der Geschwindigkeit verglichen werden, die rechnerisch aus der Energieerhaltung resultieren würde.

Für die Messung steht ein Stativ aus zwei stabilen Stativfüßen, zwei vertikalen Stäben und einem horizontalen Stab, der mit Kreuzmuffen befestigt wird, bereit. An das Stativ wird eine Schachtel mit bifilarer Aufhängung gehangen. Als Messgeräte dienen die Smartphones der Schülerinnen und Schüler, auf denen vor dem Besuch im Schülerlabor die App „Phyphox“ installiert werden sollte. Für den Vergleichswert muss die Höhendifferenz gemessen werden, die die Schachtel bei der Schwingung überwindet. Dafür steht ein Lineal mit Markierungspfeilen zur Verfügung (vgl. Abb. 4).

Nach der Ausmessung der Höhendifferenz soll eines der Smartphones als Tongenerator eingesetzt werden. Eine Frequenz von 300 Hz wird bei ausreichend hoher Lautstärke des Geräts eingestellt. Anschließend wird das Gerät in die Schachtel der Schaukel gelegt. Das zweite Smartphone dient der Messung der Frequenz in Abhängigkeit von der Zeit. Dafür

wird die Option „Dopplereffekt“ in der App gewählt. Die Grundfrequenz wird auf 300 Hz eingestellt, die Frequenzschwankung auf 3 Hz. Das Smartphone wird auf den Tisch gelegt, sodass es vor dem Stativaufbau liegt und sich die Schachtel bei ihrer maximalen Auslenkung etwa über dem Gerät befindet. Die Schaukel wird nun ausgelenkt und losgelassen. Nun wird die Messung gestartet und nach 5 bis 6 Schwingungsperioden gestoppt. Unter dem Reiter „Ergebnisse“ kann der Frequenzverlauf eingesehen und vermessen werden. Die Frequenzwerte des maximalen und des minimalen Ausschlags sollen notiert werden.



**Abb. 6:** Versuchsaufbau zur Untersuchung des Frequenzunterschieds bei einer Schwingung aufgrund des Dopplereffekts.

In der Auswertung des Versuchs werden die Schülerinnen und Schüler dazu angeregt, sich zu überlegen, bei welcher Schaukelposition ein Frequenzmaximum, ein Frequenzminimum bzw. ein Nulldurchgang gemessen wird. Dabei soll festgestellt werden, dass die Frequenz minimal ist, wenn sich die Schaukel vom Smartphone entfernt. Maximal ist die Frequenz während der Annäherungsphasen.

Der Rechenweg für die Bestimmung der Geschwindigkeit ist nicht vorgegeben und muss beim schwierigsten Niveau selbst geplant werden.

Aufbauend kann das Verständnis für diesen Versuch genutzt werden, um zu berechnen, welche Frequenzen Fledermäuse bei einer vorgegebenen Flugeschwindigkeit aussenden müssen, damit der reflektierte dopplerverschobene Schall die empfindlichste Hörfrequenz von 82 kHz trifft. Die Versuchsanleitung wurde durch einen ähnlichen Versuch in [14] inspiriert.

Falls Sie an den konkreten Anleitungen zur Versuchsreihe interessiert sind, wenden Sie sich gerne an das Schülerlabor Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena: [schuelerlabor@uni-jena.de](mailto:schuelerlabor@uni-jena.de).

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Um die Nachfrage umliegender Schulen nach einem Experimentierangebot zur Akustik zu bedienen, wurde für das Schülerlabor Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena eine Serie mit 22 Versuchen zusammengestellt, die sich inhaltlich mit den Grundgrößen der Schwingungs- und Wellenlehre und insbesondere den Phänomenen der Schallausbreitung beschäftigen.

Den verschiedenen Anleitungen wurden drei Schwierigkeitsgrade zugeordnet, um den unterschiedlichen Vorkenntnissen und auch den unterschiedlichen experimentellen Fähigkeiten der Schülerinnen und Schüler gerecht zu werden.

Für die Durchführung wird bei vielen Versuchen auf kostenfreie Programme oder Apps zurückgegriffen, um die digitale Messwerterfassung zu schulen. Durch ihren Einsatz kann die Sinneswahrnehmung in Verbindung mit den Messwerten des Gerätes gebracht werden. Bei der im Lehrplan folgenden Behandlung elektromagnetischer Schwingungen und Wellen fehlt der Sinnesindruck im Gegensatz zur Akustik schließlich vollständig. Die Abstraktion sollte jedoch einfacher fallen, da die Schülerinnen und Schüler bereits in der Deutung der digitalen Messwerte geübt sind.

Neben den Versuchsanleitungen wurden auch die entsprechenden Messanordnungen mit vorhandenen Materialien aus der Sammlung der Physikdidaktik und einigen neu angeschafften Mikrofonen und Lautsprechern konzipiert. Alle Anordnungen sind einfach strukturiert, sodass die Funktionsweise schnell überblickt werden kann. Außerdem können die Versuche in kurzer Zeit auf- und abgebaut werden.

Die Versuchsreihe konnte leider nicht wie geplant im Frühjahr von Schulklassen getestet werden, da auch das Schülerlabor den Schutzmaßnahmen der Coronakrise Folge leistete. Dies wird zu gegebenem Zeitpunkt wiederholt, um die Anmerkungen der Schülerinnen und Schüler, der Lehrkräfte und der studentischen Betreuer im Schülerlabor für Anpassungen und Weiterentwicklungen zu nutzen.

Die vorgestellte Experimentierreihe konzentriert sich auf den hörbaren Schall. Denkbar wären ergänzende Versuche mit Ultraschallsensoren. Diese würden Möglichkeiten zur quantitativen Messung des Reflexionsgesetzes, der Beugungs- und Interferenzphänomene und der Ausbildung stehender Wellen eröffnen. Hinzu kommt der Vorteil, dass sich die Lernenden gegenseitig weniger bei der Versuchsdurchführung stören würden, weil die Lärmbelastung im Raum geringer wäre.

Außerdem wäre es sinnvoll, eine sprachlich einfachere Version einiger Versuche für die Klassenstufen 3 bis 6 zu erarbeiten. Die Demonstration akustischer Experimente zur Langen Nacht der Wissenschaften im November 2019 hat die Begeisterung jüngerer Besucher für das Thema gezeigt. Mit ange-

passten Erklärungen könnten auch hier schon einige Effekte der Schallausbreitung untersucht werden.

## 8. Literatur

- [1] Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur (2012): Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife Physik, Erfurt.
- [2] Thüringer Ministerium für Bildung, Jugend und Sport (2018): Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife Wahlpflichtfach Naturwissenschaft und Technik.
- [3] Wiesner, H.; Schecker, H. & Hopf, M. (2017): Physikdidaktik kompakt. Aulis-Verlag.
- [4] Herbst, M.; Fürtbauer, E.-M.; Strahl, A. (2016): Interesse an Physik – in Salzburg. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/682> (Stand 5/2020)
- [5] Wild, E. & Möller, J. (2015): Pädagogische Psychologie. Springer.
- [6] Huber, F. & Thorson, J. (1986): Akustische Verständigung bei Grillen. In: Spektrum der Wissenschaft 02/1986, S. 78-87.
- [7] Esch, H. (1961): Über die Schallerzeugung beim Werbetanz der Honigbiene. In: Zeitschrift für vergleichende Physiologie 45, S. 1-11.
- [8] Koukouvini, P.; Bruecker, C. & Gavaises, M. (2017): Unveiling the physical mechanism behind pistol shrimp cavitation. In: Scientific Reports 7, 13994.
- [9] Dietz, C.; Nill, D. & Helversen, O. (2007): Handbuch der Fledermäuse Europas und Nordwestafrikas. Franckh-Kosmos-Verlag.
- [10] Nawradt, D.; Maiseyenko, V. & Schecker, H. (2011): Experimentelle Kompetenz – Ein Modell für die Unterrichtspraxis. In: PdN Physik in der Schule, S. 42-48.
- [11] Fühner, L. & Pusch, A. (2019): Was macht ein Arbeitsblatt inklusionsspezifisch? Tipps und Hinweise zur Überarbeitung von Arbeitsblättern. In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik 170, S. 40-43.
- [12] Physik kommunizieren - Materialdatenbank des IDP Münster, Url: <http://physikkommunizieren.de/unterrichtsmaterialien/vorlagen/> (Stand 05/2020)
- [13] Zeitnitz, C.: Soundkarten-Oszillograph, Url: [https://www.zeitnitz.eu/scms/scope\\_de](https://www.zeitnitz.eu/scms/scope_de) (Stand 05/2020)
- [14] Sprockhoff, G. (1982): Physikalische Schulversuche. Band 10 Wellenlehre. Volk und Wissen.
- [15] Hansen, B. (2008): Obertöne in der Praxis. In: PdN Physik in der Schule 1/2008, S. 42-48.