

Smartphone Physics: Neue Experimente und Fragestellungen rund um das Messwerterfassungssystem Smartphone

Patrik Vogt¹, Lutz Kasper², Andreas Müller³

¹PH Freiburg, Abteilung Physik, Kunzenweg 21, 79117 Freiburg

²PH Schwäbisch Gmünd, Abteilung Physik, Oberbettringer Straße 200, 73525 Schwäbisch Gmünd

³University of Geneva, Faculty of Sciences / Physics Department and Institute of Teacher Education
patrik.vogt@ph-freiburg.de, lutz.kasper@ph-gmuend.de, Andreas.Mueller@unige.ch

Kurzfassung

In den letzten Jahren wurde in mehreren Beiträgen dargestellt, wie Smartphones und Tablet-Computer als Messwerterfassungssysteme im Physikunterricht der Sekundarstufen 1 und 2 eingesetzt werden können (z. B. [1]-[5]). Möglich wird dies durch eine Vielzahl standardmäßig verbauter Sensoren (insb. Kraftsensoren, Gyroskop, Mikrofon, GPS-Empfänger, CCD-Chip und Riesenmagnetowiderstände), welche mit geeigneten und zumeist kostenfreien Apps ausgelesen werden können. In den bisherigen Publikationen wurden vorwiegend Laborexperimente beschrieben, wobei ein entscheidender fachdidaktischer Mehrwert des Messmittels „Smartphone“ zumeist unberücksichtigt blieb, nämlich die starke Verbreitung der Geräte im Alltag der Schüler und deren Mobilität; wo Lernenden früher lediglich eine Stoppuhr und ein Zollstock zur Verfügung stand, verfügen sie heute über ein vollständiges Messwerterfassungssystem, mit Sensoren, dem Interface und der Auswertelektronik in einem einzigen Gerät in der Größe einer Zigarettenschachtel. Mit dem Messmittel „Smartphone“ können deshalb verstärkt auch experimentelle Inhalte in Hausaufgaben erarbeitet oder vertieft sowie Alltagskontexte experimentell erschlossen werden. Der vorliegende Artikel legt den Fokus insb. auf diesen Aspekt und schließt mit der Vorstellung und Diskussion von Forschungsfragen rund um das Thema „Physics²Go!“ ab.

1. Einleitung

Neben allseits bekannten negativen Effekten im Schulalltag können Mobiltelefone sowie Tablet-Computer den Physikunterricht an vielen Stellen bereichern; zum Beispiel bei der Dokumentation und Auswertung von Experimenten mittels Foto- bzw. Videofunktion, beim Austausch von Dateien unter Nutzung verschiedener Schnittstellen, bei der Durchführung von Internetrecherchen oder beim Einsatz der mobilen Endgeräte als Mess- und Experimentiermittel. Unser Projekt legt den Fokus auf den letztgenannten Punkt, in welchem die in Smartphones und Tablets verbauten Sensoren (insb. Beschleunigungssensoren, Gyroskop, Mikrofon, GPS-Empfänger, CCD-Chip und GMRs, Abb. 1) zur Durchführung quantitativer Schulversuche genutzt werden. Zunächst stand die Konzeption einfacher Experimente im Vordergrund unserer Arbeit, die curricular valide sind und auf ähnliche Weise, lediglich mit anderen Materialien ohnehin im Physikunterricht durchgeführt werden (z. B. schiefe Ebene, Stoßprozesse, freier Fall; [1]-[6]). Dadurch sollte das Messmittel „Smartphone“ ohne größere Anpassungen des Unterrichts in den Lernprozess integriert werden können – erfahrungsgemäß oftmals eine notwendige Voraussetzung für die Akzeptanz eines neuen Mediums bzw. einer neuen Konzeption. In

einem zweiten Schritt legen wir nun den Schwerpunkt auf die wesentlichen Vorteile der modernen Mobiltelefone, die sich in ihrer starken Verbreitung bei den Jugendlichen und in ihrer hohen Mobilität zeigen. Sie ermöglichen das „Herausgehen“ aus dem Physiksaal, die experimentelle Erschließung von Alltagskontexten sowie die Auslagerung und Vertiefung experimenteller Inhalte in Form von Hausaufgaben. Dadurch wird gewissermaßen eine doppelte Kontextorientierung erreicht, indem die thematische Authentizität (Authentizität des Kontextes) mit einer materialen Authentizität verknüpft wird, d. h. die Verwendung von Lern- und Arbeitsmaterialien, die für Schüler vertraut sind. Im Physiksaal selbst, ist die Medienkonkurrenz groß (kommerziell vertriebene Messwerterfassungssysteme oder Videoanalyse-tools) und das Smartphone nicht immer die erste Wahl [8].



Abb. 1: Standardmäßig in modernen Smartphones verbaute Sensoren

2. Beschleunigungen im Alltag

2.1. Wer beschleunigt am stärksten?

Im Gegensatz von Geschwindigkeiten, können wir Beschleunigungen nur sehr schwer einschätzen, was ihre objektive Messung besonders interessant macht [7]. Die Möglichkeiten sind dabei sehr vielfältig und reichen von Beschleunigungsmessungen im Bereich der Technik [9], über Beschleunigungen im Sport bis hin zu Beschleunigungen im Tierreich. Bemerkenswert und didaktisch besonders interessant ist dabei, dass die meisten Bewegungen in Natur und Technik mit näherungsweise konstanter Beschleunigung ablaufen. Dies bietet die Möglichkeit, bei der experimentellen Erarbeitung gleichmäßig beschleunigter Bewegungen auf reale Alltagssituationen zurückzugreifen, anstatt auf aufwändige und kontextfreie Laborexperimente (vgl. 2.2).

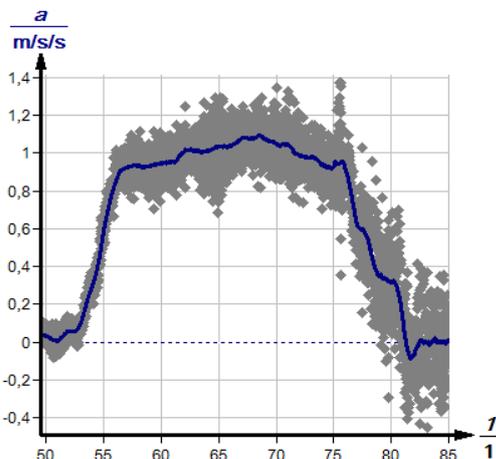


Abb. 2: Anfahrt einer S-Bahn, Beschleunigung von 0 auf 85 km/h; Messwerte (grau), Glättung (blau)

Beispielhaft ist in Abb. 2 der Beschleunigungsverlauf einer anfahrenen S-Bahn dargestellt, weitere Messergebnisse für verschiedene Verkehrsmittel gehen aus Tab. 1 hervor.

	Messung mit Tablet in m/s^2 (Mittelwert der Beschleunigungsphase)	Literaturwert in m/s^2
ICE	0,33	0,5 [10]
S-Bahn	0,83	max. 1 [11]
Auto ¹	1,5 [9]	1,4
	(Mittelwert 0-100 km/h)	(Mittelwert 0-100 km/h) ²
1. Gang	2,4	-
2. Gang	1,9	-
3. Gang	1,3	-
4. Gang	0,8	-
Flugzeugstart	2,3 (Boeing 737)	1,6 (Boeing 747) [10]

Tab. 1: Beschleunigung von Verkehrsmitteln (¹ Skoda Octavia Combi, 75 kW (102 PS), ² aus Herstellerangabe berechnet; von 0 auf 100 km/h in 11,9 s)

Möglicherweise entgegen der Erwartung, ist die Beschleunigung eines wenig sportlichen Kombis beim Anfahren im 1. Gang am größten und mit der Beschleunigung beim Start einer Boing 737 vergleichbar.

2.2. Kinematische Betrachtung einer Fahrstuhlfahrt

Zur Aufnahme des Beschleunigungsverlaufs einer Fahrstuhlfahrt wird der Tablet-Computer oder das Smartphone auf den Boden des Aufzugs gelegt, durch leichtes Andrücken mit den Händen fixiert und während der Fahrt die z -Komponente der Beschleunigung (Beschleunigungskomponente in Richtung der Bewegung, also senkrecht zum Tabletdisplay) mit einer geeigneten App gemessen (z. B. SPARKvue für iOS ([12], [13]), Sensor Kinetics für Android [14]). Die Beispielmessung erfolgte bei einer Fahrt vom Erdgeschoss bis in die 21. Etage in einem Aufzug des Mercure Hotels in Chemnitz (Abb. 4).

In Abb. 5 ist der gemessene Beschleunigungsverlauf rot, der durch numerische Integration erhaltene Geschwindigkeitsverlauf blau dargestellt. Zunächst befindet sich der Fahrstuhl in Ruhe (0-6,2 s), beschleunigt im Anschluss mit einer Maximalbeschleunigung von ca. 1 m/s^2 4 s lang und bewegt sich dann 20,5 s mit näherungsweise konstanter Geschwindigkeit ($\approx 2,6 \text{ m/s}$) weiter. Nach insgesamt 30,8 s bremst der Fahrstuhl ab und kommt bei einer Höhe von 64 m zum Stehen (Abb. 3). Bei einer geschätzten Etagenhöhe von 3 m ergibt sich für den 21. Stock eine Höhe von 63 m, was sehr gut mit dem Ergebnis der Beschleunigungsmessung übereinstimmt.

Da sich Fahrstühle aufgrund ihrer Bauart nach der Beschleunigungsphase mit konstanter Geschwindigkeit weiterbewegen, ist das Experiment zur Erarbeitung gleichförmiger Bewegungen prädestiniert. Beispielsweise kann die lineare Zunahme der zurückgelegten Strecke bei konstanter Geschwindigkeit bzw. nicht vorhandener Beschleunigung sehr eindrucksvoll experimentell überprüft sowie der Zusammenhang der drei kinematischen Größen Beschleunigung a , Geschwindigkeit v und zurückgelegte Strecke s untersucht werden ($v = \int a(t) dt$ bzw. $s = \int v(t) dt$).

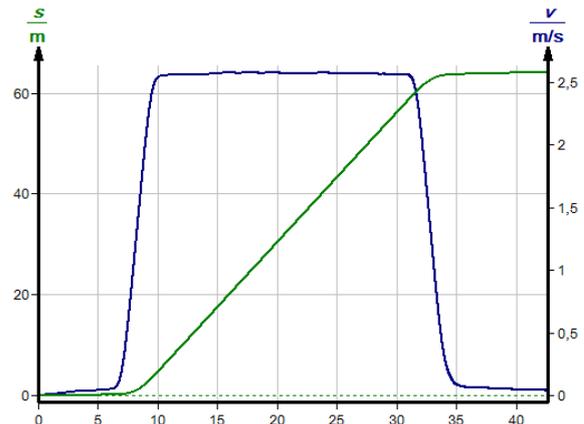


Abb. 3: $v(t)$ - und $s(t)$ -Diagramm der Fahrstuhlfahrt



Abb. 4: Foto des Hotels, dessen Fahrstuhl für das Messbeispiel genutzt wurde (Mercure Hotel in Chemnitz)

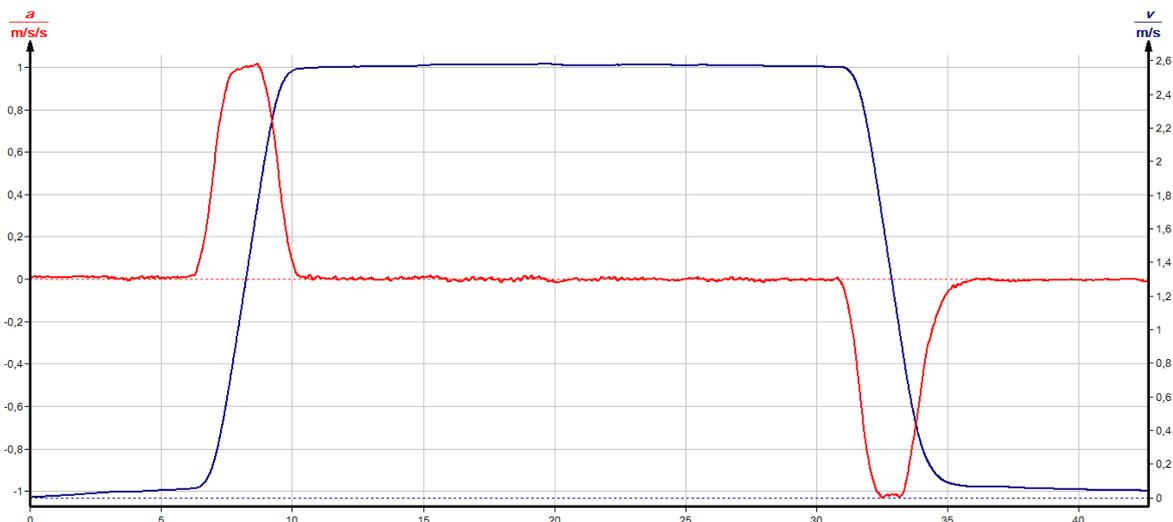


Abb. 5: $a(t)$ - und $v(t)$ -Diagramm der Fahrstuhlfahrt (geglättet und dargestellt mit der Software Measure)

3. Akustische Analysen im Alltag und in Hausaufgaben

3.1. Das Smartphone, ein Akustiklabor

Durch die Möglichkeit, Oszillogramme und Frequenzspektren darzustellen, Schallpegel zu messen und Töne zu erzeugen, ergeben sich auch im Themenbereich Akustik vielfältige Experimentiermöglichkeiten. Hierzu findet man in den einschlägigen Stores zahlreiche Apps, die z. T. mehrere Funktionen gleichzeitig bereitstellen. Sehr einfach zu bedienen ist beispielsweise die Software „Audio Kit“, welche alle oben aufgeführten Anwendungen zur Verfügung stellt ([15], [16], Abb. 6-Abb. 9).

Neben zahlreichen Laborexperimenten (z. B. zur Untersuchung der Schallarten ([6], [15], [17]), der Klangfarbe von Instrumenten [18], akustischer Schwebungen [19], des Dopplereffekt [20], zum Restitutionskoeffizienten springender Bälle [21]) sind auch hier Messungen in Natur und Technik möglich; beispielsweise die Analyse von Tierstimmen, von Flügelschlagfrequenzen (vgl. 3.2), von Musikinstrumenten, Motorengeräuschen [22] oder auch von Schallpegeln. Im Folgenden werden eine Reihe von Versuchen ausführlich beschrieben, bei denen das interne Tablet- bzw. Smartphonemikrofon als Sensor Verwendung findet: Unter anderem die Analyse des Klangs einer Kirchenglocke (vgl. 3.3),

die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit Weingläsern (vgl. 3.5.3) oder die Ursache von Konsonanz und Dissonanz (vgl. 3.7).

3.2. Klänge in der Natur: Flügelschlag einer Biene

Die Flügelschlagfrequenz von Insekten kann anhand einer akustischen Analyse experimentell ermittelt werden. Ermöglicht wird dies dadurch, dass der von Insekten erzeugte Summton durch die Hin- und Herbewegung ihrer Flügel hervorgerufen wird [23]. Somit entspricht die Frequenz des akustischen Signals gerade der Flügelschlagzahl pro Sekunde.

Über das interne Mikrofon des Smartphones wird das von Insekten (hier von einer Biene) erzeugte Schallsignal aufgenommen und mit einer Oszilloskop-App (z. B. OsciPrime Oscilloscope Legacy für Android [24], Oszilloskop für iOS [25]) analysiert. Das Oszillogramm des von einer Biene erzeugten Summtons (aus physikalischer Sicht eigentlich ein Klang!) zeigt die Abb. 10. Für sieben Perioden benötigt die Biene 32,14 ms, d. h. ihre Flügelschlagfrequenz liegt bei ca. 218 Hz. Bemerkenswerterweise ist die Varianz bei der Untersuchung vieler verschiedener Bienen sehr gering, sodass man von einer für die Biene charakteristischen Flügelschlagfrequenz sprechen kann [23].



Abb. 6: Oszillogramm des Klangs einer Blockflöte, dargestellt mit Audio Kit



Abb. 7: Frequenzspektrum des Klangs einer Blockflöte, dargestellt mit Audio Kit



Abb. 8: Messung des Lautstärkepegels mit Audio Kit

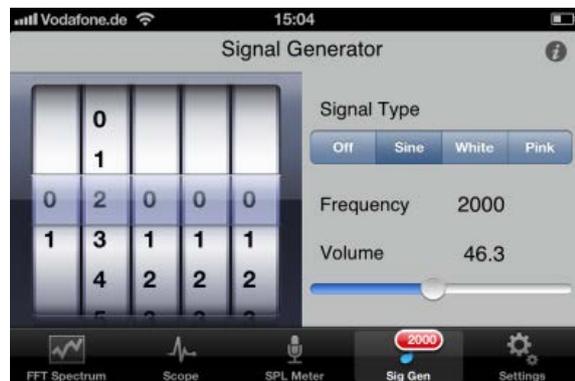


Abb. 9: Tonerzeugung mit Audio Kit



Abb. 10: Oszillogramm des Summtons einer Biene

3.3. Klänge im Alltag: Schwingungsmoden einer Kirchenglocke

Ein aus physikalischer Sicht sehr interessantes und im Alltag nahezu überall anzutreffendes Instrument,

sind Kirchenglocken. Trifft der Klöppel den Schlagring, so verformt er diesen kurzzeitig und regt eine Vielzahl unterschiedlicher Schwingungsmoden an ([26], [27], Abb. 11). Dabei handelt es sich nicht wie bei den meisten Musikinstrumenten um Harmonische, sondern um wohlklingend aufeinander abgestimmte Teiltöne. Die wichtigsten sind dabei die Prime (Grundton), die Unteroktave (Hum), die Terz, die Quinte und die Oberoktave ([26], [27], Abb. 11). Mit einem Smartphone und einer geeigneten FFT-App (z. B. Spektro:skop [28]) lassen sich die Teiltöne einer Glocke sehr einfach nachweisen (Abb. 12) und die gemessenen Frequenzen können mit Literaturangaben verglichen werden (zu vielen Glocken findet man die Daten z. B. in der Internetzyklopädie „Wikipedia“).

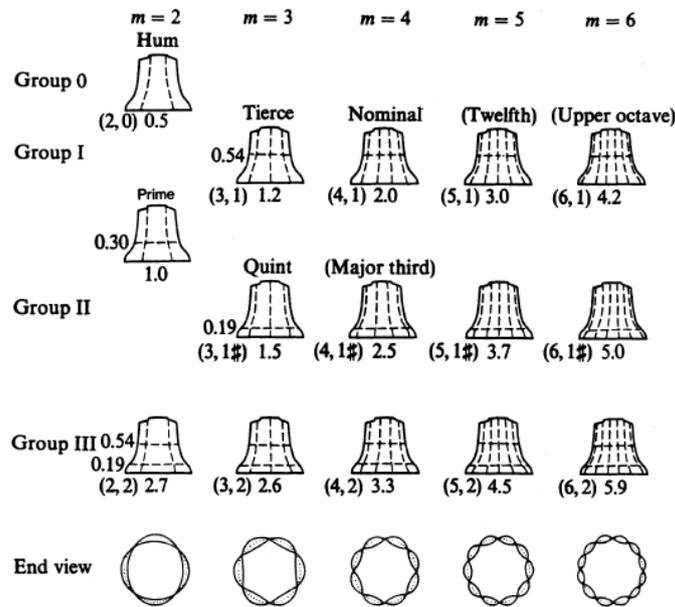


Abb. 11: Schwingungsmoden einer Glocke [27]

Frequenzverhältnisse der ersten Oberschwingungen ausgehend vom Grundton „Prime“ (346 Hz):

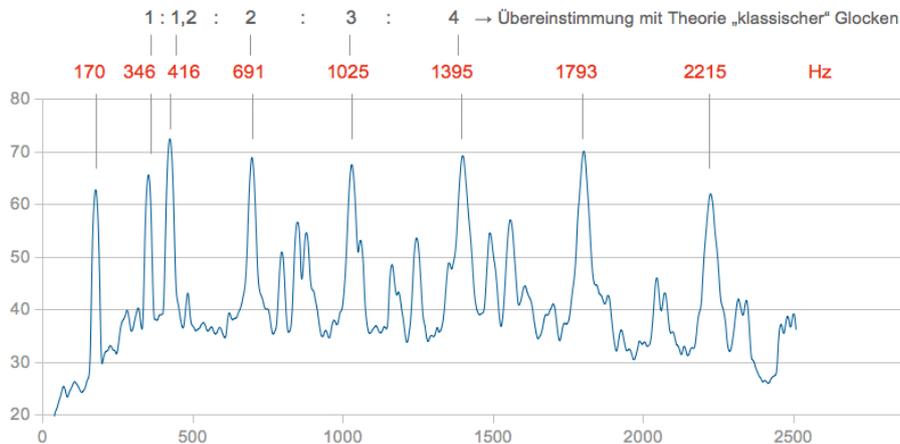


Abb. 12: Mittagsgeläut des Heilig-Kreuz-Münsters, Schwäbisch Gmünd (Liebfraueglocke), aufgenommen mit der App „Spektro:skop“ [28], dargestellt mit einem Tabellenkalkulationsprogramm

3.4. Stehende Wellen in Röhren – experimentelle Erschließung der Mündungskorrektur

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Schallreflexion am offenen Rohrende sowie stehende Wellen in Pfeifen und Helmholtzresonatoren besprochen und zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Luft herangezogen. Zur exakten Auswertung der Experimente muss die Mündungskorrektur berücksichtigt werden, also die Tatsache, dass der Reflexionspunkt der Schallwelle bzw. ihr Druckknoten leicht außerhalb des Rohres bzw. des Resonators liegt. Diese Mündungskorrektur ist abhängig vom Radius R der Öffnung und es gilt:

$$\Delta L = \frac{\pi}{4} R \quad ([29])$$

Auch wenn die Mündungskorrektur für Schulzwecke vernachlässigt werden kann, ist es möglich, diese mit einfachen Mitteln, nämlich unter Zuhilfenahme von Boomwhackers (Abb. 13) zu bestimmen. Das prinzipielle experimentelle Vorgehen ist nicht neu und wurde bereits in [30] beschrieben. Allerdings wird für die bisher beschriebene Variante der Aufbau der Tonleiter vorausgesetzt, was bei folgender Methode umgangen werden kann: Man erzeugt mit einem Smartphone und einer Tongenerator-App (z. B. Audio Kit [16]) ein weißes Rauschen – alle Frequenzen in einer gewissen Bandbreite besitzen näherungsweise die gleiche Amplitude [31] –, welches über einen an einem Rohrende platzierten Aktivlautsprecher verstärkt wird. Durch das weiße Rauschen kommt es im Rohr zur Anregung einer stehenden Welle, deren Frequenz mit einem zweiten Smartphone gemessen werden kann; z. B. mit der App Spektroskop [28].



Abb. 13: C-Dur-Boomwhackers (diatonische Tonleiter)



Abb. 14: Versuchsaufbau zur experimentellen Bestimmung der Mündungskorrektur

Die halbe Wellenlänge kann über die Frequenzmessung berechnet werden, welche näherungsweise der Rohrlänge L entspricht. Es gilt:

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f}$$

Diese Messung wiederholt man für jede Röhre und vergleicht die so errechneten Längen mit einer Längenmessung mittels Maßstab (Abb. 15). Man erkennt deutlich, dass die mit einem Maßstab gemessene Rohrlänge systematisch unter der aus der Frequenzmessung bestimmten Rohrlänge liegt und dass die absolute Abweichung konstant ist. Es kann also gefolgert werden, dass die Schalldruckknoten tatsächlich leicht außerhalb der Röhre liegen. Für die verwendeten Boomwhackers ergibt sich eine experimentell bestimmte Mündungskorrektur von 1,2 cm, was zumindest größenordnungsmäßig mit dem theoretischen Wert übereinstimmt (1,6 cm bei einem Rohrradius von 2 cm).

Mit dem beschriebenen Experiment kann lediglich die Notwendigkeit einer Mündungskorrektur im Physikunterricht aufgezeigt werden, die Berechnungsgleichung für beliebige Rohre ist den Lernenden dann ohne nähere Begründung anzugeben.

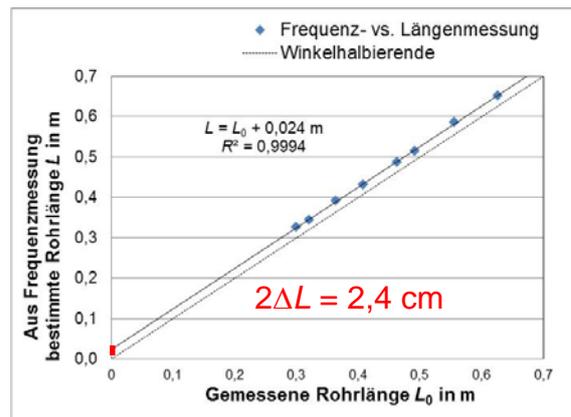


Abb. 15: Die mit einem Maßstab gemessene Rohrlänge unterschätzt die aus der Frequenzmessung bestimmte Rohrlänge systematisch um die doppelte Mündungskorrektur.

3.5. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Luft

3.5.1. Schallausbreitung in Abflussrohren c-Messung

Aus zusammensteckbaren Abwasserrohren, wie man sie im Baumarkt zu akzeptablen Preisen erhält (z. B. Länge $l = 2$ m, Durchmesser $d = 11$ cm, ca. 10 EUR), wird ein möglichst langes Schallrohr (mindestens 10 m) aufgebaut. Flüstert ein Schüler in eines der Enden hinein, so können Klassenkameraden am anderen Ende ihren Mitschüler trotz großer Wegstrecke gut verstehen (Abb. 16); der Schall kann sich nur in Rohrrichtung ausbreiten, weshalb der Schalldruck auch am gegenüberliegenden Ende die Hörschwelle überschreitet. Besonders eindrucksvoll ist das „Flüsterexperiment“, wenn das Schallrohr um

eine oder mehrere Ecken führt, was durch passende Rohrbögen realisiert werden kann. Darüber hinaus lässt sich aber noch ein weiteres Phänomen beobachten: Das sich im Rohr ausbreitende Schallsignal wird am offenen Rohrende reflektiert¹ und mit leichter Verzögerung als Echo erneut wahrgenommen. Erzeugt man z. B. durch Klopfen ein Schallsignal hoher Lautstärke, so kann dieses infolge von Mehrfachreflexionen an den Rohrenden sogar mehrmals gehört werden. Mit jedem Echo nimmt die Ausbreitungsstrecke um die doppelte Rohrlänge zu. Registriert man die akustischen Signale mit der Oszilloskop-App eines Smartphones (Abb. 17), dann kann aus den ablesbaren Zeitdifferenzen die Schallgeschwindigkeit in Luft mit hoher Genauigkeit bestimmt werden.



Abb. 16: Ein Mädchen lauscht der Stimme eines Mitschülers, der sich am anderen Ende des Schallrohrs befindet



Abb. 17: Screenshot der App „Oszilloskop“; der erste Ausschlag repräsentiert das originäre Klopfgeräusch, die weiteren werden von den aufeinanderfolgenden Echos verursacht.

¹ Schallwellen werden bei vorliegenden Impedanzänderungen reflektiert. Für die Schallausbreitung in Rohren ist die Impedanz gegeben durch $Z = \frac{p}{v \cdot A}$ (p Schalldruck, v Schallschnelle, A Querschnittsfläche) und ist insb. abhängig vom Rohrquerschnitt. Eine Änderung der Querschnittsfläche führt somit zwangsläufig zu einer teilweisen Reflexion der Schallwelle, mit dem Reflexionsfaktor $r = \frac{p_r}{p_e} \approx \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2}$ (p_r/e Schalldruck der reflektierten/einlaufenden Welle, $A_{1/2}$ Querschnitt des ersten/zweiten Rohrteils) [32]. Für die Grenzfälle $A_2 \rightarrow 0$ (geschlossenes Rohrende) und $A_2 \rightarrow \infty$ (offenes Rohrende) ist $|r| = 1$ und die Schallwelle wird (fast) vollständig reflektiert.

Die Beispielmessung wurde mit dem Schallrohr der Mitmachausstellung „Miniphänomene“ der Pädagogischen Hochschule Freiburg bei einer Raumtemperatur von 18 °C durchgeführt; es hat eine Länge l von ca. 34,4 m und einen Radius $R = 8,1$ cm. Wie der Abb. 2 entnommen werden kann, beträgt die Laufzeit des dritten Echos 0,608 s. Mit der Mündungskorrektur $\Delta l = \frac{1}{4}\pi R$ [29] (der tatsächliche Reflexionspunkt liegt um Δl hinter dem Rohrende) gilt:

$$c = \frac{s}{t} \approx \frac{l \cdot 2 \cdot 3 + 10\Delta l}{t} = \frac{6l + \frac{5}{2}\pi R}{t} \approx 341 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Das Ergebnis stimmt sehr gut mit dem Literaturwert von 342 ms^{-1} (bei 18 °C) überein [33].

Um die Messfehler zu minimieren, wird nicht die Zeitdifferenz von Klopfgeräusch und erstem Echo bestimmt, sondern die zu einem möglichst späten. So erreicht man eine vielfach höhere Ausbreitungsstrecke und einen geringen Messfehler von insgesamt $\pm 1 \text{ m/s}$. Im Schulunterricht kann die Mündungskorrektur vernachlässigt werden; beispielsweise hat sie im obigen Messbeispiel an der Gesamtstrecke lediglich einen Anteil von ca. 0,3 %.

Rohrlängenmessung

Statt die Schallgeschwindigkeit zu ermitteln, kann das beschriebene Verfahren umgekehrt zur experimentellen Bestimmung von Rohrlängen genutzt werden; für das in Abb. 18 dargestellte Schallrohr ($R = 3,5$ cm) beträgt die Laufzeit zwischen dem ursprünglichen Signal und dem 3. Echo 199 ms (Abb. 19). Damit lässt sich die Rohrlänge akustisch zu 11,3 m bestimmen (bei $\vartheta = 18$ °C). Die mit Maßband ermittelte Länge betrug 11,25 m, wobei die Messgenauigkeit durch die mehrfachen Winkel zu berücksichtigen ist.



Abb. 18: Aus zusammensteckbaren Wasserrohren aufgebautes Schallrohr



Abb. 19: Messung der Rohrlänge mit der App „Oszilloskop“ [25]

Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit

Da infolge der hohen Ausbreitungsstrecke die Messfehler der ermittelten Schallgeschwindigkeit sehr gering sind ($\pm 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$), kann mit dem beschriebenen Aufbau die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Luft nachgewiesen werden. Hierzu wurde das in Abb. 18 dargestellte Schallrohr zunächst im Freien (Abb. 20) und anschließend im Gebäude aufgebaut (um den Messfehler der Rohrlänge zu minimieren, wurde das Schallrohr hier gestreckt, also ohne Winkelstücke eingesetzt). Die Ergebnisse (Tab. 2) stimmen gut mit den theoretischen Werten überein.



Abb. 20: Untersuchung der Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Luft

	Messung im Freien	Messung im Gebäude
Rohrlänge	9,48 m	9,48 m
Rohrradius	0,07 m	0,07 m
Temperatur	0 °C	24 °C
Zeitdifferenz zwischen Signal und 4. Echo	0,229 s	0,219 s
experimentell bestimmte Schallgeschwindigkeit	333 m/s	348 m/s
Literaturwert der Schallgeschwindigkeit	331,5 m/s	345,8 m/s

Tab. 2: Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit

3.5.2. Die „Pfälzer Röhre“

Eine weitere 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 wie Flaschen oder Weingläser, die man als Helmholtzresonatoren ansieht (vgl. 3.5.3). 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. 21). Zum Auffinden seiner Resonanzfrequenz erzeugt man mit einer geeigneten App ein weißes Rauschen (Abb. 22) und bestimmt gleichzeitig, die vom Resonanzkörper verstärkte Frequenz (Abb. 23). Bei einer Glashöhe von 0,15 m und einer Raumtemperatur von 24 °C ergibt sich die Schallgeschwindigkeit in Luft zu

$$l + \frac{1}{4}\pi R = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f}$$

$$\Rightarrow c = \left(l + \frac{1}{4}\pi R\right) \cdot 4f$$

$$= \left(0,15 \text{ m} + \frac{1}{4}\pi \cdot 0,037 \text{ m}\right) \cdot 4 \cdot 495 \frac{1}{\text{s}}$$

$$\approx 355 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

und stimmt gut mit dem Literaturwert von 346 m/s überein [33].



Abb. 21: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit einem Pfälzer Schoppenglas



Abb. 22: Frequenzspektrum des weißen Rauschens ohne Resonanzröhre, aufgenommen mit Audio Kit

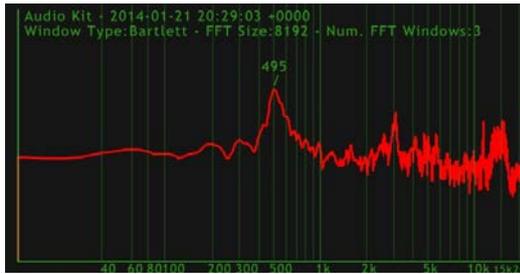


Abb. 23: Frequenzspektrum mit Resonanzröhre, aufgenommen mit Audio Kit

3.5.3. Rotweingläser als Helmholtzresonatoren

Bei der Untersuchung eines Rotweinglases geht man analog vor (Abb. 24), nutzt bei der Auswertung jedoch die Beziehung für den Helmholtzresonator [29]:

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

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



Abb. 24: Verwendung eines Rotweinglases als Helmholtz-Resonator

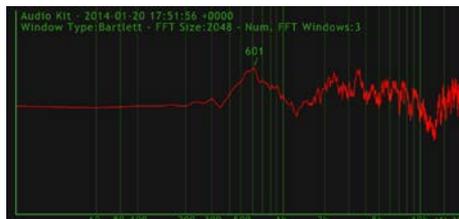


Abb. 25: Die Resonanzfrequenz des verwendeten Rotweinglases beträgt 601 Hz, aufgenommen mit Audio Kit

3.6. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Stahl

Auch die Schallgeschwindigkeit in Stahl kann im Alltag der Schülerinnen und Schüler mit Hilfe eines Smartphones bestimmt werden. Hierzu legt man das Gerät mit eingeschalteter Oszilloskop-App auf ein Bahngleis und erzeugt mittels Hammerschlag in ausreichend großer Entfernung (etwa 30-50 m) einen Schallimpuls großer Intensität. Dieser breitet sich im

aus Stahl bestehenden Gleis wie auch über die Luft zum Smartphone hin aus. Die Schallgeschwindigkeit in Luft, welche für dieses Experiment als bekannt vorausgesetzt werden muss, liefert mit der Zeitdifferenz, mit der die beiden Signale das Smartphone erreichen, die Schallgeschwindigkeit in Stahl. Es gilt:

$$c_{\text{Stahl}} = \left(\frac{1}{c_{\text{Luft}}} - \frac{\Delta t}{s} \right)^{-1} \approx 5200 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

($c_{\text{Luft}} = 334 \text{ ms}^{-1}$ (bei $\vartheta = 5 \text{ }^\circ\text{C}$), Distanz des Hammerschlags $s = 30 \text{ m}$, Zeitdifferenz der beiden Signale $\Delta t = 0,084 \text{ s}$). Das Ergebnis stimmt gut mit dem Literaturwert überein ($c_{\text{Stahl}} = 5100 \text{ ms}^{-1}$, bei $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ [34]).

Bei Experimenten an Bahngleisen ist natürlich größte Vorsicht geboten. Für Schülerexperimente kommen eigentlich nur stillgelegte Streckenabschnitte infrage. Alternativ lassen sich alle lang gestreckten festen Körper der o. g. Dimension, wie z. B. Brückengeländer nutzen. Für einen Abgleich mit Tabellenwerten ist es günstig, das Material zu kennen.



Abb. 26: Messung der Schallgeschwindigkeit in Eisen mittels Bahngleis und Smartphone



Abb. 27: Der sich über die Luft ausbreitende Schall erreicht das Smartphone aufgrund der geringeren Schallgeschwindigkeit mit einer messbaren Verzögerung gegenüber dem Signal, das sich im Gleis fortpflanzte.

3.7. Konsonanz und Dissonanz

Werden mit einem Instrument zwei Klänge gleichzeitig gespielt, so wird deren Überlagerung entweder als angenehm oder als unangenehm empfunden. Im ersten Fall spricht man von Konsonanz (lateinisch con = zusammen und sonare = klingen), im zweiten von Dissonanz (lateinisch dis = unterschiedlich). Ob zwei Klänge als konsonant wahrgenommen werden, hängt davon ab, wie stark ihre Obertonspektren miteinander übereinstimmen. Liegen die beiden Klänge z. B. eine Oktave auseinander, so beträgt ihr Frequenzverhältnis 2:1 und der Grundton des höheren Klangs fällt mit dem ersten Oberton des tieferen zusammen.

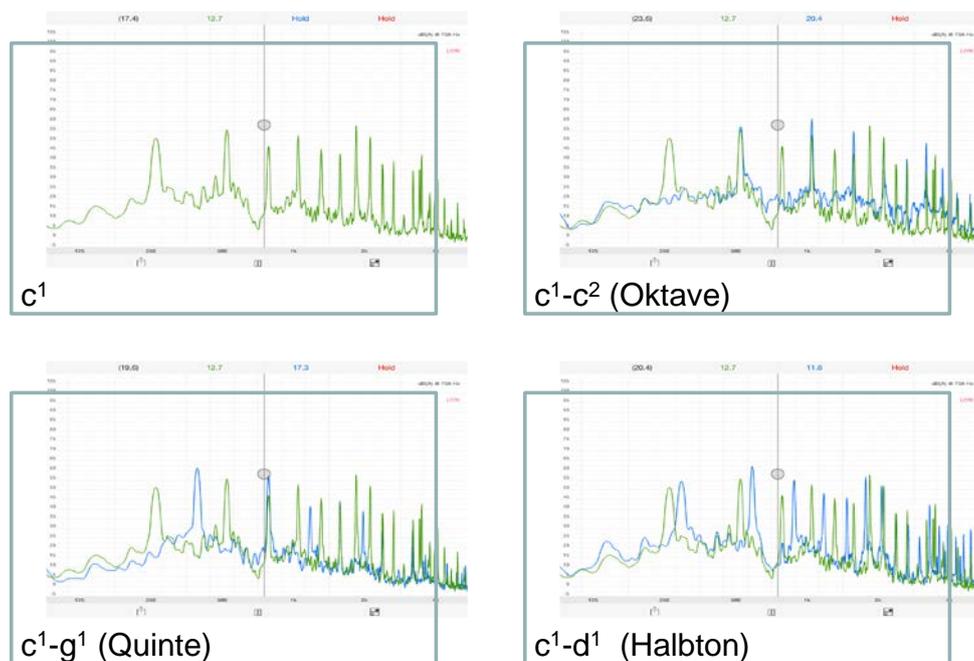


Abb. 28: Untersuchung von Konsonanz und Dissonanz mit einem Klavier; aufgenommen mit einem iPad 2 und der App „Spektroskop“ [28]

Auch die anderen Obertöne des höheren Klangs stimmen mit denen des tieferen überein (Abb. 28, oben rechts). So kommt es, dass die beiden Klänge miteinander „verschmelzen“ und einen angenehmen Höreindruck hervorrufen. Dies gilt umso mehr, je einfacher das Frequenzverhältnis der beiden Grundschwingungen ist. Liegen die beiden Frequenzen z. B. eine Quinte auseinander (Frequenzverhältnis von 3:2), dann fällt zumindest noch jeder zweite Oberton des höheren Klangs mit einem Oberton des tieferen zusammen (Abb. 28, unten links). Beim Halbton dagegen fällt nur jeder 12. Oberton zusammen, wodurch ein dissonanter Höreindruck entsteht (Abb. 28, unten rechts) [35].

4. Neue Forschungsfragen rund um Physics²Go!

Bisher wurde von Kuhn und Vogt [36] untersucht, ob curricular valide Smartphone-Experimente im Themenbereich „Akustik“ wirksamer sind – bezüglich Motivation und Leistung – als inhaltsgleiche Experimente mit Materialien vom Lehrmittelhersteller (z. B. Smartphone statt Messmikrofon und Interface). Entsprechend der Neuausrichtung des Projekts „Physics²Go!“ legen wir auch bei empirischen Folgearbeiten den Fokus auf die Aspekte „Verbreitung“ und „Mobilität“ und planen die Untersuchung folgender Forschungsfragen in quasiexperimentellen Studien mit Versuchs-Kontrollklassen-Design.

- Welche Effektivität besitzen Smartphone-Heimversuche verglichen mit konventionellen inhaltsgleichen Aufgabenstellungen?
- Welche Effektivität hat die Untersuchung von Alltagskontexten mit dem Smartphone vergli-

chen mit inhaltsgleichem traditionellem Experimentalunterricht?

- Können Motivation und Leistung bei Nebenfachstudierenden (z. B. Ingenieure oder Mediziner) durch Smartphone-Heimversuche besser gefördert werden?

Die Untersuchung der Forschungsfrage c) erfolgt im WiSe 2014/15 in Kooperation mit der Hochschule Kempten, Studien zu a) und b) sind in Vorbereitung.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Smartphones stellen ein vollwertiges Messwerterfassungssystem dar und ermöglichen dadurch einen niederschweligen Zugang zu physikalischen Messverfahren und quantitativen Analysen. Die Vorteile des Smartphones fußen insb. auf der starken Verbreitung der Geräte, der großen Vertrautheit bei den Schülern im Umgang mit der neuen Technologie, der intuitiven Bedienbarkeit, und der hohen Mobilität. Dadurch ist die Auslagerung/Vertiefung experimenteller Inhalte in Hausaufgaben möglich und zwar in Form von Heimversuchen i. Allg. und durch die experimentelle Untersuchung von Alltagskontexten im Besonderen (Kontextorientierung²!). Die ersten Ergebnisse zur Lernwirkung von Smartphone-Experimenten sind positiv [36], empirische Studien in Schule und Hochschule zu den o. g. Aspekten in Vorbereitung.

6. Literatur

- Vogt, P., Kuhn, J. & Wild, M. (2012). Experimente mit Smartphones – grundlegende Mechanik. In: RAAbits Physik SEK I/II. Stuttgart: Dr. Josef Raabe Verlag.

- [2] Vogt, P.; Kuhn, J. & Gareis, S. (2011). Beschleunigungssensoren von Smartphones: Beispieleexperimente zum Einsatz im Physikunterricht. In: PdN-PhiS. 7/60, S. 15-23.
- [3] Vogt, P. & Kuhn, J. (zur Veröffentlichung angenommen). Elastische und inelastische Stöße mit den in Smartphones verbauten Beschleunigungssensoren. In: PdN-PhiS.
- [4] 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)
- [5] Vogt, P. (2013). Akustische Bestimmung der Erdbeschleunigung. In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik 138, S. 43-44.
- [6] Vogt, P. & Kuhn, J. (2012). Akustik mit dem iPhone. In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik 132, S. 43-44.
- [7] Vogt, P. (2014). Tablet-Computer als Mess- und Experimentiermittel im Physikunterricht. In: A. Bresges, L. Mähler & A. Pallack (Hrsg.): Unterricht mit Tablet-Computern lebendig gestalten. (Themenspezial MINT). MNU Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen e. V., Verlag Klaus Seeberger: Neuss, S. 66-78.
- [8] Vogt, P. (2014). Smartphone Physics: Beschleunigungsmessungen im Physikunterricht – Lernanlässe oder Lernhindernisse? In: PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, Frankfurt a. M. 2014. (Verfügbar unter: www.phydid.de)
- [9] Vogt, P. & Kuhn, J. (2013). Beschleunigungen im Alltag. In: MNU 66 (4), 252.
- [10] Meyer, L. & Schmidt, G.-D. (Hrsg.) (2005). Basiswissen Schule Physik (CD-ROM). Stichwort „Beschleunigung“. Mannheim: DUDEN Verlag, Berlin: DUDEN PAETEC Schulbuchverlag.
- [11] Internetenzyklopädie Wikipedia, Stichwort „Beschleunigung“. Verfügbar unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Beschleunigung> (05/2014)
- [12] Kuhn, J., Vogt, P., Wilhelm, T. & Lück, S. (2013). Smarte Physik. Beschleunigungen messen mit SPARKvue. In: Physik in unserer Zeit 2/44, S. 97-98.
- [13] SPARKvue (kostenfrei): <https://itunes.apple.com/de/app/sparkvue/id361907181> (05/2014)
- [14] Sensor Kinetics (kostenfrei): <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.innovations.sensorkinetics> (05/2014)
- [15] Vogt, P., Kuhn, J., Wilhelm, T. & Lück, S. (2013). Smarte Physik. Ton und Klang mit Audio Kit. In: Physik in unserer Zeit 3/44, S. 151-152.
- [16] Audio Kit (6,99 EUR): <https://itunes.apple.com/de/app/audio-kit/id376965050> (05/2014)
- [17] Kuhn, J. & Vogt, P. (2013). Analyzing acoustic phenomena with a smartphone microphone. In: The Physics Teacher 51, S. 118-119.
- [18] Vogt, P. (zur Veröffentlichung angenommen). Moment mal...: Was gibt Musikinstrumenten ihren Klang? In: PdN-PhiS.
- [19] Kuhn, J., Vogt, P. & Müller, S. (2011). Handys und Smartphones. Einsatzmöglichkeiten und Beispieleexperimente im Physikunterricht. In: PdN-PhiS. 7/60, S. 5-11.
- [20] Vogt, P., Kuhn, J. & Müller, S. (2011). Experiments Using Cell Phones in Physics Classroom Education: The Computer Aided g-Determination. In: The Physics Teacher 49, S. 383-384.
- [21] Schwarz, O., Vogt, P. & Kuhn, J. (2013). Acoustic measurements of bouncing balls and the determination of gravitational acceleration. In: The Physics Teacher 51, S. 312-313.
- [22] Mathelitsch, L., Verovnik, I.: Akustische Phänomene, Praxisschriftenreihe Physik Band 61, Aulis Verlag Deubner, Köln, 2004.
- [23] Kasper, L. (2013). Der Insektenflug als authentischer Kontext für den Physikunterricht. In: PhyDid B – Tagungsband der Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Jena, 2013.
- [24] OsciPrime Oscilloscope Legacy (kostenfrei): <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.h.serverbox.android.oscprime&hl=de> (05/2014)
- [25] Oszilloskop (8,99 EUR): <https://itunes.apple.com/de/app/oszilloskop/id388636804> (05/2014)
- [26] Bammel, K. (2007). Süßer die Glocken nie klingen. In: Physik Journal 6 (2007) Nr. 12, S. 62-63.
- [27] Fletcher, N. H. & Rossing, T. D. (1998). The Physics of Musical Instruments. New York: Springer.
- [28] Bezugsquelle der App „Spektro:skop“: <https://itunes.apple.com/de/app/spektro-skop/id517486614> (05/2014)
- [29] Lüders, K., von Oppen, G. (2008). Bergmann · Schaefer – Lehrbuch der Experimentalphysik (Band 1). Berlin, New York: Walter de Gruyter.
- [30] Ruiz, M. J. (2014). Boomwhackers and End-Pipe Corrections. In: TPT 52, 73-75.
- [31] Greulich, W., Kilian, U. & Weber, C. (Hrsg.) (2003). Lexikon der Physik (CD-ROM). Spektrum Akademischer Verlag: Heidelberg, Stichwort: „weißes Rauschen“.
- [32] Donges, A. (2012). Die Reflexion einer Schallwelle am offenen und geschlossenen Rohrende. In: PdN-PhiS 6/61, S. 40-41.
- [33] Online-Rechner für die temperaturabhängige Schallgeschwindigkeit in Luft. Verfügbar unter:

- <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-schallgeschw.htm> (05/2014)
- [34] Erbrecht, R., König, H., Martin, K., Pfeil, W. & Wörstenfeld, W. (1999). Das große Tafelwerk. Formelsammlung für die Sekundarstufe I und II. Volk und Wissen: Berlin.
- [35] Vogt, P. (2011). Musik und Akustik. Mülheim: Verlag an der Ruhr.
- [36] Kuhn., J. & Vogt, P. (in Druck). Smartphone & Co. in Physics Education: Effects of Learning with New Media Experimental Tools in Acoustics. In: Kauertz, A., Ludwig H., Müller, A., Pretsch, J., Schnotz, W. (Hrsg.): Multiple Perspectives on Teaching and Learning.