

Experimentelle Untersuchung akustischer Resonanzen in eindimensionalen Wellenträgern mit Smartphone und Tablet-PC

Experimental investigation of acoustical resonances in one-dimensional shaft carriers with Smartphone and Tablet-PC

Michael Hirth*, Sebastian Gröber*, Jochen Kuhn* und Andreas Müller⁺

* Technische Universität Kaiserslautern, Fachbereich Physik – Didaktik der Physik

⁺ University of Geneva, Faculty of Sciences – Physics Department and Institute of Teacher Education

mhirth@physik.uni-kl.de, groeber@rhrk.uni-kl.de, kuhn@physik.uni-kl.de, andreas.mueller@unige.de

(Eingegangen: 05.08.2014; Angenommen: 26.02.2015)

Kurzfassung

In der Lehre ermöglichen Smartphones/Tablet-PCs aus messtechnischer Sicht durch interne Sensoren und durch die Verfügbarkeit geeigneter Anwendungsprogramme (Apps) vielfältige Messungen ausreichender Messgenauigkeit. Eine große Anzahl sensor- bzw. computerbasierter Messungen sind mittlerweile unter geringem Materialaufwand mit diesen mobilen Endgeräten durchführbar. Speziell in der Akustik erlauben Mikrofon, Lautsprecher und adäquate Apps Schallwellen zwischen 20 Hz und 24 kHz auszusenden, zu detektieren und akustische Größen in Echtzeit grafisch darzustellen und anschließend auszuwerten.

Aus physikdidaktischer Sicht sind Smartphones/Tablet-PCs intuitiv handhabbar und für den Lernenden jederzeit verfügbare Experimentiermittel mit hohem motivationalem Potenzial. Insbesondere erweitern diese mobilen Messlabore für Lernende die Möglichkeiten zum eigenständigen Experimentieren.

Am Beispiel akustischer Resonanzen in eindimensionalen endlichen Luftsäulen und Metallstäben werden Experimente für die Schul- und Hochschullehre vorgestellt, die mit Smartphones/Tablet-PCs und auf Verwendbarkeit geprüften Apps durchführbar sind. Darüber hinaus wird die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Luft qualitativ und quantitativ untersucht sowie in Edelstahl bestimmt. Abschließend werden die Experimente unter physikdidaktischen Gesichtspunkten eingeordnet und diskutiert.

Abstract

From a technical point of view, the wide spectrum of internal sensors in smartphones/tablet-PCs and the availability of appropriate applications (Apps) allow to perform manifold measurements with sufficient accuracy. Many traditional computer-assisted experiments can also be conducted with these mobile devices, but with less experimental effort. Especially in acoustics, loudspeaker, microphone and adequate apps enable learners to generate and detect sound between 20 Hz and 24 kHz and to display and analyze sonic quantities in real time.

From an educational point of view, smartphones/tablet-PCs are intuitive and powerful experimental tools with high motivational potential. Especially learner's opportunities for autonomous experimentation are increased.

Using the example of acoustical resonances in one-dimensional finite air columns and metal rods, we present experiments for school and university with smartphones/tablet-PCs and appropriate tested apps. In addition, we investigate the velocity of sound in air as a function of temperature qualitatively and quantitatively, and determine the velocity of sound in stainless steel. Finally, the experiments are classified and discussed under educational aspects.

1. Einleitung

Umfragen aus dem Jahr 2014 ergaben, dass mittlerweile gut ein Drittel der Jugendlichen in Deutschland einen Tablet und mehr als 80 % ein Smartphone

nutzen. Diese mobilen Geräte sind mehr und mehr zum alltäglichen Kommunikationsmedium speziell der jungen Generation geworden [1, S. 45ff.], [2]. Auch in Schulen hält der Tablet zunehmend und primär als Notebook-Ersatz Einzug, z. B. als ,Cogni-

tive Tool⁴, zu Recherchezwecken oder zur Nutzung von Anwendungssoftware [3]. Mittlerweile wird international anerkannt, dass die rasante technische Entwicklung dieser Geräte und der alltägliche Umgang damit in der Lehre intensiv genutzt werden sollte [4, S. 9-28]. Im Physikunterricht können Smartphones und Tablets als Experimentiermittel verwendet werden. Ein derartiger Einsatz ist aufgrund von fast einem Dutzend interner Sensoren auf vielfältige Art und Weise möglich. Integriert sind zum Beispiel Mikrofon und Kamera, Beschleunigungs-, Magnetfeldstärke- und Beleuchtungsstärke-sensor, Gyroskop, GPS-Empfänger und zunehmend auch Temperatur-, Druck- und Luftfeuchtesensoren. Apps erlauben die von Sensoren erfassten und zwischengespeicherten Daten auszulesen und sowohl qualitative als auch quantitative Experimente durchzuführen.

Lernende führen also nicht nur ein ihnen in der Handhabung bekanntes mobiles Endgerät, sondern auch ein leistungsfähiges mobiles Messlabor ständig mit sich. Lerntheoretischer Hintergrund des Einsatzes von Smartphones und Tablets ist die instruktionspsychologische Rahmentheorie des Situierten Lernens bzw. des kontextorientierten Lernens mit authentischen Experimentiermitteln [5]. Danach sind Lernende ersten Erkenntnissen zufolge motivierter und erreichen höhere Leistungszuwächse, wenn sie mit aus dem Alltag bekannten mobilen Endgeräten experimentieren [6].

In den letzten Jahren wurden im deutschen Sprachraum Zeitschriftenartikel und Lehrerhandreichungen zum Einsatz von Smartphones als Experimentiermittel im Physikunterricht veröffentlicht (z. B. [7]-[11]). Seit 2013 publiziert die Zeitschrift „Physik in unserer Zeit“ monatlich die Beschreibung einer App und ein dazugehöriges Smartphone/Tablet-Experiment (z. B. [12]-[14]). Die Kolumne „iPhysicsLabs“ der Zeitschrift „The Physics Teacher“ veröffentlicht seit 2012 monatlich ein neues Smartphone/Tablet-Experiment (z. B. [15]-[21]). Daraufhin wurden vielfältige und umfassende weitere Beispiele solcher Experimente auch in Zeitschriften des angloamerikanischen Sprachraums diskutiert [22]-[24].

Tabelle 1 gibt eine nach dem Erscheinungsjahr geordnete Übersicht zu überwiegend im US-amerikanischen Sprachraum erschienenen Artikeln über Experimente mit Schallwellen in eindimensionalen endlichen Wellenträgern. Artikelinhalte werden nach Eigenschaften des Versuchsaufbaus und inhaltlichen Schwerpunktsetzungen charakterisiert.

Literatur	Jahr	Versuchsaufbau					Schwerpunkt				
		Schallerzeugung [*]	Anregungssignal ⁺	Wellenträgermaterial [#]	Schalldetektion ⁼	Messmethode [~]	c-Bestimmung	c(Temperatur)	c(Material)	Endkorrektur	Resonanzspektrum
[25]	1970	1	4	7	4	1	x	-	x	-	-
[26]	1973	1	4	1	1	2	x	-	-	-	-
[27]	1974	1	4	7	4	2	x	-	x	-	-
[28]	1975	3	2	5	1/2	2	-	-	-	-	-
[29]	1980	3	3	5	4	2	-	-	-	x	x
[30]	1986	1	4	1	5a	2	x	-	-	-	-
[31]	1991	1	4	7	4	2	x	-	x	-	-
[32]	1995	1	4	5	5b	1	x	-	-	-	-
[33]	1999	3	4	5	4	1	x	x	-	-	-
[34]	2000	4	4	4	4	1	x	-	-	-	-
[35]	2001	5	5	6	5c	2	x	-	x	-	x
[36]	2002	1	4	2	3	1	x	-	-	-	-
[37]	2004	5	5	5	5c	2	x	x	-	-	x
[38]	2008	1	4	3	4	1	x	-	-	-	-
[39]	2010	3	3	5	5c	2	-	-	-	-	x
[40]	2011	1	4	5	6	2	-	-	-	x	-
[41]	2011	2	1	5	2	2	-	-	-	x	-
[42]	2012	1	4	5	6	2	x	x	-	x	-
[18]	2013	6	4	6	7b	1	x	-	x	-	-
[43]	2014	1	4	5	2	2	-	-	-	x	-
[44]	2014	6	5	5	7c	2	-	-	-	x	-
[45]	2015	1	4	5	7a	1	x	-	-	-	-
[46]	-	6	5	5	7c	2	-	-	-	x	-

Tab. 1: Literaturübersicht zu Schallwellen in eindimensionalen, endlichen Wellenträgern:

* (1) Mechanisch, (2) Stimmgabel, (3) Funktionsgenerator-Lautsprecher, (4) Funktionsgenerator-Piezoelement, (5) Computer-Lautsprecher, (6) Smartphone/Tablet/App-Lautsprecher.

+ (1) Sinuston einer Frequenz, (2) Sinuston variabler Frequenz, (3) Sinustöne mit Frequenzrampe, (4) Impuls, (5) Weißes Rauschen.

(1) Aluminium, (2) Eisen, (3) Stahl, (4) Plexiglas, (5) Luft, (6) Gase, (7) Metalle.

= (1) Hand, (2) Ohr, (3) Induktionsspule-Oszilloskop, (4) Mikrofon-Oszilloskop, (5) Mikrofon-Computer und Software (a) Frequenzmesser, (b) Oszilloskop, (c) FFT, (6) Mikrofon-Datalogger und FFT-Software, (7) Mikrofon-Smartphone/Tablet und (a) Oszilloskop-App, (b) Acoustic Ruler-App, (c) FFT-App.

~ (1) Laufzeit, (2) Resonanz.

Tabelle 1 zeigt das über fast 50 Jahre anhaltende didaktische Interesse an Resonanzen in eindimensionalen Wellenträgern. Unterschiedliche experimentelle Fragestellungen und die technische Entwicklung des Experimentiermaterials haben zu vielen Möglichkeiten der Schallerzeugung und Schalldetektion bei gleichbleibendem Versuchsaufbau aus Schallerzeuger, Wellenträger und Schalldetektor geführt. In dieser Vielfalt kann auch ein Grundzug

der technischen Geräteentwicklung zur Schalldetektion vom Ohr, über Computer und Datalogger zum Smartphone/Tablet identifiziert werden.

Seit dem Jahr 2000 liegt ein inhaltlicher Schwerpunkt auf der Endkorrektur von Röhren, während Resonanzspektren eine untergeordnete Rolle spielen. Der Beitrag fokussiert auf Experimente zur Aufnahme von Resonanzspektren mit Smartphone/Tablet und deren Deutung, Auswertung und Vergleich. Ergänzend wird ein quantitatives Experiment zur Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit beschrieben.

2. Physikalische und messtechnische Grundlagen

2.1. Resonanzen in Röhren

In einer zylindrischen, luftgefüllten Röhre der Länge L und mit dem Radius R können bei geeigneter Anregung mit einer Schallquelle stehende Wellen erzeugt werden. Die Luftsäule in der Röhre wird bei diskreten Frequenzen zu Resonanzen angeregt und es können Grundschwingungen ($k = 0$) und Oberschwingungen ($k = 1, 2, 3, \dots$) beobachtet werden. Mit der Schallgeschwindigkeit c und der Endkorrektur a sind die Resonanzfrequenzen

$$f_{k,b} = (k+1) \frac{c}{2(L+2a)} = (k+1)f_{0,b} \quad \{1\}$$

bei beidseitig (b) offener Röhre und

$$f_{k,e} = (2k+1) \frac{c}{4(L+a)} = (2k+1)f_{0,e} \quad \{2\}$$

bei einseitig (e) offener bzw. geschlossener Röhre. Die Endkorrektur a muss bei jedem offenen Rohrende berücksichtigt werden (siehe Summand $2a$ in $\{1\}$ und a in $\{2\}$), weil dort die Druckknoten außerhalb der Röhre liegen und die akustische Länge L' größer als die geometrische Länge L der Röhre ist. Die Endkorrektur a kann für die hier relevanten Frequenzen bis ca. 5 kHz als frequenzunabhängig mit

$$a = 0,61R \quad \{3\}$$

angegeben werden (vgl. [47], Abbildung 2). Im Grenzfall $R \ll L$ bzw. $a = 0$ gilt für die Grundfrequenzen und die Frequenzdifferenzen Δf_e und Δf_b zwischen den Resonanzfrequenzen aufeinanderfolgender Ordnungen:

$$f_{0,e} = \frac{1}{2} f_{0,b} \quad \Delta f_e = \Delta f_b = f_{0,b} \quad \{4\}$$

2.2. Resonanzen in Metallstäben

In einem an n Positionen

$$x_i = \frac{L}{n} \left(i - \frac{1}{2}\right) \quad i = 1, \dots, n \quad \{5\}$$

fixierten Metallstab konstanter Länge L (Abbildung 1) können bei geeigneter Anregung stehende Schallwellen mit Schwingungsknoten an den Einspannstellen erzeugt werden.

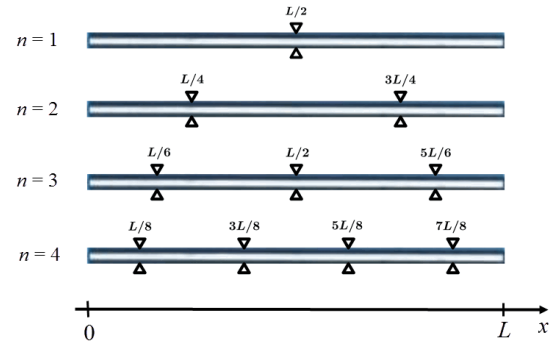


Abb. 1: Anzahl n und Positionen x_i von Fixierungen eines Metallstabs der Länge L zur Erzeugung von Resonanzfrequenzen $f_{n,k}$.

Für jedes n können die Grundschwingung ($k = 0$) und die Oberschwingungen ($k = 1, 2, 3, \dots$) bei den Resonanzfrequenzen

$$f_{n,k} = n(2k+1) \frac{c}{2L} = n(2k+1)f_{1,0} \quad \{6\}$$

angegeben werden. Bei gleicher Länge L von Metallstäben und Röhren liegen die Resonanzfrequenzen der Metallstäbe wegen der circa zehnmal so großen Schallgeschwindigkeit c in Metallen wie in Luft auch circa zehnmal höher.

2.3. Detektion und Auswertung akustischer Spektren

2.3.1. Klassische und Sonogramm-Darstellung

Akustische Spektren können als Graph in einem Schallpegel-Frequenz-Diagramm mit der Zeit als Parameter (klassische Darstellung) oder als Frequenz-Zeit-Diagramm mit farbcodiertem Schallpegel als Parameter (Sonogramm-Darstellung) dargestellt werden. Die Unterschiede zwischen beiden Darstellungen illustriert Abbildung 2 am Beispiel zweier nacheinander einsetzender Sinustöne unterschiedlicher Frequenz und mit unterschiedlichem Schallpegel:

Die Sonogramm-Darstellung hat gegenüber der klassischen Darstellung folgende Vor- und Nachteile:

- Zeitliche Veränderung von Frequenzen im Spektrum können aufgezeichnet und anschaulich dargestellt werden.
- Parameterabhängige Spektren können übersichtlich nebeneinander und gut vergleichbar dargestellt werden.
- Unerwünschte Hintergrundgeräusche sind in der Regel besser von den physikalisch relevanten Frequenzanteilen zu unterscheiden.
- Wegen der farbcodierten Schallpegeldarstellung können Schallpegelwerte wesentlich ungenauer dem Sonogramm entnommen werden.
- Die Ablesegenauigkeit von Frequenzen ist im Allgemeinen kleiner als die der klassischen Darstellung.

Der Schallpegel in Apps wird wie in der digitalen Audiotechnik üblich in dBFS (Dezibel Full Scale) angegeben. Hierbei liegt der maximale Schallpegel bei 0 dBFS. Alle kleineren Schallpegelwerte sind negativ und – wie in der dB-Skala – sinkt bei Halbierung der Schallintensität der Schallpegel jeweils um 3 dBFS.

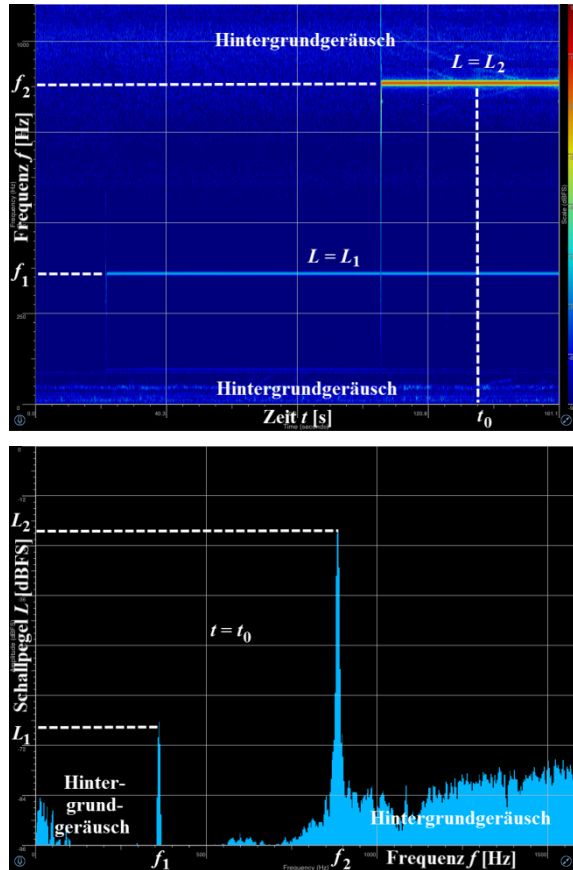


Abb. 2: Sonagramm-Darstellung zweier nacheinander einsetzender Sinustöne mit den Frequenzen $f_2 > f_1$ und den Schallpegeln $L_2 > L_1$ (oben). Klassische Darstellung zum Zeitpunkt $t = t_0$ (unten).

2.3.2. Technische Daten und Features empfohlener Apps

App-Store und Google Play Store bieten zahlreiche Apps für das Betriebssystem iOS bzw. Android an, mit denen Spektren in klassischer Darstellung oder als Sonagramm aufgezeichnet werden können. Android-Apps für akustische Spektren sind zwar oft kostengünstiger oder kostenlos, die überwiegende Mehrzahl ist jedoch für den Einsatz in der Schul- oder Hochschullehre aufgrund fehlender oder unzureichender Features wenig geeignet.

In Tabelle 2 sind für beide Betriebssysteme technische Daten und Features zweier empfohlener Apps zusammengestellt.

Beide Apps haben einen Messbereich bis in den nahen Ultraschallbereich und erzielen bei einer minimalen Abtastrate von 8 kHz und einer FFT-Größe von $2^{13} = 8192$ Bins eine Frequenzauflösung von 1 Hz. Im nahen Ultraschallbereich bis 24 kHz sinkt

wegen der nach dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem minimalen notwendigen Abtastrate (vgl. [50], S. 788) von 48 kHz die Frequenzauflösung bei der iOS-App auf 6 Hz. Kontrollmessungen mit einem hochwertigen Tonfrequenzgenerator und einem Piezo-Lautsprecher ergaben für beide Apps bei Frequenzen über 20 kHz Abweichungen zwischen eingestellter und gemessener Frequenz von 5-10 Hz. Die Messgenauigkeit ist damit besser als 0,05 %.

Die iOS-App ist eine der wenigen, die in der klassischen Darstellung eine Mittelwertbildung der Schallpegel über eine einstellbare Zeitdauer erlaubt. Eine kleinere Zeitdauer eignet sich zur Beobachtung schneller veränderlicher oder kurz andauernder Schallereignisse, eine größere Zeitdauer zur Beobachtung stationärer Spektren. Vorteilhaft bei größerer Zeitdauer ist, wie bei klassischen Messwertfassungssystemen, die Glättung der Messwerte; nachteilig ist das verzögerte Verschwinden der Spektralanteile beseitigter Störgeräusche.

Zur Erzeugung von Sinustönen oder weißem Rauschen wird die iOS-App „Signalgenerator“ [51] (0,89 €) und die Android-App „Waveform Generator“ [52] (kostenlos) empfohlen. Die Android-App bietet zusätzlich im Sweep-Modus die Möglichkeit, die Frequenz eines Sinustons zwischen zwei wählbaren Frequenzen in wählbarer Zeit linear ansteigen oder abfallen zu lassen. Daher wird im Folgenden diese App verwendet.

	SpectrumView Plus [48]	Spectrum Analyzer [49]
Betriebssystem	iOS	Android
Abtastrate	8 – 48 kHz (diskret einstellbar)	8 – 48 kHz (diskret einstellbar)
Messbereich	20 Hz – 24 kHz	20 Hz – 24 kHz
FFT-Größe	$2^8 - 2^{13}$ Bins (einstellbar)	$2^8 - 2^{15}$ Bins (Werte eingebbar)
Frequenzauflösung bei max. Abtastrate	6 Hz	1 Hz
Frequenzauflösung bei min. Abtastrate	1 Hz	1 Hz
Zeitdauer Mittelwertbildung von Schallpegeln	0,1 – 51 s (einstellbar)	Messdauer (fest)
Frequenzmessgenauigkeit	< 0,05 %	< 0,05 %
klassische Darstellung	x	x
Koordinatenlinien Frequenz	3	7
Sonagramm-Darstellung	x	–
Koordinatenlinien Frequenz	7	–
Einzoomen in Frequenzachse	x	x
Signalverstärkung	x (einschaltbar)	–
Preis	5,99 €	0,99 €*

Tab. 2: Technische Daten und Features empfohlener Spektrum-Apps zur Messung akustischer Spektren.

*Angaben bezogen auf kostenpflichtige App-Erweiterung.

2.3.3. Frequenzmessung in Resonanzspektren

Die Spektrum-Apps bieten das Feature des kontinuierlichen Einzoomens in bzw. Auszoomens aus der Frequenzachse in der klassischen FFT- und Sonagramm-Darstellung (vgl. Tabelle 2). Bei der iOS-App muss dazu für eine 1-Hz-Schrittweite der Frequenz-Koordinatenlinien die Einstellung „Use fixed frequency axis ticks“ aktiviert sein.

Da gemessene Resonanzfrequenzen endlicher eindimensionaler Wellenträger nach {1}, {2} und {6} theoretisch äquidistante Frequenzabstände haben, können die äquidistanten Frequenz-Koordinatenlinien näherungsweise durch Zoomen in Übereinstimmung mit den Resonanzbalken im Sonagramm oder den Resonanzpeaks im FFT-Diagramm gebracht werden. Abbildung 3 zeigt dies am Beispiel des obertonreichen Frequenzspektrums eines internen Smartphone-Lautsprechers (vgl. [53], S. 504) bei einer Anregungsfrequenz $f = 326$ Hz.

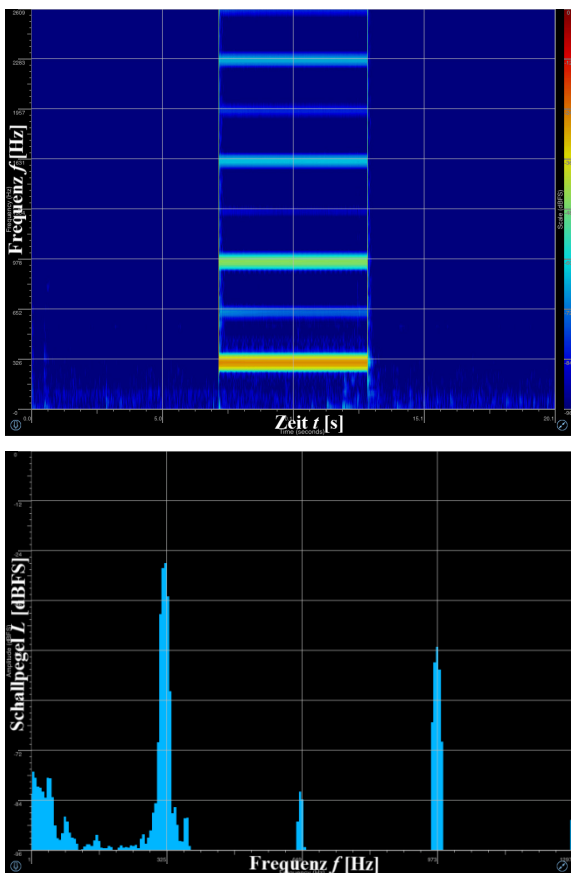


Abb. 3: Anpassung der Frequenz-Koordinatenlinien an die Resonanzbalken im Sonagramm (oben) bzw. an die Resonanzpeaks in klassischer Darstellung (unten).

Dieses Verfahren der Frequenzbestimmung entspricht dem Legen einer Ausgleichsgeraden nach Augenmaß in einem Frequenz-Ordnungs-Diagramm. Es ist umso genauer,

- je mehr Koordinatenlinien die Frequenzachse hat: Die iOS-App bietet in der Sonagramm-Darstellung mehr Linien als in der klassischen Darstellung (vgl. Tabelle 2).

- je mehr Oberschwingungen gemessen werden können: Die Anzahl darstellbarer Oberschwingungen ist durch den Messbereich begrenzt und nimmt mit abnehmender Länge L und zunehmender Schallgeschwindigkeit c nach {1}, {2} und {6} ab.
- je schärfer die Resonanzbalken bzw. Resonanzpeaks ausgeprägt sind.

Nachfolgend werden je nach Experiment und Fragestellung die Vorteile beider Spektrum-Darstellungen genutzt und dazu die iOS-App verwendet.

3. Resonanzen in Röhren

3.1. Anregung mit kontinuierlichem weißem Rauschen

Zur gleichzeitigen Anregung mehrerer Resonanzen bis ca. 5 kHz zeigt Abbildung 4 die Frequenzspektren dreier Schallquellen zur näherungsweisen Erzeugung von weißem Rauschen.

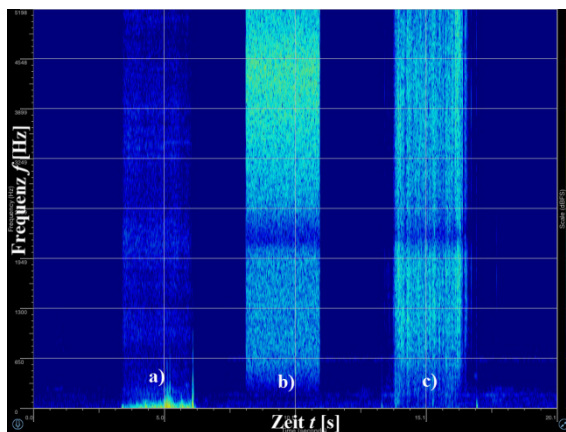


Abb. 4: Frequenzspektren von Schallquellen, die weißes Rauschen abgeben: a) Mit Lippen erzeugter turbulenter Luftstrom. b) Tongenerator-App und interner Smartphone-Lautsprecher. c) Kontinuierliches Zerkrümmen von Zeitungspapier.

Das Anpusten einer Röhre (Länge $L = 30,5$ cm, Radius $R = 1,4$ cm) in Abbildung 5 regt die Luftsäule mit weißem Rauschen nach Abbildung 4a zu Resonanzen an.

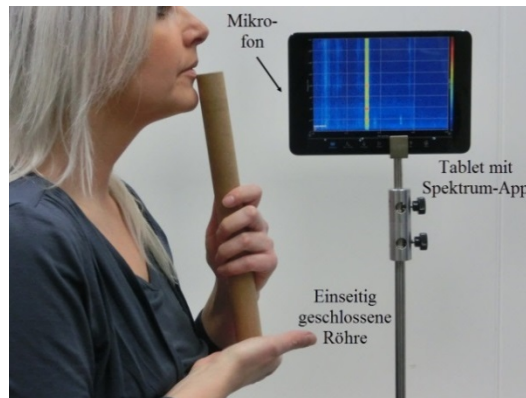


Abb. 5: Messung des Frequenzspektrums der Luftsäule einer beidseitig offenen und einseitig geschlossenen Röhre (Länge L und Radius R).

Beim Übergang von einer beidseitig offenen zu einer einseitig geschlossenen Röhre wird ein Absinken der Tonhöhe wahrgenommen, was auf ein im Sonagramm erkennbares Absinken der Grundfrequenz zurückzuführen ist (Abbildung 6).

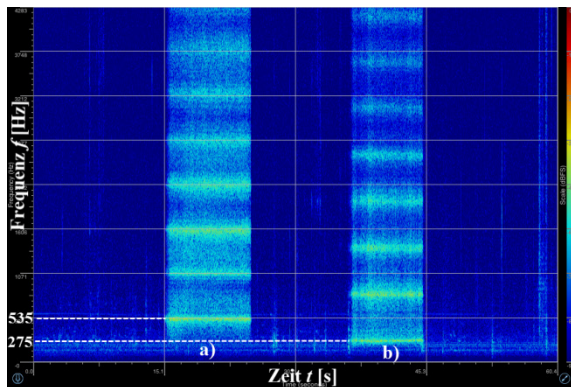


Abb. 6: Frequenzspektrum einer a) beidseitig offenen und b) einseitig geschlossenen Röhre.

Bereits ein qualitativer Sonagramm-Vergleich zeigt, dass die Frequenzabstände zwischen den Resonanzfrequenzen von beidseitig offener und einseitig geschlossener Röhre nicht gleich sind und die Endkorrektur nicht vernachlässigt werden kann (vgl. {1}-{4}). Unter der Annahme einer frequenzunabhängigen konstanten und fehlerfreien Endkorrektur, stimmen die nach {1} bzw. {2} für die Schallgeschwindigkeit $c = 343$ m/s bei Raumtemperatur $\vartheta_0 = 20$ °C berechneten und die nach dem Verfahren in 2.3.3 bis zur Ordnung $k = 6$ experimentell bestimmten Resonanzfrequenzen auf besser als 3 % überein.

3.2. Anregung mit diskreten Sinustönen

Mit dem Versuchsaufbau in Abbildung 7 wird die Wirkung einer beidseitig offenen Röhre im Schallfeld zwischen Smartphone-Lautsprecher und Tablet-Mikrofon untersucht.

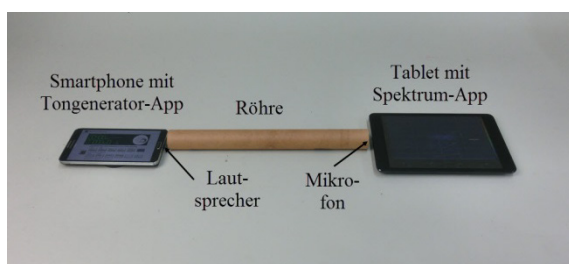


Abb. 7: Versuchsaufbau zur Wirkung einer beidseitig offenen Röhre im Schallfeld zwischen Lautsprecher und Mikrofon.

Dazu wird dem Smartphone-Lautsprecher mit der Tongenerator-App ein sinusförmiges Signal steigender Frequenz zwischen 100 Hz und 2300 Hz zugeführt und das Sonagramm ohne und mit Röhre aufgenommen (Abbildung 8).

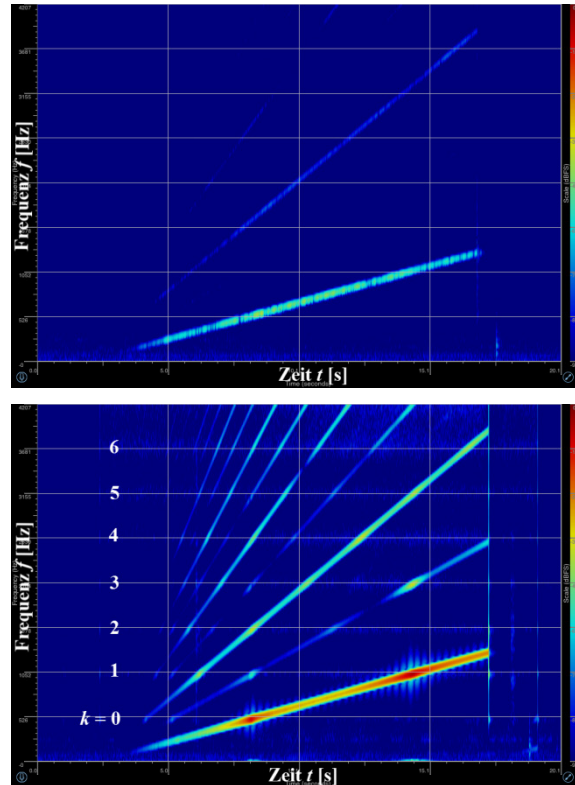


Abb. 8: Frequenzspektrum eines internen Smartphone-Lautsprechers bei Erhöhung der Frequenz von 100 Hz auf 2300 Hz (oben). Kombiniertes Frequenzspektrum von Smartphone-Lautsprecher und beidseitig offener Röhre zwischen Smartphone-Lautsprecher und Mikrofon bei gleicher Anregung und konstantem Abstand (unten).

Die Röhre bewirkt im Vergleich zur freien Schallausbreitung, dass – aufgrund der Schallreflexion an der Rohrwand und aufgrund von Resonanzen am Rohrende – am Mikrofon mindestens der gleiche Schalldruckpegel wie ohne Röhre vorliegt (irreführend als Schallverstärkung bezeichnet). Weiterhin wird durch die Lautsprecher-Resonanzen (vgl. Abbildung 3) das durchgeführte Frequenzintervall vervielfacht, und es können außer der Grundschiwingung für $k = 0$ auch höhere Schwingungsordnungen beobachtet werden.

3.3. Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Luft

In einem qualitativen Vorversuch zur Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit c von der Temperatur ϑ wird zunächst wie in Abbildung 7 das Spektrum der beidseitig offenen Röhre bei Anregung mit Rauschen und bei Raumtemperatur $\vartheta = 20$ °C in klassischer Darstellung festgehalten. Anschließend wird die Luft in der Röhre außerhalb der Messanordnung mit einem Fön erhitzt oder in einem Tiefkühlfach abgekühlt, die Röhre zügig wieder bei weiterhin eingeschalteter Schallquelle in die Messanordnung eingebracht und die Messung fortgesetzt. Bei nicht zu groß eingestellter Zeitdauer der Frequenzmitteilung (vgl. 2.3.2) wird im Spektrum zunächst eine schnelle Erhöhung (bei Erhitzung) bzw. Erniedri-

gung (bei Abkühlung) der Grundfrequenz $f_{0,b}$, und während des Temperaturausgleichs ein langsames Absinken bzw. Ansteigen der Grundfrequenz auf die ursprüngliche Grundfrequenz beobachtet (vgl. Versuchs-Video [54]). Da die Röhregeometrie unverändert bleibt, muss nach {1} die Schallgeschwindigkeit wegen

$$c(\vartheta) = 2f_{0,b}(\vartheta) \cdot (L + 1,22R) \quad \{7\}$$

mit zunehmender Temperatur steigen.

Zur quantitativen Messung bei experimentell kontrollierbarer und messbarer Temperatur wird die Röhre zunächst in einen Kühlschrank (Tiefkühlfach oder unteres Kühlfach) oder in einen mit einem Fön auf unterschiedliche Temperaturen heizbaren Karton gelegt (Abbildung 9). Da der kleine Messraum des Tiefkühlfachs zu einem hohen systematischen Fehler in der Grundfrequenz führt (vgl. [42], S. 352), wurde für diese Messung eine auf die Länge $L = 15$ cm gekürzte Röhre verwendet (Abbildung 9, oben).

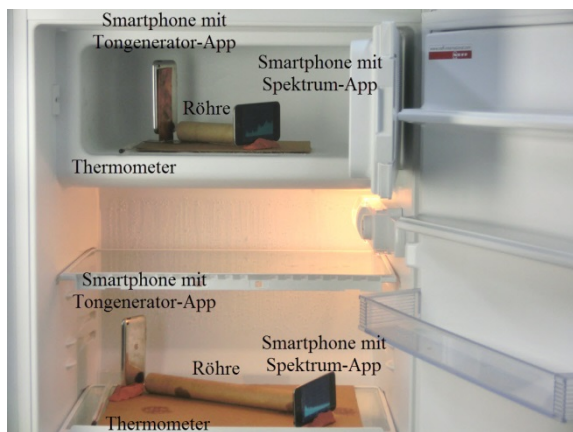


Abb. 9: Versuchsaufbauten zur Messung der Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Luft unter Verwendung eines Kühlschranks (oben) und eines heizbaren Kartons (unten).

Nach ca. 5 min für den Temperaturausgleich werden zur Messung der Grundfrequenzen ein Smartphone mit eingeschaltetem Tongenerator (weißes Rauschen) und ein Smartphone mit eingeschalteter iOS-App (klassische Darstellung) an den Rohröffnungen platziert und der Messraum verschlossen. Ohne Kälte- oder Hitzeschäden an den Smartphones zu

riskieren, werden nach ca. 2 min die Spektren festgehalten und die Grundfrequenzen ermittelt. Wegen zusätzlicher Resonanzen der Messräume können die Grundfrequenzen nur aus Oberschwingungen bis zur Ordnung $k = 2$ ermittelt werden.

Für das Temperaturintervall $[+5 \text{ }^\circ\text{C}, +55 \text{ }^\circ\text{C}]$ liegen die Grundfrequenzen bei $L = 30,5$ cm zwischen ca. 510 Hz und ca. 550 Hz. Für die Temperatur $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ wird bei der verkürzten Röhre ($L = 15$ cm) eine Grundfrequenz von ca. 940 Hz gemessen. Abbildung 10 vergleicht die nach {7} experimentell ermittelten Schallgeschwindigkeitswerte mit der nach

$$c(\vartheta) \approx 331,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 0,6 \frac{\vartheta}{^\circ\text{C}} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \{8\}$$

(z. B. [55], S. 492) theoretisch zu erwartenden Temperaturabhängigkeit.

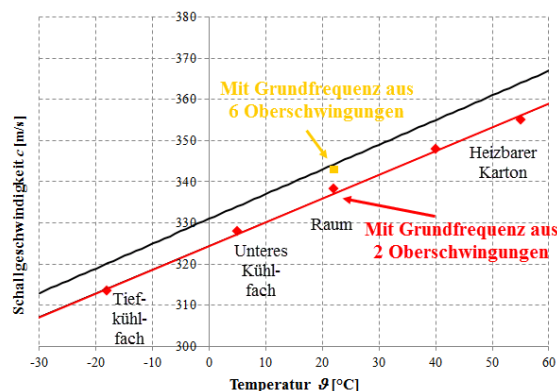


Abb. 10: Vergleich von experimentell gemessener (rote Messpunkte mit Ausgleichsgerade) und theoretisch berechneter Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit c in Luft von der Temperatur ϑ (schwarze Gerade).

Eine lineare Regression ergibt eine mit {8} gut übereinstimmende Steigung der Ausgleichsgeraden von $0,57 \text{ m/(s } ^\circ\text{C)}$. Bei Verwendung von nur zwei anstatt von sechs Oberschwingungen werden die Grundfrequenzen um ca. 10 Hz und damit die Schallgeschwindigkeit um ca. 5 m/s zu klein bestimmt. Erste Hypothesen zur Verletzung der Voraussetzungen zur Anwendung von {7} – der Abstand der Röhre zur Unterlage ist zu gering und der Smartphone-Lautsprecher erzeugt keine ebene Schallwelle – konnten experimentell nicht bestätigt werden. Für die gewählte Rohrgeometrie sind Absorptions-, Dispersions- und Dämpfungseffekte vernachlässigbar (vgl. [53], S. 180). Die Abweichung gemessener von harmonischen Resonanzfrequenzen ist auf die Frequenzabhängigkeit des Reflexionsfaktors zurückzuführen (vgl. [53], S. 180-187).

Der relative statistische Größtfehler der Schallgeschwindigkeitsbestimmung kann nach {1} und den Gesetzen der Fehlerfortpflanzung abgeschätzt werden. Mit $\Delta f_{0,b}/f_{0,b} = 0,03$ (vgl. 3.1), $L = 30,5$ cm, $\Delta L = 0,1$ cm, $R = 1,4$ cm und $\Delta R = 0,1$ cm ist

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\Delta f_{0,b}}{f_{0,b}} + \frac{\Delta L + 1,22\Delta R}{L + 1,22R}$$

$$= 0,030 + 0,007 = 0,037 \hat{=} 3,7 \% \quad \{9\}$$

Der systematische relative Fehler einer Schallgeschwindigkeitsbestimmung aufgrund einer nicht durchgeführten Endkorrektur ist

$$\frac{\Delta c}{c} = -\frac{1,22\frac{R}{L}}{1 + 1,22\frac{R}{L}} \quad \{10\}$$

Dieser Fehler wächst mit zunehmendem Verhältnis R/L und die Schallgeschwindigkeit wird stets zu klein bestimmt. Für die Röhre mit $R/L = 0,014/0,305 = 0,046$ läge dieser systematische Fehler bei 5 % und damit über dem zuvor berechneten statistischen Gesamtfehler. Ohne die Durchführung einer Endkorrektur, sollten möglichst dünne und lange Röhren verwendet werden.

4. Resonanzen in Metallstäben

4.1. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Stativstangen

Stativstangen aus Edelstahl der Längen $L = 0,10$ m, $0,15$ m, $0,30$ m, $0,60$ m, $0,75$ m, $1,00$ m und $1,50$ m werden mittig fixiert und durch Reiben mit den Händen zum Schwingen angeregt (Abbildung 11).

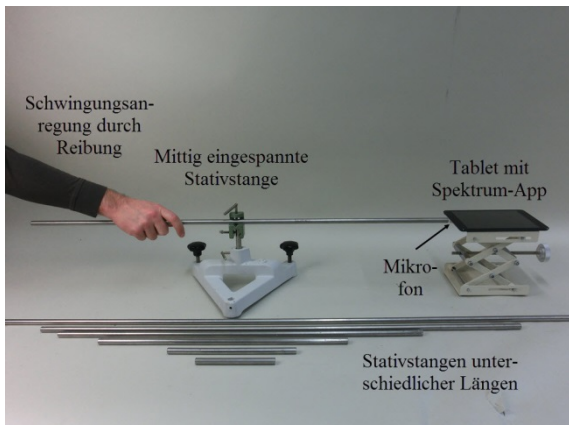


Abb. 11: Versuchsaufbau zur Messung der Resonanzfrequenzen mittig fixierter Stativstangen variabler Länge L .

Im Frequenzspektrum (Abbildung 12) können nur für $L > 0,30$ m Oberschwingungen mit ungeradzahligem Vielfachen der Grundfrequenz unterhalb der Grenzfrequenz der iOS-App gemessen werden. Besonders bei längeren Stäben treten zusätzliche, nach {6} nicht erklärbare Resonanzfrequenzen geringerer Intensität auf (Pfeile in Abbildung 12). Diese sind darauf zurückzuführen, dass sich in Festkörpern sowohl Longitudinal- als auch Transversalwellen ausbreiten können und es bei begrenzten Festkörpern im Allgemeinen zu einer Überlagerung beider Wellenformen kommt (vgl. [53], S. 115). Vermutlich werden auch durch das Reiben der Stäbe erzeugte Oberflächenwellen an Unebenheiten der Staboberfläche in Volumenwellen umgewandelt (vgl. [53], S. 119).

Die Schallgeschwindigkeit c kann für $k = 0$ nach

$$f_{1,0} = \frac{c}{2} L^{-1} \quad \{11\}$$

(vgl. {6}) durch Auftragen der Grundfrequenz $f_{1,0}$ über der reziproken Länge L^{-1} ermittelt werden (Abbildung 13).

Die Steigung $c/2$ der Regressionsgeraden ergibt eine Schallgeschwindigkeit von $c = 4960$ m/s in den Stativstangen. Diese liegt um ca. 10 % unterhalb der von der Zusammensetzung des Edelstahls abhängigen Vergleichswerte von ca. 5700 m/s [55]. Nach Herstellerangabe liegt die Schallgeschwindigkeit der Stativstangen bei 5100 m/s [56].

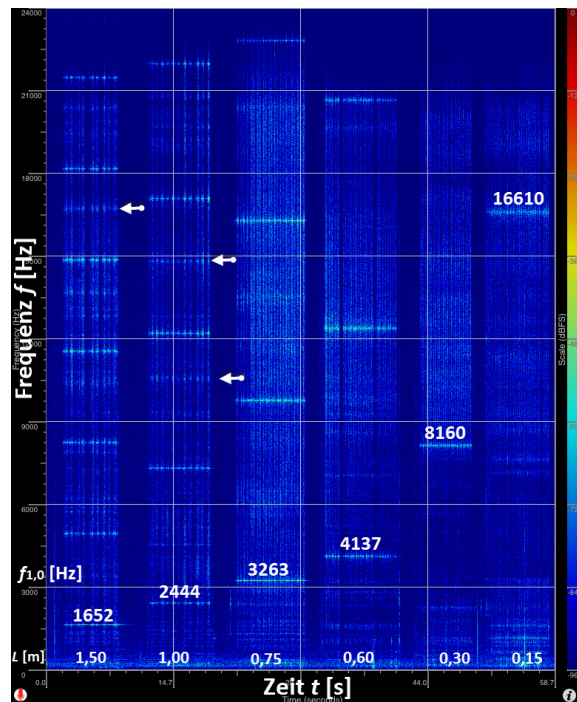


Abb. 12: Grundfrequenzen $f_{1,0}$ in den Frequenzspektren mittig fixierter Stativstangen verschiedener Längen L . Pfeile: Nach {6} nicht erklärbare Resonanzfrequenzen.

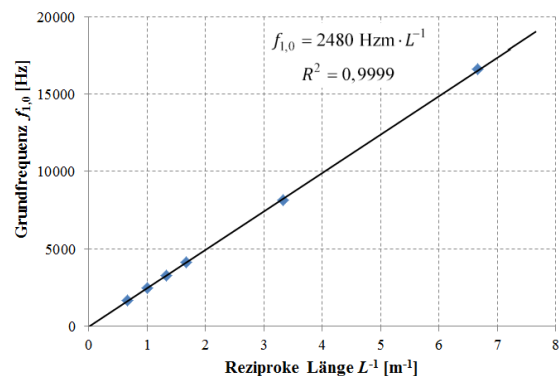


Abb. 13: Proportionalität von Grundfrequenz $f_{1,0}$ und reziproker Länge L^{-1} der Stativstangen.

4.2. Resonanzfrequenzen fixierter Stativstangen gleicher Länge

Im Versuchsaufbau nach Abbildung 14 wird ein Stativstab der Länge $L = 1$ m an $n = 1, 2, 3, 4$ Stellen

mit Kreuzmuffen fixiert (vgl. Abbildung 1) und durch Reiben mit den Händen zum Schwingen ange-regt.

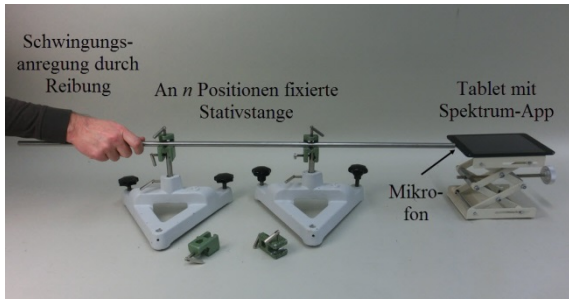


Abb. 14: Messung der Resonanzfrequenzen von an $n \leq 4$ Positionen fixierten Stativstangen der Länge L .

Abbildung 15 zeigt die Frequenzspektren mit der Anzahl n der Fixierungen als Parameter.

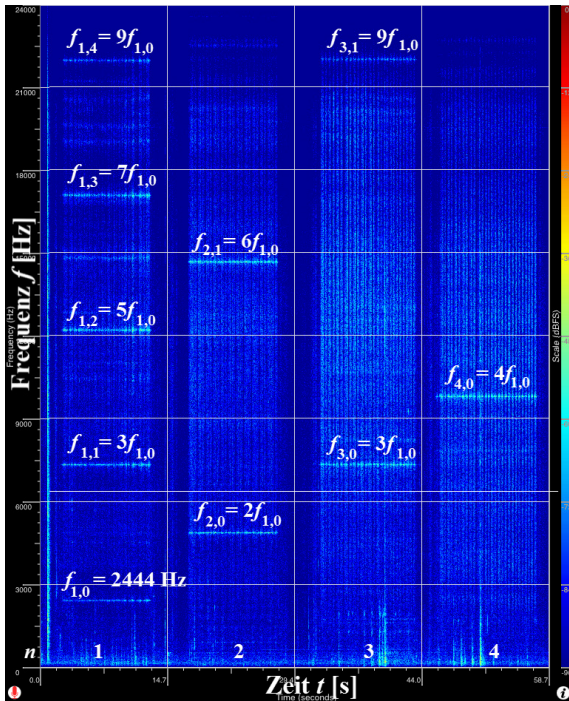


Abb. 15: Resonanzfrequenzen $f_{n,k}$ in Frequenzspektren einer Stativstange der Länge L abhängig von der Anzahl n der Fixierungen.

Die nach dem Verfahren unter 2.3.3 im Sonogramm gemessenen Resonanzfrequenzen $f_{n,k}$ stimmen mit denen für $c = 4960$ m/s nach {11} berechneten Resonanzfrequenzen auf besser als 2 % überein. Die Frequenzformel {6} kann aus Abbildung 15 als induktiv gewonnenes Ergebnis entnommen werden. Für die Grundfrequenzen $f_{n,0}$ ist

$$f_{n,0} = nf_{1,0} \quad \{12\}$$

und für die Frequenzabstände Δf_n zwischen den Resonanzfrequenzen ist

$$\Delta f_n = 2nf_{1,0} \quad \{13\}$$

Damit ist

$$f_{n,k} = nf_{1,0} + k2nf_{1,0} = n(2k+1)f_{1,0} \quad \{14\}$$

4.3. Quantitative Freihandexperimente

Ein Alltagsgegenstand wie ein Nagel der Länge $L = 15,7$ cm kann als Wellenträger verwendet werden (Abbildung 16, oben). Der Nagel wird zur besseren Schallabstrahlung mit dem Kopf vor das Mikrofon platziert, mittig mit Daumen und Zeigefinger fixiert und durch wiederholtes Anschneiden mit dem Fingernagel zu Schwingungen angeregt.

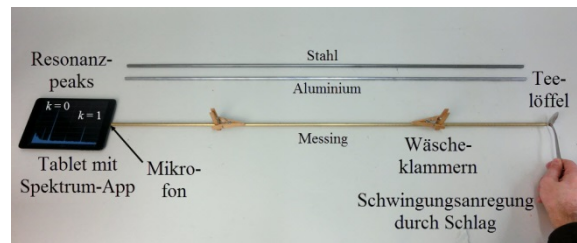
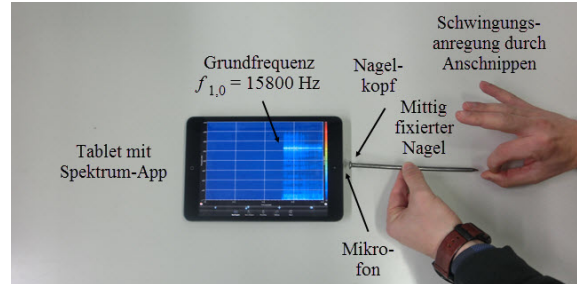


Abb. 16: Messung des Frequenzspektrums eines mittig fixierten Nagels in der Sonogramm-Darstellung (oben) und Messung des Frequenzspektrums von Rundstäben aus Metall in der klassischen Darstellung (unten).

Im Frequenzspektrum wird aufgrund der zu geringen Nagellänge nur die Grundfrequenz $f_{1,0} = 15800$ Hz gemessen, die mit der nach {6} und $c = 4960$ m/s aus 4.2 berechneten Grundfrequenz $f_{1,0} = 15796$ Hz sehr gut übereinstimmt.

Zur Durchführung der Experimente in 4.1 und 4.2 und zur Untersuchung der Materialabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit eignen sich auch als Meterware erhältliche Aluminium-, Stahl- und Messing-rundstäbe mit einem kleineren Durchmesser (8-10 mm) als derjenige der Stativstangen. Holzwäscheklammern dienen als Auflage und erzeugen eine ausreichend große Kraft zur Erzeugung von Schwingungsknoten (Abbildung 16, unten). Ein kurzer Schlag mit einem Teelöffel an eine Stirnfläche der Rundstäbe führt diesen so viel mechanische Energie zu, dass über das langsamere Abklingen von Schwingungen der Longitudinalwellen (vgl. [31]) die Resonanzfrequenzen in der klassischen Darstellung bestimmt werden können.

5. Didaktische Aspekte der experimentellen Untersuchung akustischer Resonanzen mit Smartphone/Tablet

5.1. Experimente und Lehr-Lerninhalte

Generell zeigen die Experimente, dass in endlichen, näherungsweise eindimensionalen Wellenträgern bei passender Anregung Resonanzen erzeugt werden. Die Abhängigkeit der Resonanzfrequenzen von Geometrie, Material und Randbedingungen des Wellenträgers wird untersucht. Nach der Resonanzmethode wird die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Luft gemessen sowie die Schallgeschwindigkeit in Edelstahl bestimmt.

Die Lernenden können diskrete und kontinuierliche Spektren technischer Schallquellen, wie z. B. des internen Smartphone-Lautsprechers, und „natürlicher“ Schallquellen, wie z. B. eines turbulenten Luftstroms und beim Zerknüllen von Zeitungspapier, kennen lernen (vgl. Abbildung 3 und 4).

Bei Verwendung von weißem Rauschen wird gezeigt, dass im Wellenträger zeitgleich und unabhängig voneinander stehende Wellen unterschiedlicher Frequenz bzw. Wellenlänge existieren können (vgl. Abbildung 6, 12 und 15).

Beim Durchfahren von Tonfrequenzen kann überzeugend das Filter- bzw. Resonanzverhalten eindimensionaler endlicher Wellenträger gezeigt werden (vgl. Abbildung 8).

5.2. Zielgruppen und Lehr-Lerneinsatz

Die vorgestellten Experimente eignen sich aus folgenden Gründen als Demonstrationsexperimente im Physikunterricht, besonders zum eigenständigeren Experimentieren der Lernenden im Schülerversuch und speziell als Hausexperiment oder als Praktikumsversuch an der Hochschule:

- Verwendung einfacher, alltäglicher oder leicht zugänglicher Experimentiermaterialien (Papprollen, Stativmaterial, Nägel, Rundstabmaterial, Fön, Kühlschrank) in einfachen, strukturell gleichen Versuchsaufbauten.
- Verwendung von Smartphone/Tablet als authentisches Experimentiermittel (vgl. 1).
- Geringe Zeitdauer zur Durchführung der Experimente. Rauschquellen erlauben die zeitsparende Aufnahme parameterabhängiger Resonanzspektren. Resonanzfrequenzen können den Resonanzspektren schnell und genau mit dem in 2.3.3 beschriebenen Verfahren entnommen werden.
- Visuelle Vergleiche von Spektren bei gleichem (vgl. 3 und 4) oder unterschiedlichem Wellenträger sind kognitiv anregend, erlauben die Herstellung von Verbindungen zwischen Phänomen und dessen mathematischer Beschreibung (vgl. 4.2) und fördern so den Aufbau von Wissensstrukturen.

Im Folgenden werden didaktische Hinweise zu Lehr-Lerneinsätzen der Experimente in Schule und Hochschule gegeben.

5.2.1. Demonstrations- und Schülerexperimente im Physikunterricht

Aus zeitlichen Gründen und wegen des leichter herzustellenden Anwendungsbezuges zu Musikinstrumenten wird der Fokus im Physikunterricht auf Resonanzen von Röhren liegen. Je nach Unterrichtszielen kann die Röhrengometrie so gewählt werden, dass die Endkorrektur zur didaktischen Reduktion vernachlässigbar oder zur Diskussion physikalischer Modelle nicht vernachlässigbar ist (vgl. {10}).

Die vorgestellten Experimente messen nur die Zeitabhängigkeit bzw. Frequenz der Schwingung und die Schwingungsamplitude bzw. den Schallpegel an den Stellen $x = 0$ oder $x = L$ des Wellenträgers. Zur Vervollständigung der physikalischen Beschreibung stehender akustischer Wellen sollten auch Experimente mit der Kundt'schen Röhre zur Ortsabhängigkeit der Schwingungen durchgeführt werden.

Das Experiment in 2.3.3 eignet sich in der Variante mit Funktionsgenerator und Lautsprecher als Einstieg ins Thema „Akustische Resonanzen“ und zur Einführung der Aufnahme und Auswertung von Frequenzspektren: Überraschend für Schüler sendet ein Lautsprecher nicht nur Schallwellen mit der eingestellten Frequenz des Funktionsgenerators aus, sondern auch Schallwellen mit Vielfachen dieser Frequenz (vgl. Abbildung 3). Eine Überprüfung des Spektrums der Eingangsspannung mit einem computerbasierten Messwerterfassungssystem identifiziert den Lautsprecher als Ursache. Die Ursache der harmonischen Obertöne liegt in sogenannten nichtlinearen Verzerrungen, die bei Verstärkerschaltungen auftreten. Die Lehrkraft wird auf solche Sachverhalte im Regelunterricht nicht eingehen können und eine qualitative Erklärung der Resonanzfrequenzen z.B. durch die Anregung von Partialschwingungen der Lautsprechermembran geben müssen.

Mit gesammelten Papprollen und kostengünstigen Android-Apps können die Experimente in 3.1, 3.2 und 3.3 mit klassischer FFT-Darstellung leicht als Schülerexperimente und speziell als Hausexperiment durchgeführt werden. Für die beidseitig offene Röhre ist wegen der geräuschärmeren und einfacheren Durchführung das Zerknüllen von Zeitungspapier als Rauschquelle geeigneter (vgl. Abbildung 4c und [57]). Zur vereinfachten Messung der Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Luft unter Verwendung eines Kühlschranks reichen bereits drei Messwertpaare aus.

Eine alternative Aufgabe zum deduktiven Ableiten der Resonanzfrequenzen $\{1\}$ und $\{2\}$ könnte darin bestehen, wie in 4.2 für Resonanzen in Metallstäben gezeigt, eine Formel für Resonanzfrequenzen durch induktives Aufstellen von Funktionsvorschriften für Folgen anzugeben.

5.2.2. Grundpraktikumsversuch an der Hochschule

Das in 5.2.1 beschriebene Schülerexperiment kann auch als Grundpraktikumsversuch für Nebenfachstudierende an der Hochschule eingesetzt werden. Motivierend für diese Zielgruppe könnten der gegenüber traditionellen Versuchen nicht so starr vorgegebene Versuchsaufbau und die Verwendung von Smartphone/Tablet sein.

Ein Grundpraktikumsversuch für Physiker und Physiklehrkräfte sollte durch eine vergleichende Betrachtung der Resonanzfrequenzen von Röhren und Metallstäben umfangreicher sein. Er sollte auch in Inhalten bzw. Methoden der Physik anspruchsvoller sein, indem Voraussetzungen, Grenzen und Erweiterungen physikalischer Modelle sowie Abweichungen zwischen Theorie und Experiment thematisiert werden:

- Erkennen von Abweichungen zwischen ohne Endkorrektur berechneten und gemessenen Resonanzfrequenzen von Röhren. Durchführung einer auf die Endkorrekturformel $\{3\}$ führenden experimentellen Untersuchung (vgl. [43]).
- Erklärung unerwarteter Resonanzfrequenzen der Metallstäbe durch Erweiterung der Vorstellung von Wellenformen in Festkörpern.
- Unterscheidung zwischen Beobachtungen bzw. Messungen, die auf das zu untersuchende Phänomen (Resonanzen in eindimensionalen Wellenträgern) und auf Eigenschaften des Versuchsaufbaus (Art der Schallquelle, messtechnische Eigenschaften der Spektrum-Apps) zurückzuführen sind.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Zentrum des Beitrags steht die Beschreibung mehrerer mit Smartphone/Tablet als Experimentiermittel durchführbarer Experimente zur Untersuchung von Resonanzen in eindimensionalen, endlichen Wellenträgern. Features notwendiger und empfindlicher Spektrum-Apps, die besondere Darstellung von Spektren als Sonagramm sowie potentielle Lehr-Lerneinsätze der Experimente werden beschrieben:

- Die Auswertungen zeigen, dass heutige Smartphones/Tablets und Apps als Schallerzeuger und Schalldetektor in der Schulphysik eine zu Funktionsgeneratoren und computerbasiertem Messen vergleichbare Qualität erreichen können.
- Sonagramme haben gegenüber der klassischen Darstellung aufgrund der kontinuierlichen Speicherung zeitabhängiger Spektren den Vorteil Informationen übersichtiger und vergleichend visuell darzustellen. Nachteilig ist in der Regel die geringere Genauigkeit der Entnahme einzelner Frequenzwerte aus den Spektren. Speziell für harmonische Resonanzfrequenzen ist dieser Fehler minimierbar.

- Von der Kombination aus Smartphone/Tablet und einfachen Experimentiermaterialien in einfachen Versuchsaufbauten profitieren alle Lehr-Lerneinsätze von Experimenten in Schule und Hochschule.

Zum einen bereiten die vorgestellten Experimente auf Resonanzen von Mikrowellen (Hohlleiter, Lecherleitung, Mikrowellenherd) in der Elektrodynamik vor. Zum anderen sind spektrale Darstellungen von Größen in der gesamten Physik von Bedeutung (z. B. Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung, Röntgenspektren, Spektren radioaktiver Nuklide). Diese, über die Akustik hinausgehende inhaltliche Bedeutung, wird derzeit nicht in Schule und Hochschule abgebildet: Sekundarstufe-II-Lehrpläne der Bundesländer nennen die Akustik nicht als obligatorischen Lehrinhalt. Es bleibt der einzelnen Lehrkraft überlassen, unter den gegebenen Randbedingungen (Zeitdruck, Zentralabitur) z. B. beim Thema „Mechanische Wellen“ auch Schallwellen zu behandeln. In der Hochschullehre bleibt die Akustik meist auf ein oder zwei Versuche des Grundpraktikums beschränkt.

Die vorgestellten Experimente eignen sich wegen der Durchführbarkeit mit wenigen, einfachen Experimentiermaterialien (vgl. 3 und 4.3) auch als Hausexperimente. In der Schule können damit Lehrkräfte einzelne interessierte oder hochbegabte Schüler gezielt individuell fördern. Insbesondere das eigene und im Alltag allgegenwärtige Experimentiermittel Smartphone/Tablet fungiert hierbei als Brücke von formellem Lernen im Physikunterricht zu einem mehr informellen Lernen außerhalb des Physikunterrichts (vgl. [4], S. 21). Ein Erfolgsindiz dieses Lernansatzes wäre z. B., wenn Schüler eigenständig Spektren weiterer Schallquellen oder die Resonanzfrequenzen weiterer Materialien untersuchen. Strengere Definitionen des informellen Lernens sehen dessen Auslöser mehr in der Umwelt des Lernenden als in formellen Lehr-Lernangeboten (vgl. [58], S. 18-27).

7. Literatur

- [1] Feierabend, Sabine; Plankenhorn, Theresa; Rathgeb, Thomas (2014): *JIM 2014 Jugend, Information und (Multi-)Media – Basisstudie zum Medienumgang 12- bis 19-Jähriger in Deutschland*. Stuttgart: Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest. Online: http://www.mpfs.de/fileadmin/JIM-pdf/14/JIM-Studie_2014.pdf [Stand: 1/2015].
- [2] BITKOM: *Pressestatement im Rahmen der Pressekonferenz „Kinder und Jugend 3.0“*. Online: http://www.bitkom.org/files/documents/BITKOM_Vortrag_Kempf_PK_Kinder_und_Jugendliche_3.0_-_28_04_2014.pdf [Stand: 1/2015].
- [3] O'Bannon, Blanche W.; Thomas, Kevin (2014): *Teacher perceptions of using mobile phones in*

- the classroom – Age matters!* Computers and Education 74, 15-25.
- [4] West, Mark; Vosloo, Steven (2013): *UNESCO policy guidelines for mobile learning*. Paris: UNESCO Publications. Online: <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002196/219641E.pdf> [Stand: 1/2015].
- [5] Kuhn, Jochen; Müller, Andreas; Müller, Wie-gand; Vogt, Patrik (2010): *Kontextorientierter Physikunterricht – Konzeptionen, Theorien und Forschung zu Motivation und Lernen*. Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 59 (5), 13-24.
- [6] Kuhn, Jochen; Vogt, Patrik (2015): *Smartphone & Co. in physics education – Effects of learning with new media experimental tools in acoustics*. In: Kauertz, Alexander; Ludwig, Heidrun; Müller, Andreas; Pretsch, Johanna; Schnotz, Wolfgang (Hrsg.): *Multiple Perspectives on Teaching and Learning* (angenommen).
- [7] Hirth, Michael; Klein, Pascal; Kuhn, Jochen (2013): *Experimente mit Smartphone & Co. im Physikunterricht*. MINT Zirkel 2 (5/6), 10-11.
- [8] Kuhn, Jochen; Vogt, Patrik; Müller, Sebastian (2011): *Handys und Smartphones – Einsatzmöglichkeiten und Beispielerperimente im Physikunterricht*. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 60 (7), 5-11.
- [9] Vogt, Patrik; Kuhn, Jochen; Gareis, Simon (2011): *Beschleunigungssensoren von Smartphones – Möglichkeiten und Beispielerperimente zum Einsatz im Physikunterricht*. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 60 (7), 15-22.
- [10] Kuhn, Jochen (2014): *Smartphone-Physik – Ein Überblick über Experimente mit Smartphone und Tablet-PC im Physikunterricht*. In: L.A. Multimedia 1, 17-21.
- [11] Vogt, Patrik; Kuhn, Jochen; Wild, Markus (2012): *Experimente mit Smartphones – Grundlegende Mechanik*. In: RAAbits Physik Sek I/II. Stuttgart: Dr. Josef Raabe Verlag.
- [12] Bernshausen, Henrik; Kuhn, Jochen; Wilhelm, Thomas; Lück, Stephan (2013): *Astronomie mit SkEye*. In: Physik in unserer Zeit 44 (4), 201-202.
- [13] Kuhn, Jochen; Wilhelm, Thomas; Lück, Stephan (2013): *Physik mit Smartphones und Tablet-PCs*. In: Physik in unserer Zeit 44 (1), 44-45.
- [14] Hirth, Michael; Kuhn, Jochen; Wilhelm, Thomas; Lück, Stephan (2014): *Smarte Physik – Die App Oszilloskop analysiert Schall oder elektrische Signale*. In: Physik in unserer Zeit 45 (3), 150-151.
- [15] Kuhn, Jochen; Vogt, Patrik (2013): *Analyzing acoustic phenomena with a smartphone microphone*. In: The Physics Teacher 51 (3), 118-119.
- [16] Kuhn, Jochen; Vogt, Patrik (2012): *Diffraction experiments with infrared remote controls*. In: The Physics Teacher 50 (2), 118-119.
- [17] Vogt, Patrik; Kuhn, Jochen (2012): *Analyzing free fall with a smartphone acceleration sensor*. In: The Physics Teacher 50 (3), 182-183.
- [18] Parolin, Sara Orsola; Pezzi, Giovanni (2013): *Smartphone-aided measurements of the speed of sound in different gaseous mixtures*. In: The Physics Teacher 51 (11), 508-509.
- [19] Kuhn, Jochen; Vogt, Patrik; Müller, Andreas (2014): *Analyzing elevator oscillation with the smartphone acceleration sensors*. In: The Physics Teacher 52 (1), 55-56.
- [20] Kuhn, Jochen; Vogt, Patrik; Hirth, Michael (2014): *Analyzing the acoustic beat with mobile devices*. In: The Physics Teacher 52 (4), 248-249.
- [21] Kuhn, Jochen; Vogt, Patrik (2012): *Analyzing spring pendulum phenomena with a smartphone acceleration sensor*. In: The Physics Teacher 50 (11), 504-505.
- [22] Kuhn, Jochen; Vogt, Patrik (2013): *Smartphones as experimental tools: Different methods to determine the gravitational acceleration in classroom physics by using everyday devices*. In: European Journal of Physics Education 4 (1), 16-27.
- [23] Vogt, Patrik; Kuhn, Jochen; Müller, Sebastian (2011): *Experiments using cell phones in physics classroom education: The computer aided g-determination*. In: The Physics Teacher 49 (6), 383-384.
- [24] Kuhn, Jochen (2014): *Relevant information about using a mobile phone acceleration sensor in physics experiments*. In: American Journal of Physics 82 (2), 94.
- [25] Ames, Oakes (1970): *A direct measurement of the speed of sound in rods*. In: American Journal of Physics 38 (9), 1151-1152.
- [26] Nicklin, R. C. (1973): *Measuring the velocity of sound in a metal rod*. In: American Journal of Physics 41 (5), 734-735.
- [27] Mamola, Karl C. (1974): *Measurement of sound velocities in metal wires*. In: American Journal of Physics 42 (12), 1117-1118.
- [28] Veit, J. J. (1975): *Resonating golf tube*. In: The Physics Teacher 13 (5), 308.
- [29] Jewett, J. W. (1980): *Air column resonance spectra using basic laboratory equipment*. In: American Journal of Physics 48 (1), 24-27.
- [30] Hart, Gerald P. (1986): *Measurement of the speed of sound in metal rods using the micro-computer*. In: The Physics Teacher 24 (2), 89.

- [31] Frank, Michael T.; Kluk, Edward (1991): *Velocity of sound in solids*. In: The Physics Teacher 29 (4), 246-251.
- [32] Raymer, M. G.; Micklavzina, Stan (1995): *Demonstrating sound impulses in pipes*. In: The Physics Teacher 33 (3), 183-185.
- [33] Worland, Rand S.; Wilson, D. David (1999): *The speed of sound in air as a function of temperature*. In: The Physics Teacher 37 (1), 53-57.
- [34] Key, Toni; Smidrovskis, Robert; From, Milton (2000): *Measuring the speed of sound in a solid*. In: The Physics Teacher 28 (2), 76-77.
- [35] Martin, Brian E. (2001): *Measuring the speed of sound – Variation on a familiar theme*. In: The Physics Teacher 39 (2), 424-426.
- [36] Potter, David (2002): *The speed of sound in an iron rod*. In: The Physics Teacher 40 (1), 56-57.
- [37] Velasco, Santiago; Román, F. Lorenzo; González, Antonio; White, Juan Antonio (2004): *A computer-assisted experiment for the measurement of the temperature dependence of the speed of sound in air*. In: American Journal of Physics 72 (2), 276-279.
- [38] Huggins, Elisha (2008): *Speed of sound in metal pipes – An inexpensive lab*. In: The Physics Teacher 46 (1), 13-14.
- [39] Kraftmakher, Yaakov (2010): *Standing sound waves in air with DataStudio*. In: The Physics Teacher 48 (2), 122-123.
- [40] Bacon, Michael E.; Toroc, Steven (2011): *An experimental investigation of the end effects for Blue Man Group® Pipes*. In: The Physics Teacher 49 (3), 152-154.
- [41] LoPresto, Michael C. (2011): *Experimenting with end-correction and the speed of sound*. In: Physics Education 46 (4), 437-439.
- [42] Bacon, Michael E. (2012): *Speed of sound versus temperature using PVC pipes open at both ends*. In: The Physics Teacher 50 (6), 351-353.
- [43] Ruiz, Michael (2014): *Boomwhackers and end-pipe corrections*. In: The Physics Teacher 52 (2), 73-75.
- [44] Vogt, Patrik; Kasper, Lutz; Müller, Andreas (2014): *Smartphone Physics – Neue Experimente und Fragestellungen rund um das Messwerterfassungssystem Smartphone*. In: Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, Beitrag DD 08.03. Online: <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/download/546/693.pdf> [Stand 1/2015].
- [45] Kaspar, Lutz; Vogt, Patrik; Strohmeyer, Christine (2015): *Stationary waves in tubes and the speed of sound*. In: The Physics Teacher 53 (1), 52-53.
- [46] Vogt, Patrik; Kasper, Lutz; Fahsl, Christoph; Herm, Markus; Quarthal, Dominik: *Physics²Go! Die Physik des Alltags mit Tablet und Smartphone erkunden*. In: Bresges, Andre; Mähler, Laura; Pallack, Andreas (Hrsg.): *Themenspezial MINT*. MNU Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts e. V. Neuss: Verlag Klaus Seeberger (in Druck).
- [47] Levine, Harold; Schwinger, Julian (1948): *On the radiation of sound from an unflanged circular pipe*. In: Physical Review 73 (4), 383-406. Online: <http://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.73.383> [Stand: 1/2015].
- [48] Oxford Wave Research LTD: *SpectrumView Plus*. Online: <https://itunes.apple.com/de/app/spectrumview-plus/id571455198?mt=8> [Stand: 1/2015].
- [49] Raspberrywood: *Spectrum Analyzer*. Online: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.raspw.SpectrumAnalyze&hl=de> [Stand: 1/2015].
- [50] Weinzierl, Stefan (2008): *Handbuch der Audio-technik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- [51] Cateater, LLC: *Signalgenerator*. Online: <https://itunes.apple.com/de/app/signalgenerator/id409241018?mt=8> [Stand: 1/2015].
- [52] Trono: *Waveform Generator*. Online: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.tronotech.waveformgeneratorpro&hl=de> [Stand: 1/2015].
- [53] Lerch, Reinhard; Sessler, Gerhard; Wolf, Dieter (2009): *Technische Akustik – Grundlagen und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- [54] AG Didaktik der Physik, TU Kaiserslautern (2015): *Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit*. Online: <http://youtu.be/4YcIRXUkj7s> [Stand: 1/2015].
- [55] Quantronik: *Dichte, Schallgeschwindigkeit transversal und longitudinal, akustische Impedanz*. Online: <http://www.flowanalytic.com/schall.pdf> [Stand: 1/2015].
- [56] LD DIDACTIC Gruppe: *Schallgeschwindigkeit in Festkörpern*. Online: <http://www.ld-didactic.de/software/524221de/Content/ExperimentExamples/Physics/Mechanics/VelocitySoundSolids.htm> [Stand: 1/2015].
- [57] Hirth, Michael; Kuhn, Jochen; Müller, Andreas; Gröber, Sebastian (2015): *Stehende Wellen in der Pappröhre – Schallgeschwindigkeitsbestimmung einfach und präzise*. In: *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik* 26 (145), (angenommen).

- [58] Dohmen, Günther (2001): *Das informelle Lernen – Die internationale Erschließung einer bisher vernachlässigten Grundform menschlichen Lernens für das lebenslange Lernen aller*. Bonn: BMBF. Online: http://www.werkstatt-frankfurt.de/fileadmin/Frankfurter_Weg/Fachtagung/BMBF_Das_informelle_Lernen.pdf [Stand: 1/2015].