

Universität Bielefeld

Fakultät für Physik

Physik und ihre Didaktik

Masterarbeit

im Studiengang 'Master of Education'
im Fach Physik

zum Thema:

Kleiner Preis und hohe Effizienz

Ultraschall zum Eigenbau

vorgelegt von

Robert Stark

Erstgutachter/in: Frau Prof. Dr. Bärbel Fromme
Zweitgutachter/in: Frau Dr. Michaela Schulz

Bielefeld, Juli 2011

Robert Stark
Im Dieken 34
32289 Rödinghausen
Matrikelnummer 1799292
Email: stark.robert@gmx.de

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	2
2. Theoretische Grundlagen.....	3
2.1 Ultraschall und Schallausbreitung.....	3
2.2 Ultraschallerzeugung:.....	7
2.2.1 Piezoelektrische Ultraschallerzeugung	7
2.2.2 Magnetostriktive und kapazitive Ultraschallerzeugung.....	10
2.3 Nutzen von Ultraschall	11
3. Weitere Theorie:.....	13
3.1 Stehende Welle.....	13
3.2 Dopplereffekt	15
3.3 Schwebung	17
3.4 Interferenz.....	19
3.5 Braggreflexion.....	22
4. Ultraschall zum Eigenbau.....	23
4.1 Bau von Ultraschallsender und -empfänger	23
4.2 Messmethoden und -geräte.....	27
5. Versuchsreihe mit Ultraschallsender und –empfänger.....	30
5.1 Erste Versuche mit Sender und Empfänger	30
5.1.1 Messung der Schallgeschwindigkeit:	31
5.1.2 Bestimmung der Dämpfung und Abstrahlcharakteristik	33
5.2 Veränderung der Wandler und Bau neuer Geräte.....	37
5.3 Versuche mit neuen Wandlern:	38
5.3.1 Messung der Dämpfung:.....	38
5.3.2 Messung der Abstrahlcharakteristik.....	42
5.4 Weitere Versuche.....	46
5.4.1 Dopplereffekt.....	46
5.4.2 Schwebung	50
5.4.3 Interferenz.....	51
5.4.4 Braggreflexion	56
6. Diskussion der Versuche.....	61
7. Diskussion der Messmethoden.....	63
8. Diskussion des Eigenbaus	64
9. Zusammenfassung und Fazit.....	66
10. Ausblick.....	67
10.1 Fledermausdetektor.....	67
10.2 Ultraschalllautsprecher	68
10.3 Sichtbarmachen von Ultraschall.....	69
Literaturverzeichnis.....	70
Erklärung.....	72

1. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit thematisiert das physikalische Fachgebiet der Akustik im Bereich des Ultraschalls. Dafür werden zunächst die grundlegenden theoretischen Inhalte der Akustik erläutert. Die Fragestellung lautet: Was ist Schall, wie breitet sich dieser aus und welche Gesetze bestimmen sein Verhalten? Weiter wird darauf eingegangen, was man unter Ultraschall versteht und wie dieser erzeugt werden kann. Drei grundlegende Arten der Ultraschallerzeugung werden dargestellt: Magnetostriktive, kapazitive bzw. elektrostatische, und piezoelektronische.

Im Folgenden steht der praktische Teil der Arbeit, nämlich der Bau von Ultraschallsender und –empfänger im Vordergrund. Dabei dient eine Veröffentlichung von Bernhard Ehret in der Zeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften- Physik in der Schule“ als Grundlage [Ehr01]. Diese werden dann verwendet, um schultaugliche Versuche mit Ultraschall durchzuführen. Die Versuche werden beschrieben, ihre Durchführung erklärt und letztendlich ausgewertet und bewertet. Es werden zwei unterschiedliche Methoden der Datenerfassung und –auswertung betrachtet. Die klassische, mit Multimeter und Oszilloskop und die moderne mittels graphikfähigem Computertaschenrechner und entsprechenden Messsensoren. Beide Methoden werden verglichen und auf ihren Nutzen im Schulunterricht überprüft.

Im letzten Teil der Arbeit werden drei Beispiele für die Verwendung von Ultraschall in der Schule und darüber hinaus gezeigt: Der Fledermausdetektor zum Aufspüren von Ultraschall in Natur und Technik und der Ultraschalllautsprecher zur gerichteten Ausbreitung von hörbaren akustischen Signalen. Außerdem wird die Möglichkeit erläutert, wie Ultraschall sichtbar gemacht werden kann.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Ultraschall und Schallausbreitung

Spricht man von Ultraschall, so versteht man darunter Schall mit sehr hoher Frequenz. Die Vorsilbe „Ultra“ ist dabei an den nicht sichtbaren Bereich des Lichts im ultravioletten Bereich angelehnt. Demnach ist die Frequenz von Ultraschall so hoch, dass das menschliche Gehör sie nicht wahrnehmen kann, ebenso wie das menschliche Auge auch kein ultraviolettes Licht wahrnehmen kann. Es gibt jedoch keine definierte Grenze, lediglich eine grobe Vereinbarung. Der Mensch kann Schall bis zu einer Frequenz von ca. 20kHz hören, ab dieser Schwelle spricht man folglich von Ultraschall. Das Hörvermögen nimmt jedoch im Laufe des Alters immer weiter ab, wodurch die Grenze zwischen Schall mit hörbarer Frequenz und Ultraschall sehr vage ist. Um die physikalischen Grundlagen von Ultraschall zu verstehen, muss man sich also zunächst die Frage stellen: Was ist eigentlich Schall?

Schall ist eine Welle die, anders als beispielsweise elektromagnetische Wellen, an ein Übertragungsmedium gebunden ist. Bei der Ausbreitung von Wellen unterscheidet man zwei Grundtypen: Transversale (Querwelle) und longitudinale Wellen (Längswelle). In jedem Fall ist mit der Welle eine Störung des Mediums verbunden, die von der Ruhelage oder Gleichgewichtsform abweicht. Von einer



Abbildung 1: Transversalwelle [Boy97]

transversalen Welle spricht man, wenn diese Störung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung erfolgt, hier dargestellt durch die Schwingung aneinander gekoppelter Kugeln. Diese schwingen, ausgehend von ihrer Ruhelage, auf und ab. Die Ausbreitung der Welle verläuft senkrecht dazu.

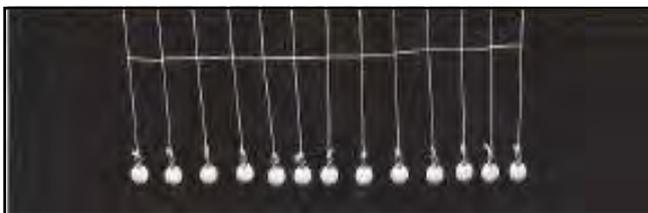


Abbildung 2: Longitudinalwelle [Boy97]

Verläuft die Störung des Mediums in Ausbreitungsrichtung der Welle spricht man von einer Longitudinalwelle. Die gekoppelten Kugeln verringern bzw. vergrößern ihren Abstand zueinander, das Medium verdichtet und verdünnt sich. Diese Druckschwankung innerhalb der Kugelaufhängung bewirkt eine Ausbreitung der Welle in Richtung der Druckänderung.

Bei Schallwellen können beide Wellenarten auftreten, je nachdem wie die Moleküle des Mediums miteinander korrelieren. In fluiden Medien, wie Gasen und Flüssigkeiten, besteht keine feste Bindung zwischen den Molekülen. Die Schallwelle breitet sich nur longitudinal aus. In einem Festkörper hingegen können durch die feste Verbindung zwischen den Atomen bzw. Molekülen beide Wellenformen auftreten. Dabei bedingt der Winkel zwischen Schallgeber und Festkörper die Form der Ausbreitung und somit die Art der Welle. Ebenso tritt beim Übergang zwischen fluiden und festen Medien eine Veränderung der Wellenform auf. [Kut88]

Bei Schall spricht man von einer Druckwelle, da die Ausbreitung der Welle immer in Form einer Druckschwankung innerhalb des Ausbreitungsmediums verläuft. Die Membran des Schallgebers verändert durch die Schwingung das schalltragende Medium, es wird komprimiert und expandiert. Die Druckänderung erfolgt dabei periodisch und lässt sich durch eine Sinuskurve beschreiben. Im klassischen Fall erhält man daher für die Funktion des Drucks abhängig von Ort und Zeit

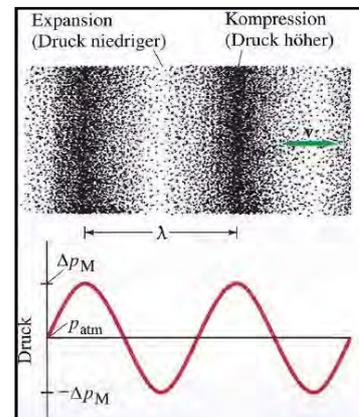


Abbildung 3: Druckwelle [Gia08]

$$p(x, t) = \Delta p_M \cdot \sin(kx - \omega t),$$

(Gia08, S.563) wo $\omega = 2\pi \cdot f$ die Kreisfrequenz und $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ die Wellenzahl angeben (f : Frequenz, λ : Wellenlänge). Δp_M ist der Scheitelwert des Drucks der sinusförmigen Schwingung, relativ zum Atmosphärendruck. Die Funktion beschreibt den idealen Verlauf der Druckänderung. Genauer lässt sich diese Schwingung in der Form

$$p(x, t) = \Delta p_M \cdot e^{-\alpha x} e^{i(\omega t - kx)}$$

darstellen (vgl. Kut88, S.31). Die klassische Funktion ist dabei der Realteil der imaginären Exponentialfunktion $Re\{e^{i(\omega t - kx)}\} = \sin(\omega t - kx)$ (Kut88, S.30). Die obige Gleichung zeigt an, dass die Schwingung durch äußere Einflüsse gedämpft wird, die Druckschwankung also nicht konstant ist. Die Absorptionskonstante α gibt dabei den Grad der Dämpfung innerhalb des Mediums an. Da die Druckschwankung nicht isotherm verläuft, also mechanische Energie der Welle in Wärmeenergie

umgewandelt wird, verringert sich die maximale Intensität des Schalldrucks im Laufe der Ausbreitung. Diese Verringerung der Intensität nimmt mit steigender Frequenz zu. Der Anteil der gesamten Absorptionskonstante, bezogen auf die Umwandlung der mechanischen Energie in Wärme, kann durch die Gleichung

$$\alpha_w = \frac{\kappa - 1}{2\kappa} \cdot \frac{v\omega^2}{c_v \rho c^3}$$

c_v : spezifische Wärmekapazität, v : Wärmeleitfähigkeit, κ : Adiabatenexponent

berechnet werden (Kut88, S.193).

Weiter wirkt der entstehenden Deformation eine Rückstellkraft entgegen, die dafür aufgebrauchte Energie mindert die Ausbreitung der Schallwelle. Der Anteil der Absorptionskonstante, die durch diese Deformation gegeben ist, berechnet sich mittels

$$\alpha_v = \frac{2\eta\omega^2}{3\rho_0 c^3}$$

η : Viskositätskonstante, ρ_0 : Dichte, c : Schallgeschwindigkeit

(Kut88, S.192). Die gesamte Absorptionskonstante ist die Summe der beiden Anteile

$$\alpha = \alpha_w + \alpha_v.$$

Allerdings gilt diese Gleichung nur für klassische Berechnungen in einatomigen Gasen ohne Beachtung der molekularen Struktur des Mediums. Für mehratomige Gase müssen die verschiedenen Bewegungsfreiheitsgrade der Moleküle mit einbezogen werden, da die Umwandlung der Energie und die Verformung nicht eindimensional sondern mehrdimensional über die einzelnen Freiheitsgrade geschieht (siehe Abbildung 4) [Kut88].

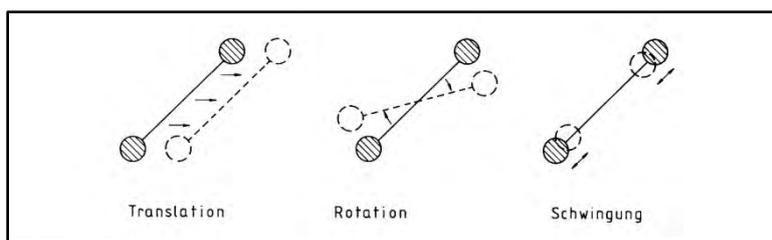


Abbildung 4: Bewegungsformen eines mehratomigen Moleküls [Kut88]

Zwei wichtige und oft verwechselte Begriffe bei der Ausbreitung von Schallwellen sind die Schallschnelle und die Schallgeschwindigkeit. Bei der Schnelle einer Schallwelle handelt es sich um die Geschwindigkeit der schwingenden Teilchen, mit der sie die Bewegung um ihre Ruhelage ausführen. Die Schallgeschwindigkeit hingegen ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle, also der Abfolge von Wellenberg und Wellental. Sie wird berechnet durch den Quotienten aus zurückgelegter Wegstrecke Δs und der dafür benötigten Zeit Δt einer Schwingung

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

Streng genommen handelt es sich bei diesem Quotienten nur um die Momentangeschwindigkeit der Welle. Setzt man für den zurückgelegten Weg der Welle nun die Wellenlänge λ und für die benötigte Zeit die Schwingungsdauer T ein, folgt daraus

$$v = \frac{\lambda}{T}.$$

Benutzt man anstelle der Schwingungsdauer T die Frequenz $f = \frac{1}{T}$, erhält man

$$v = \lambda \cdot f.$$

Die so berechnete Schallgeschwindigkeit ist abhängig vom Ausbreitungsmedium und dessen Temperatur, da die Druckänderung sowohl von der Dichte als auch von der vorhandener Wärmeenergie des Mediums abhängt. Für Luft beträgt die Schallgeschwindigkeit $v_0 = 331 \frac{m}{s}$ bei einer Temperatur von $T = 0^\circ C$. Die temperaturabhängige Geschwindigkeit in Luft errechnet sich mittels einer Näherung durch

$$v = v_0 + 0.6 \cdot T \approx (331 + 0.6 \cdot T) \frac{m}{s}$$

(Gia08, S.561). Die Werte für Schallgeschwindigkeiten in anderen Medien sind in entsprechenden Tabellen zu finden, hier seien nur einige aufgeführt:

Material	Geschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]
Luft	343
Helium	1005
Wasser	1440
Glas	≈ 4500

Tabelle 1: Schallgeschwindigkeit verschiedener Stoffe bei 20°C und 1bar [Gia08]

Im Weiteren wird die Geschwindigkeit des Schalls mit c bezeichnet. [Gia08]

2.2 Ultraschallerzeugung:

Wie bei jeder Schallerzeugung geschieht auch die Erzeugung von Ultraschall durch einen Schallgeber, einen Sender. Dieser ist bei normalen Lautsprechern eine Membran, die durch elektrische Signale in Schwingung versetzt wird. Diese Schwingung wird dann an das Übertragungsmedium weitergegeben und verursacht, wie beschrieben, eine Veränderung des Drucks. Um Schall mit einer Frequenz von über 20kHz zu erzeugen, muss diese Schwingung sehr schnell sein. Folglich benötigt man einen Sender der möglichst dünn ist, um diese Geschwindigkeit zu gewährleisten. Für die Erzeugung von Ultraschall gibt es drei übliche Möglichkeiten: Die magnetostriktive, die kapazitive oder elektrostatische und die piezoelektrische. Im Folgenden werden diese drei Methoden näher beschrieben.

2.2.1 Piezoelektrische Ultraschallerzeugung

Eine häufig verwendete Methode zur Erzeugung von Ultraschall benutzt den piezoelektrischen Effekt. Dieser ist im Alltag besonders durch elektrische Feuerzeuge bekannt. Drückt man den Schalter eines solchen Feuerzeuges zusammen, bewirkt dies eine Dickenänderung s in dem verwendeten piezoelektrischen Material, z. B. einem Quarzkristall. Die Änderung der Dicke verursacht dann eine dielektrische Polarisierung. Werden nun die Elektroden an dem Kristall kurz geschlossen, erzeugt die Polarisierung auf den Elektroden eine Influenzladung mit der Ladungsdichte

$$D = e \cdot s$$

(Kut88, S.82). Der Proportionalitätsfaktor e ist dabei eine Materialkonstante mit der Einheit $\frac{N}{Vm}$ oder $\frac{As}{m^2}$ und wird auch als piezoelektrische Konstante bezeichnet. Die entstehende Ladung erzeugt dann zwischen einem mit der einen Elektrode verbundenen Draht und dem elektrisch leitenden Gasventil in der Nähe des Drahtendes einen Funken. Dieser entzündet bekanntlich das Gas, welches aus dem Ventil austritt. Wird andersherum an eine Platte eines piezoelektrischen Materials der Dicke b eine Spannung U angelegt, erzeugt diese ein elektrisches Feld E in der Platte. Durch dieses Feld entsteht eine elastische Spannung

$$\sigma = -e \cdot E$$

(Kut88, S.82). Es besteht also eine Reziprozität zwischen mechanischer und elektrischer Energie. Das Anlegen eines elektrischen Feldes auf die Platte mit dem piezoelektrischen Material bewirkt eine Dickenänderung (mechanische Energie). Andersherum induziert eine Änderung der Dicke der Platte eine Ladung (elektrische Energie)

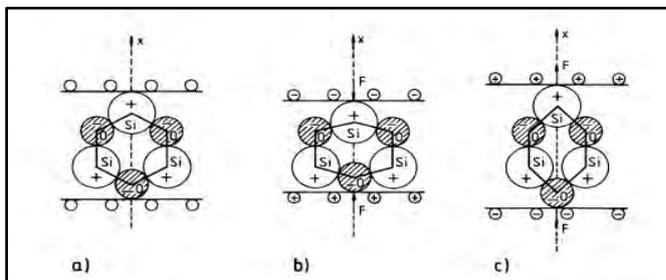


Abbildung 5: Quarzmodell [Kut88]

Die Ursache für den piezoelektrischen Effekt ist eine Asymmetrie im Kristallaufbau der piezoelektrischen Werkstücke, hier am Beispiel von Quarz (SiO_2) in vereinfachter Darstellung (Abbildung

5). Im Ruhezustand (a) erkennt man die asymmetrische Anordnung der Silizium- und Sauerstoffatome, beziehungsweise der Anionen und Kationen. Wirkt nun von Außen eine Kraft auf den Kristall ein (b), so verformt sich die Struktur, bleibt jedoch im Verbund zusammen. Durch das Zusammendrücken ändert sich das Dipolmoment des Kristalls und wird kleiner. Dadurch entstehen positive Ladungen an der unteren, sowie negative Ladungen an der oberen Platte. Kehrt man die Krafrichtung um, zieht also die beiden begrenzenden Platten auseinander (c), so bewirkt dies eine gegensätzliche Ladung auf beiden Platten. Das Dipolmoment im Kristall wird größer, wodurch eine positive Influenzladung an der oberen und eine negative Influenzladung an der unteren Platte entstehen. Durch diesen Aufbau erklärt sich das gegenteilige Auftreten der Dickenänderung der Platte bei Anlegen einer Spannung

an die Platten. Durch die Ladungen auf den Platten bewirkt das elektrische Feld eine mechanische Verformung des Materials.

Neben solchen Einkristallen wie Quarz, der aufgrund seiner kostengünstigen Herstellung und seiner hohen elektrischen Durchschlagsfestigkeit, sowie seiner chemischen Resistenz und Temperaturbeständigkeit bis 573°C häufig verwendet wird, können auch andere piezoelektrische Werkstoffe für die Erzeugung von Ultraschall verwendet werden. So benutzt man auch Materialien wie z. B. Bariumtitanat (BaTiO_2), Bleimetaniobat (PbNb_2O_6) oder Bleizirkonattitanat ($\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$), im Handel als PZT oder PXT bekannt. Diese sind ferromagnetisch, weisen also ab der Currie-Temperatur ein hohes Maß an Symmetrie in ihrer Kristallstruktur auf, welche sich aber bei Temperaturen unterhalb dieser Grenze spontan verzerrt. Dabei verschieben sich positive und negative Ionen gegeneinander sodass eine hohe dielektrische Polarisierung auftritt. [Kut88]

Die einfachste Form eines piezoelektrischen Ultraschallsenders ist der Dickenschwinger. Dieser besteht aus einer Platte, in der zwischen zwei Elektroden ein piezoelektrisches Material gespannt ist. Durch das Anlegen einer Wechselspannung wird diese aufgrund der auftretenden elastischen Verformung in Schwingung versetzt und erzeugt Ultraschall. Diese einfache Herstellung eignet sich

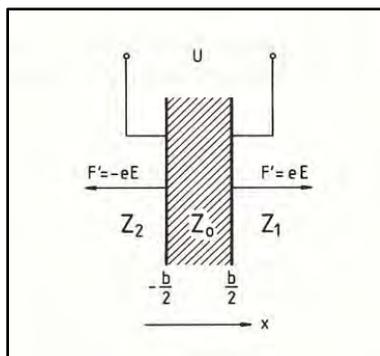


Abbildung 6:
Dickenschwinger [Kut88]

besonders für Frequenzen von einigen hundert Kilohertz. Die Resonanzfrequenz, also die Frequenz der Eigenschwingung des Materials, bei dem die größtmögliche Verstärkung des Signals erzeugt wird, liegt bei einer 1 cm dicken Quarzscheibe bei 285kHz. Möchte man nun Ultraschall mit einer geringeren Frequenz, wie beispielsweise 40kHz erzeugen, könnte

man die Quarzscheibe verbreitern. Dies wäre aber aufwendig und mit hohen Kosten verbunden weshalb eine andere

Technik für die Erzeugung von Ultraschall dieser Frequenz hinzugezogen wird. Die piezoelektrische Platte wird dazu in Zusatzmassen eingepasst und erhält einen sogenannten Verbundschwinger. Die zusätzlichen Massstücke dienen in diesem Fall als Wellenleiter mit dem Wellenwiderstand Z'_0 , der charakteristischen Impedanz des Materials. Diese berechnet sich durch die Gleichung $Z'_0 = \frac{p}{v}$, wobei p den

Schalldruck und v die Schallschnelle angeben (Kut88, S.28). Das piezoelektrische Material in der Mitte der beiden Massen wird über die Mittelelektrode mit einer Wechselspannung versorgt, welche eine gleichgesinnte Dickenänderung hervorruft. Durch diesen Aufbau lässt sich durch Anpassen der Massenstücke die gewünschte Frequenz der Ultraschallwelle simpel und kostengünstiger erreichen. Der Verbundschwinger wird dann in ein entsprechendes Gehäuse eingepasst und eventuell durch einen zusätzlichen Schalltrichter ergänzt. Der Vorteil an der piezoelektrischen Bauweise besteht darin, dass ein solcher Wandler aufgrund der Umkehrbarkeit des piezoelektrischen Effekts sowohl zur Erzeugung, als auch zur Aufnahme von Ultraschallsignalen verwendet werden kann. Je nachdem ob ein elektrisches Feld an das piezoelektrische Material angelegt oder an ihm registriert wird.

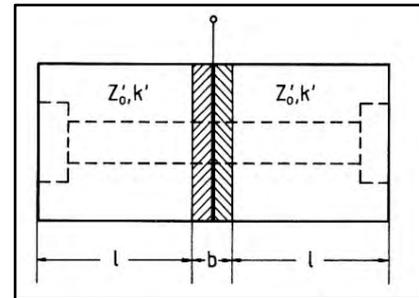


Abbildung 7:
Verbundschwinger [Kut88]

2.2.2 Magnetostriktive und kapazitive Ultraschallerzeugung

Neben der piezoelektrischen Ultraschallerzeugung kann man sich auch zweier anderer Techniken bedienen. Die erste bildet augenscheinlich das magnetische Pendant zu der bereits beschriebenen Methode. Bei dieser magnetostriktiven Ultraschallerzeugung sorgt das magnetische Feld einer Spule für die Ausdehnung, beziehungsweise die Stauchung eines ferromagnetischen Stabes in ihrem Inneren. Wird die Spule von einem Strom durchflossen, so bewirkt das magnetische Feld in der Spule eine Magnetisierung des Stabes. Dadurch kommt es zu einer Zugspannung im Stab, welche durch die fehlende Ausweichmöglichkeit eine Längenänderung verursacht. Wird auf der anderen Seite der Stab in der Spule bewegt, so erzeugt diese Bewegung eine induktive Spannung in der Spule, die an den Enden gemessen werden kann. Es sind also, wie bei der piezoelektrischen Methode, beide Richtungen des Effekts gegeben.

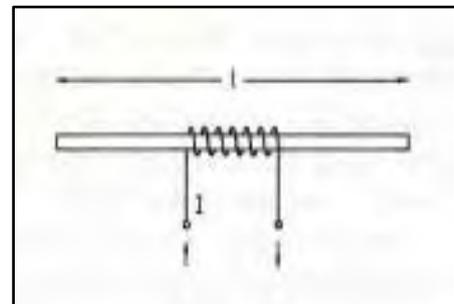


Abb 8: Magnetostriktionseffekt [Kut88]

Jedoch ist die Längenänderung beim Magnetostriktionseffekt nicht linear, weshalb nur im Ansatz von einer Analogie der beiden Erzeugungsmethoden gesprochen werden kann. Ebenso verliert das ferromagnetische Material ab der Curie-

Temperatur bekanntlich seine ferromagnetische Eigenschaft, wodurch ab dieser Temperatur die Wirkung ausbleibt.

Die kapazitive oder elektrostatische Ultraschallerzeugung nutzt die Anziehungskräfte zwischen elektrischen Ladungen. Der Wandler besteht prinzipiell aus einem Plattenkondensator, in dem sich die beiden Platten

nach Anlegen einer Spannung mit der Kraft $F = \frac{C_0}{2b} \cdot U^2$

anziehen. C_0 ist dabei die Kapazität des Kondensators, b der Plattenabstand und U die angelegte Spannung. Eine der Platten ist dabei eine dünne und leicht bewegliche Membran, die andere ist

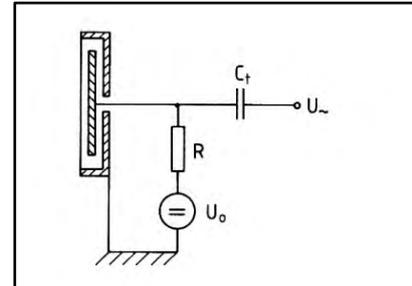


Abbildung 9: kapazitiver Schallwandler [Kut88]

starr. Auf beide Platten wirkt zwar dieselbe Kraft, da aber

die eine unflexibel ist, muss diese zunächst die Massenträgheit und ihre Federsteife überwinden, um sich der anderen Platte anzunähern. In Folge dessen wirkt das angelegte Wechselfeld der Spannung U_0 als Schwingungsgeber für die dünne Membran. Dieser Aufbau ermöglicht es, ohne großen Innenwiderstand und mit geringer Leistung, Ultraschall an ein fluides Medium abzugeben. Die piezoelektrische Erzeugung wird häufiger für Ultraschall in Festkörpern verwendet.

2.3 Nutzen von Ultraschall

Nachdem erklärt wurde wie Ultraschall erzeugt werden kann, soll nun noch kurz auf den Nutzen und die Nutzung von selbigem eingegangen werden. Aufgrund der hohen Frequenz und der damit verbundenen kleinen Wellenlänge von Ultraschall, breitet sich dieser sehr gerichtet aus. Die Druckänderung erfolgt durch die geringe Wellenlänge als scharfes Bündel fast rechtwinklig zur schwingenden Oberfläche [Lin]. So erhält man einen Schallpegel, der nahe dem Mittelpunkt des Schallwandlers eine hohe Intensität aufweist, während diese außerhalb der Mittelachse rapide abnimmt. Verglichen mit anderen Lautsprechern ist die Querschnittsfläche eines Ultraschallwandlers sehr gering, was diesen Effekt unterstützt.

Ausschlaggebend für die gerichtete Ausbreitung ist das Produkt aus der Wellenzahl k des Schalls und des Radius a der Schallquelle. Ist dieses Produkt gering, also die schwingende Fläche klein gegenüber der Wellenlänge und die Frequenz gering, so breitet sich der Schall nahezu halbkreisförmig aus. Bei Ultraschallwandlern hingegen beträgt der Radius der Schallquelle viele Wellenlängen, zusätzlich ist die Frequenz sehr hoch.

Abbildung 10 zeigt die auf den Schalldruck bezogene Richtcharakteristik, d. h. den Absolutbetrag des Richtfaktors

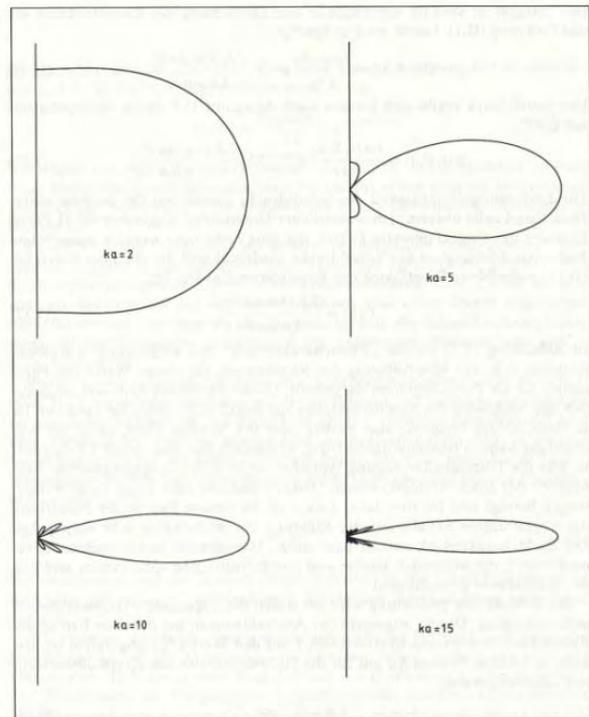


Abbildung 10: Schalldruckpegel bei verschiedenen Werten von ka , (2,5,10,15) [Kut88]

$$\Gamma(\vartheta) = \frac{2J_1(ka \cdot \sin(\vartheta))}{ka \cdot \sin(\vartheta)}$$

(Kut88, S.69), des Strahlers bei verschiedenen Werten von ka als Polardiagramm. Dabei ist J_1 die Besselfunktion erster Ordnung und ϑ der Abstrahlwinkel zur Mittelachse. Der Richtfaktor gibt die theoretische Ausrichtung des Schalldruckpegels an. Je größer das Produkt aus Radius und Wellenzahl ist, umso größer ist die Bündelung des Pegels auf der Mittelachse.

Durch die gerichtete Ausbreitung des Schalldrucks ist es möglich, gezielte Untersuchungen in verschiedenen Medien vorzunehmen. So wird Ultraschall beispielsweise in der zerstörungsfreien Materialprüfung genutzt. Der Schall breitet sich im Festkörpermateriale idealerweise linear aus. Wird er von Störungen im Werkstück reflektiert, kann dies exakt erfasst werden. Da sich Ultraschall innerhalb eines Mediums mit konstanter Geschwindigkeit ausbreitet, können Unterschiede in der Durchgangszeit Aufschluss auf Einlagerungen anderer Substanzen innerhalb des

Werkstücks geben. Dabei wird meist ein Wandler mit hoher Frequenz als Sender und Empfänger genutzt.

In der Medizin wird Ultraschall zur Untersuchung im Körpergewebe verwendet, auch bekannt als Sonographie. Dabei dient wie in der Materialprüfung ein Wandler als Sender und Empfänger. Unterschiedliche Gewebestrukturen und Körperflüssigkeiten reflektieren und transmittieren den Ultraschall verschieden stark und ermöglichen so eine Darstellung des Körperinneren. Notwendig bei solchen Untersuchungen ist, dass der Schall keinen Schaden im Gewebe anrichtet. Zwar wird aufgrund der Energieumwandlung ein Teil der mechanischen Energie des Schalls in Wärme umgewandelt, die Temperatur ist dabei aber so gering, dass keine gesundheitlichen Schäden entstehen. Beispielsweise verändert Schall mit einer Frequenz von 1 MHz und der Intensität 0.1 W/cm^2 die Gewebetemperatur um etwa 3°C , ohne Einbezug der Kühlung durch den Blutkreislauf. Höhere Leistungen werden für die Untersuchung nicht benötigt. [Kut88]

3. Weitere Theorie:

Theoretische Grundlage für die Versuchsreihen mit Ultraschallsender und Empfänger sind verschiedene Sachverhalte aus dem Bereich der Akustik, der Optik, sowie der Atomphysik. Im Folgenden werden diese erläutert.

3.1 Stehende Welle

Breitet sich eine Welle in einem Medium mit konstanter Frequenz und Wellenlänge, also mit konstanter Geschwindigkeit aus, spricht man von einer harmonischen Schwingung. Diese lässt sich im Allgemeinen durch die Gleichung

$$D_1(x, t) = D_M \cdot \sin(kx - \omega t)$$

beschreiben (Gia08, S.546). Die Funktion $D_1(x, t)$ beschreibt dabei die Ausbreitung der Welle an, D_M ist die maximale Amplitude. Die im realen Fall auftretende Dämpfung einer solchen Welle beeinflusst nur die Amplitude, nicht jedoch die Frequenz. Daher ist die Reduzierung auf obige Gleichung für die weitere Betrachtung möglich.

Wird eine harmonische Welle an einem festen Gegenstand reflektiert, läuft diese der

eingehenden Welle entgegengesetzt zurück. Die rücklaufende Welle lässt sich folglich durch die Gleichung

$$D_2(x, t) = D_M \cdot \sin(kx + \omega t)$$

darstellen. Eingehende und rücklaufende Welle interferieren miteinander. Da die Frequenz beider Wellen identisch ist, kann die Überlagerung der beiden Wellen mathematisch durch ihre Summe beschrieben werden (Superposition):

$$D = D_1 + D_2 = D_M(\sin(kx - \omega t) + \sin(kx + \omega t)).$$

Mit der trigonometrischen Identität

$$\sin(\theta_1) + \sin(\theta_2) = 2 \cdot \sin\frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_2) \cos\frac{1}{2}(\theta_1 - \theta_2) \quad (*)$$

folgt daraus für die Amplitude

$$D = 2 \cdot D_M \sin(kx) \cdot \cos(\omega t).$$

Aus dieser Gleichung sieht man, dass es sich bei der Überlagerung beider Schwingungen um eine stehende Welle handelt, also einer unbewegten Schwingung mit variabler Amplitude, da Ort und Zeit nicht in derselben Winkelfunktion vorkommen. Die Amplitude der Welle, gegeben durch $2 \cdot D_M \sin(kx)$, verschwindet für bestimmte Werte für x und weist dort Schwingungsknoten auf. Da für die Reflexion der Welle ein Knoten am Ende bei $x = L$ auftreten muss, gilt folglich

$$\sin(kx) = \sin(kL) = 0.$$

Löst man diese Gleichung für das Produkt kL , so erhält man

$$kL = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots n\pi, n \in \mathbb{N}$$

Setzt man nun $\lambda = \frac{2\pi}{k}$ um die Abhängigkeit für das Auftreten einer stehenden Welle von ihrer Wellenlänge zu erhalten, folgt daraus

$$\lambda = \frac{2L}{n} \text{ oder } L = \frac{n}{2} \cdot \lambda$$

Man erhält somit eine stehende Welle, wenn die Distanz zwischen Erreger und Reflektor ein Vielfaches der halben Wellenlänge beträgt: $L = \frac{n}{2} \cdot \lambda$. Die folgende Graphik visualisiert eine stehende Welle am Beispiel einer eingespannten Saite vgl [Gia08].

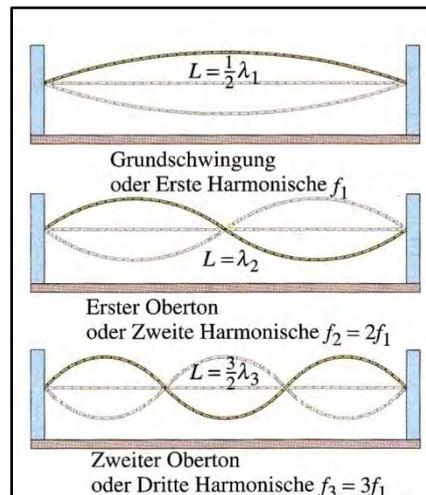


Abbildung 11: Stehende Welle am Beispiel einer schwingenden Saite [Gia08]

3.2 Dopplereffekt

Bewegen sich Schallsender und -empfänger relativ zueinander, tritt der nach dem österreichischen Physiker J. C. Doppler (1803-1853) benannte Doppler-Effekt auf. Dabei erhöht sich die empfangene Frequenz, wenn sich die Schallquelle auf den Empfänger zubewegt und wird geringer, wenn sich die Distanz der beiden vergrößert. Ebenso verändert sich die empfangene Frequenz, wenn sich der Empfänger auf den Sender zu oder vom Sender wegbewegt. Im Folgenden sei v_E die Geschwindigkeit des Empfängers und v_S die Geschwindigkeit des Senders.

Im ersten Fall sei der Schallempfänger in Ruhe. Ist auch der Sender in Ruhe, so ist die Wellenlänge des gesendeten Schalls, also die Distanz zwischen zwei Wellenbergen, $s = \lambda = c \cdot T$, mit der Schallgeschwindigkeit c und der Schwingungsdauer T . Bewegt sich nun der Sender auf den Empfänger mit einer Geschwindigkeit $v_E = \frac{s_E}{T}$ zu, so verringert sich der Abstand zweier Wellenberge um die Differenz der zurückgelegten Weglänge. Die Wellenlänge beträgt

$$\begin{aligned} \lambda' &= s - s_S \\ &= \lambda - v_S T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \lambda - v_s \cdot \frac{\lambda}{c} \\
&= \lambda \cdot \left(1 - \frac{v_s}{c}\right)
\end{aligned}$$

(Gia08, S.579). Folglich beträgt die Frequenz des empfangenen Schalls

$$f' = \frac{c}{\lambda'} = \frac{c}{\lambda \cdot \left(1 - \frac{v_s}{c}\right)}$$

oder

$$f' = \frac{f}{\left(1 - \frac{v_s}{c}\right)}$$

(Gia08, S.580). Man sieht, dass die Frequenzänderung abhängig von der Geschwindigkeit des Senders ist.

Wird im zweiten Fall der Sender vom Empfänger wegbewegt, so erhöht sich die Distanz zweier Wellenberge und damit der Wellenlänge um

$$\lambda' = s + s_s$$

Analog gilt daher für die Frequenz am Empfänger

$$f' = \frac{f}{\left(1 + \frac{v_s}{c}\right)}$$

(Gia08, S.580). Ruht nun die Schallquelle und der Empfänger bewegt sich, so erhält man ein ähnliches Ergebnis, die Berechnung unterscheidet sich jedoch von obiger. Bei der Bewegung auf die Schallquelle zu, erhöht sich die empfangene Frequenz. Bei der Bewegung von der Schallquelle weg verringert sie sich. Die Geschwindigkeit der Welle errechnet sich aus der Summe beziehungsweise der Differenz von Schallgeschwindigkeit und Geschwindigkeit des Empfängers

$$v' = c \pm v_E$$

Bei der Bewegung auf die Quelle zu addieren sich Geschwindigkeiten, die Differenz gilt für die Bewegung vom Sender weg. Die veränderte Frequenz ist damit

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{c \pm v_E}{\lambda}$$

oder

$$f' = \left(1 \pm \frac{v_E}{c}\right) \cdot f.$$

[Gia08], [Tip09]

3.3 Schwebung

Bisher wurden nur Wellen einer Quelle betrachtet. Grundlage für die Betrachtung der beiden weiteren Phänomene sind Überlagerungen von Wellen aus zwei oder mehreren Sendern.

Die bei der stehenden Welle erwähnte Superposition soll nun verwendet werden, um zu zeigen wie sich zwei verschiedene Schallquellen zueinander verhalten. Ausgangspunkt sind zwei Schallgeber, die zu einer bestimmten Zeit in Phase schwingen, dort also keine Phasenverschiebung besitzen. Betrachtet man diese einzeln, so ist ihre Schwingung wie oben durch die Gleichung

$$D(x, t) = D_M \cdot \sin(kx - \omega t) = D_M \cdot \sin(kx - 2\pi f t)$$

gegeben. Jedoch sind in diesem Fall die Sendefrequenzen verschieden, beispielsweise $f_1 = 50\text{ Hz}$ und $f_2 = 60\text{ Hz}$. Da beide Sender an einem bestimmten Ort in Phase schwingen, reduzieren wir die Betrachtung der Wellen auf eine Abhängigkeit in der Zeit, halten also den Ort fixiert. Demnach vereinfacht sich die allgemeine Gleichung zu

$$D(t) = D_M \cdot \sin(\omega t) = D_M \sin(2\pi f t)$$

(Gia08, S.578). Das Bild beider Schwingungen an diesem Punkt ist in der Abbildung 12 dargestellt.

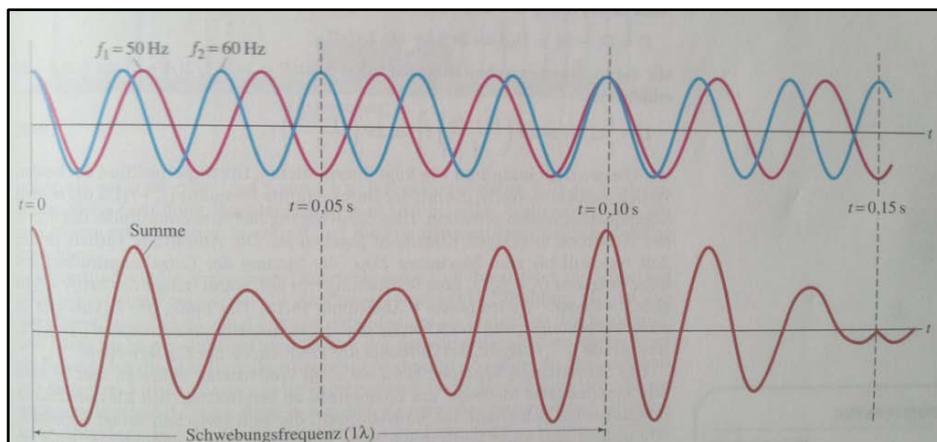


Abbildung 12: Überlagerung von zwei Schwingungen ähnlicher Frequenz [Gia08]

Die rote Kurve zeigt den Verlauf der Schwingung mit $f_1 = 50\text{Hz}$, die blaue Kurve entspricht der Schwingung mit $f_2 = 60\text{Hz}$. Zum Zeitpunkt $t = 0$ sind beide Wellen in Phase, es treffen beide Wellenberge aufeinander und man erhält konstruktive Interferenz. Nach $t = 0.5\text{s}$ treffen Wellenberg und Wellental der Schwingungen aufeinander, die resultierende Welle zeigt destruktive Interferenz. Diese ist jedoch nur genau dann Null, wenn wie in diesem Fall auch die Amplituden der beiden Schwingungen identisch sind. Der nächste Wellenberg der resultierenden Schwingung entsteht bei $t = 0.1\text{s}$, wir erhalten also im zeitlichen Abstand von 0.1s konstruktive bzw. destruktive Interferenz. Diese durch Interferenz verursachte Modulation der Amplitude nennt man Schwebung. Die Schwingungsdauer beträgt in dem betrachteten Fall $T=0.1\text{s}$, woraus die Schwebungsfrequenz

$f_{\text{Schwebung}} = \frac{1}{T} = 10\text{Hz}$ resultiert. Aus diesem Wert lässt sich die allgemeine Berechnung einer Schwebungsfrequenz intuitiv ermitteln:

$$f_{\text{Schwebung}} = f_1 - f_2$$

Verifiziert wird diese Gleichung durch die Betrachtung der Superposition beider Wellengleichungen.

$$D_1(t) = D_M \sin(2\pi f_1 t)$$

$$D_2(t) = D_M \sin(2\pi f_2 t)$$

Wie bei der stehenden Welle erhalten wir durch Überlagerung

$$\begin{aligned} D(t) &= D_1(t) + D_2(t) \\ &= D_M \sin(2\pi f_1 t) + D_M \sin(2\pi f_2 t). \end{aligned}$$

Mit (*) folgt daraus

$$D(t) = [2D_M \cos\left(\left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2}\right) t\right)] \cdot \sin\left(2\pi \cdot \left(\frac{f_1 + f_2}{2}\right) t\right)$$

(Gia08, S.588). Der Sinus-Anteil dieser Funktion gibt an, dass die Welle mit einer durchschnittlichen Frequenz $\frac{f_1+f_2}{2}$ schwingt. Der Anteil in eckigen Klammern gibt Aufschluss über die Amplitude der Welle, welche Werte zwischen 0 und der

maximalen Amplitude $2D_M$ annimmt. Das Maximum wird genau dann erreicht, wenn der Betrag der Cosinus-Funktion = 1 ist. In einer Periode der Schwebung wird der maximale Betrag zweimal erreicht. Daher gilt für die Schwingungsfrequenz der Schwebung

$$f_{\text{schweb}} = 2 \cdot \frac{f_1 - f_2}{2} = f_1 - f_2,$$

also genau die intuitiv berechnete Differenz der beiden Einzelfrequenzen.

3.4 Interferenz

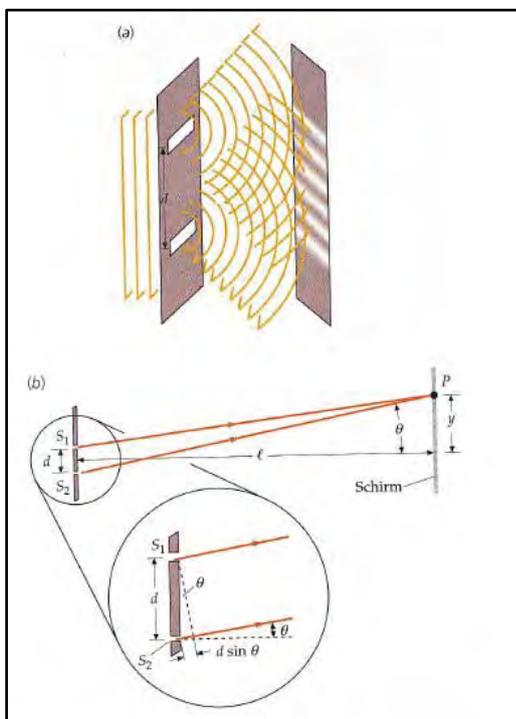


Abbildung 13: Doppelspaltversuch: a) Wellenausbreitung und Interferenz am Doppelspalt, b) Schemazeichnung [Tip09]

Aus der Optik bekannt sind Versuche mit dem Doppelspalt. Dabei wird ein fokussierter, monochromatischer Lichtstrahl auf einen Spalt gesendet, der zwei parallele Öffnungen besitzt. Idealerweise geht man davon aus, dass die ankommende Lichtwelle eine parallel Wellenfront darstellt (siehe Abbildung 13). Nach Durchqueren des Spaltes werden aufgrund des Huygenschen Prinzips kugelförmige Wellen an beiden Öffnungen erzeugt. Das Prinzip besagt, dass jeder Punkt einer Welle wieder Ursprung von Elementarwellen ist. Die entstehenden Wellen haben die gleiche Phase und überlagern sich.

Es tritt Interferenz auf, das bedeutet dass sich die beiden Wellen derart überlagern, dass sich Verstärkungen der Amplitude (konstruktive Interferenz) oder Abschwächungen der Amplitude bzw. Auslöschung (destruktive Interferenz) ausbilden.

Diese Interferenzerscheinung lässt sich dann auf einem Schirm in einiger Entfernung als Licht- und Schattenpunkte erkennen. Konstruktive Interferenz tritt genau dann auf, wenn der Gangunterschied zwischen der einen und der anderen Welle ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge des Lichts betragen. Dieser Gangunterschied wird für bestimmte Winkel erreicht, für die folgende Beziehung gilt

$$d \cdot \sin(\theta_m) = m \cdot \lambda, \text{ mit } m = 0, 1, 2, \dots$$

(Tip09, S.1290). Dabei bezeichnet d den Abstand der beiden Öffnungen. m ist in dieser Gleichung die Ordnung des Maximums. Destruktive Interferenz wird für Winkel erreicht, für die gilt

$$d \cdot \sin(\theta_m) = \left(m - \frac{1}{2}\right) \lambda, \text{ mit } m = 1, 2, 3, \dots$$

(Tip09, S.1290). Der Abstand y_m zwischen den Interferenzmaxima auf dem Schirm ist nach der trigonometrischen Beziehung durch

$$\tan(\theta_m) = \frac{y_m}{l}$$

zu berechnen (siehe Abbildung 13). Dabei ist l der Abstand zwischen Schirm und Spalt. Für kleine Winkel θ_m gilt die Näherung $\sin(\theta_m) = \tan(\theta_m)$, woraus nach Umstellen für den Abstand folgt

$$y_m = m \cdot \frac{\lambda \cdot l}{d}$$

(Tip09, S.1291). Erhöht man nun die Anzahl der Spalte und lässt dadurch drei oder vier Quellen miteinander interferieren, so verstärken sich auf der einen Seite die Hauptmaxima, die auch beim Doppelspalt sichtbar sind. Auf der Anderen Seite können aber auch Wellen mit einem anderen Phasenwinkel interferieren. Dabei ist der Gangunterschied zwischen zwei verschiedenen Spalten, nicht unbedingt den direkt nebeneinanderliegenden, ideal für konstruktive Interferenz. Dadurch treten Nebenmaxima zwischen den Hauptmaxima auf, letztere weisen zusätzlich eine feinere Struktur auf (siehe Abbildung 14).

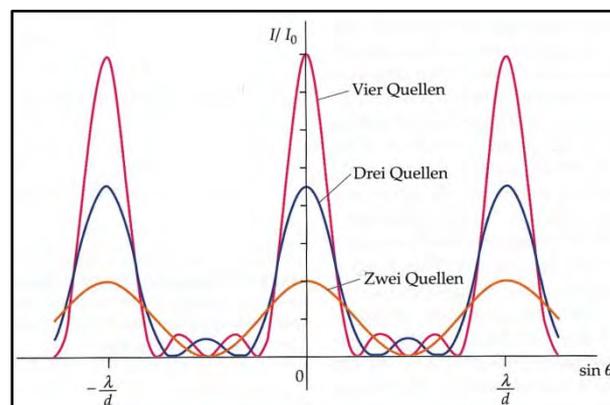


Abbildung 14: Interferenz mehrerer Quellen [Tip09]

Genau wie bei optischen Versuchen mit dem Doppelspalt treten auch bei zwei Schallquellen Interferenzerscheinungen auf. Die in Phase schwingenden Schallgeber senden gleichzeitig ein Signal einer bestimmten Frequenz aus. Die dadurch verursachten Druckschwankungen überlagern sich: Bei Aufeinandertreffen von Expansionen erhält man destruktive Interferenz, bei doppelter Kompression tritt konstruktive Interferenz auf. Die nebenstehende Graphik visualisiert die erhaltene Interferenzerscheinung. Wichtig bei der Betrachtung ist, dass beide Erreger permanent in Phase schwingen und folglich dieselbe Frequenz aufweisen. Weiter ist es von Vorteil, wenn auch die Amplitude des Schalldrucks identisch ist. Dadurch verschwindet bei destruktiver Interferenz der Druck vollständig. Allerdings interferieren auch Wellen unterschiedlicher Phase, in diesen Fällen sind die Maxima und Minima nicht ausgeprägt. [Tip08, Gia08]

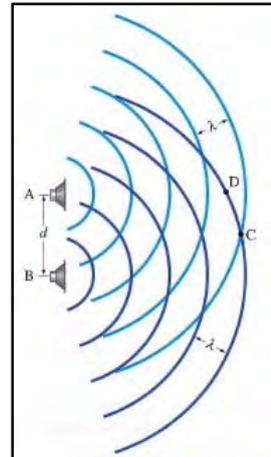


Abbildung 15: Interferenz bei zwei Schallquellen [Gia08]

3.5 Braggreflexion

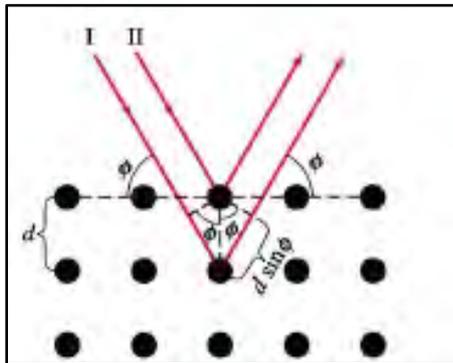


Abbildung 16: Röntgenbeugung am Kristallgitter [Gia08]

Um eine Vorstellung von der Wellenlänge von Röntgenstrahlen zu gewinnen, wurden diese auf ein regelmäßiges, kubisches Kristallgitter geschossen. Dabei beobachtete man für bestimmte Winkel konstruktive Interferenz. Diese tritt genau dann auf, wenn zwischen dem Eingangswinkel und dem Abstand der Kristallebenen folgende Beziehung gilt:

$$m\lambda = 2d \cdot \sin(\phi) \text{ mit } m = 1, 2, 3, \dots$$

(Gia08, S.1206) Die Röntgenstrahlen müssen zweimal die Distanz $d \sin(\phi)$ zwischen den Gitternetzlinien durchschreiten um mit den an der Oberfläche reflektierten Strahlen konstruktiv interferieren zu können. Dieser Abstand beträgt ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge der Strahlen. Dabei interferieren die Strahlen zwischen der ersten und der zweiten Ebene des Gitters (siehe Abbildung 16)

Die obige Beziehung, die sogenannte Bragg-Gleichung, wurde nach ihrem Entdecker William Lawrence Bragg benannt, der zusammen mit seinem Vater William Henry Bragg Versuche mit Röntgenstrahlen durchführte. Die Methode wird dazu verwendet, Kristallstrukturen verschiedener Materialien zu untersuchen, bei denen andere Versuchsmethoden wie z. B. mit Licht, scheitern. [Gia08]

4. Ultraschall zum Eigenbau

Ein Artikel auf der Internetseite www.physiktreff.de wirbt mit dem Titel: „Ultraschall: Sender und Empfänger für 35€“ [Phy] und führt weiter aus mit den gebauten Geräten „müheles stehende Wellen, Schwebungen, Interferenz mit zwei oder mehr Erregern und der Doppler-Effekt [...]“ untersuchen zu können. Dabei wird auf Artikel in der Zeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule“ (PdN-PiS.1-3/38; Jg.1989) von Bernhard Ehret Stellung genommen. So sei es durch günstiges Einkaufen möglich, mit diesem geringen Kostenaufwand sinnvolle, schultaugliche Versuche mit Ultraschall durchzuführen. Der Artikel aus (PdN-PiS.2/38; Jg.1989) [Ehr01] ist die Grundlage für das weitere Vorgehen. Es werden, genau wie beschrieben, ein Ultraschallsender und –empfänger gebaut und entsprechende Versuche mit den Geräten durchgeführt. Die weiteren in der gleichen Zeitschrift veröffentlichten Artikel vom selben Autor zu verschiedenen Versuchsmöglichkeiten mit den Geräten dienen dabei als Inspiration für die Experimente.

4.1 Bau von Ultraschallsender und -empfänger

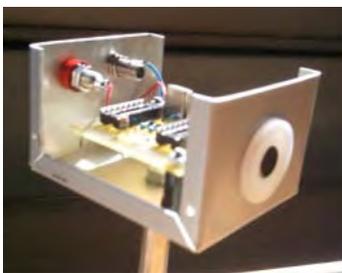


Abbildung 19: Ultraschallsender (US), offen

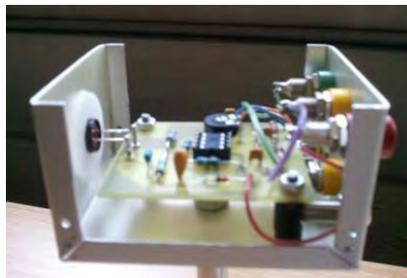


Abbildung 17: Ultraschallempfänger (UE), offen

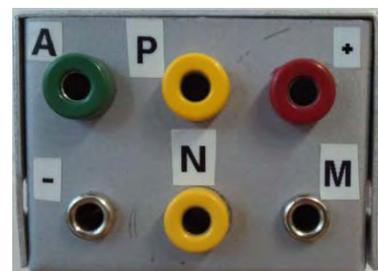


Abbildung 18: Ultraschallempfänger, Rückseite

Das Herz von Ultraschallsender und –empfänger bilden zwei piezoelektrische Ultraschallwandler für die Schallerzeugung bzw. -aufnahme. Diese sind in einem Aluminiumgehäuse eingearbeitet und mit einer, im Gehäuse befestigten, Platine verbunden. Auf der Rückseite des Gehäuses befinden sich diverse Bananenbuchsen, die für den Anschluss an Spannungsquelle und Messgerät benötigt werden. Die Geräte werden über die „+“ und „-“ –Buchse mit einer Spannung von etwa 10 V betrieben. Der Ultraschallempfänger verfügt außerdem über zwei Paar weiterer Buchsen, welche zur Analyse des empfangenen Schalls dienen. Dabei kann zwischen der durch den aufgenommenen Schall am Wandler erzeugten Wechselspannung (Anschlüsse A und M) und einer Gleichspannung,

welche die Amplitude der Wechselspannung und damit die Schallintensität angibt (Anschlüsse P und N), ausgewählt werden. Beide Gehäuse sind mit einer Stativstange ausgestattet, die eine vielseitige Befestigung ermöglicht. Im Weiteren wird nun, anhand des angegebenen Artikels, der Bau der Geräte erläutert.

Der Artikel von Bernhard Ehret beginnt ohne einführende Worte direkt mit der schrittweisen Bauanleitung der Geräte. Die einzelnen Arbeitsgänge sind sehr kurz und präzise beschrieben, ermöglichen daher eine genaue Vorgehensweise. Eine Stückliste mit benötigten Bauteilen, sowie ein Bestückungsplan erleichtern das Bauen und geben die nötige Orientierung. Die im Text eingegliederten Photographien der fertigen Platinen und Gehäuse sind durch die geringe Bildqualität nur bedingt zu gebrauchen. Als Veranschaulichung sind sie aber insgesamt von Vorteil. Am Ende des Artikels sind Platinenvorlagen in passendem Maßstab abgedruckt, die zum Ätzen der Platinen benötigt werden. Dadurch wird der eigentliche Bau stark vereinfacht, ein mühsames Verschalten einer Lochrasterplatte kann vermieden werden. Gleichzeitig sind die Vorlagen nötig, da in dem Artikel selbst keine Schaltskizze für die Schaltung von Sender und Empfänger vorhanden sind. Diese finden sich allerdings in den vorhergehenden Artikeln „Interferenz mit Ultraschall“ [Ehr02] und „Dopplereffekt mit Ultraschall“ [Ehr03], die auf der Homepage vom Autor zum Download bereit stehen.

Zunächst wird erklärt, wie die einfachen Ultraschallsender und -empfänger gebaut werden. Dazu benötigt man zuerst die geätzten Platinen, die nach und nach bestückt werden. Die Bohrungen sind gekennzeichnet, weitestgehend sind Bohrlöcher mit 0.5 mm Durchmesser vorgesehen. An bestimmten Stellen muss das Loch auf 0.7 mm bzw. 1.2 mm aufgebohrt werden. Die Bestückung geschieht nach einer bestimmten Reihenfolge, angefangen bei Widerständen, über Dioden, Kondensatoren und Steckplätze für logische Schaltungen (IC's). Zusätzlich dazu wird auf der Senderplatine der Quarz eingebaut. Dieser liefert die benötigte Wechselspannung im Frequenzbereich von 40 kHz. Die Widerstände müssen dabei anhand des aufgedruckten Farbcodes analysiert werden, um ihre Widerstandswerte zu ermitteln. Da die Widerstände eine hohe thermische Belastbarkeit besitzen, muss beim Anlöten nicht sonderlich vorsichtig gearbeitet werden. Im Gegensatz dazu dürfen die Dioden, nachdem sie richtig herum in die Platine eingesetzt sind, nur möglichst kurz mit dem LötKolben in Berührung kommen. Die Polung der Dioden wird

durch einen gedruckten Balken dargestellt, auf Diode und Bestückungsplan sichtbar. Dieser gibt an, auf welcher Seite sich die Kathode befindet. Die Zehnerdiode in der Schaltung des Senders dient als Überspannungsschutz und wird bei einer Spannung über 15 V zum Nicht-Leiter. Beim Empfänger werden vier Dioden als Gleichrichter verwendet.

Die meisten Kondensatoren haben keine bestimmte Einbaurichtung, Keramik-Kondensatoren funktionieren wie klassische Plattenkondensatoren beidseitig. Nur beim Elektrolytkondensator muss auf die Polung geachtet werden. Schließt man diesen verkehrt herum an, so kann es vorkommen, dass das Elektrolyt austritt und – bei sehr hoher Spannung – der Kondensator explodiert. In Jedem Fall geht der Kondensator bei falscher Polung kaputt. Auch hier gibt eine Markierung die Einbaurichtung an. Zuletzt werden die Steckplätze für die logischen Schaltungen (IC's) eingesetzt und verlötet. Dabei ist darauf zu achten, dass nur die auf der Platine gekennzeichneten Verbindungen verlötet werden und nicht durch zu viel Lötzinn weitere hergestellt werden. Das Drehpotentiometer in der Schaltung des Empfängers, welches zur Regelung der Spannung dient und somit vor Übersteuerung schützt, muss in die aufgebohrten Löcher gesetzt werden. Beim Bohren ist dabei zu beachten, dass die Kupferbahnen auf der Platine nicht beschädigt werden. Ebenfalls in aufgebohrte Löcher werden die Lötstifte gesetzt, an denen später die Ultraschallwandler befestigt werden. Alternativ zu den Lötstiften kann auch versilberter Draht mit gleichem Durchmesser verwendet werden. Dieser ist stabil genug um die Wandler an Ort und Stelle festzuhalten, kann aber dennoch in die gewünschte Form gebogen werden. Nun werden die benötigten Kabel für die Anschlüsse an die Bananenstecker auf der Platine angelötet.

Anschließend nimmt man sich die Aluminiumgehäuse, Modell Teko2, vor, in welche Sender- und Empfängerplatine später eingesetzt werden. Es empfiehlt sich, bevor man mit den Lötarbeiten beginnt, die Löcher an zwei Ecken der Platinen zu kontrollieren, die zur Befestigung am Boden der Gehäuse dienen. Es ist leichter, die unbestückte Platine auf die Gehäuseunterlage zu legen und die Mittelpunkte der Löcher für die Bohrung in der unteren Aluminiumplatte zu markieren. Zwar liegt der Anleitung auch eine Gehäuseschablone bei, diese ist jedoch nicht exakt maßstabsgetreu und ermöglicht kein präzises Setzen der benötigten Löcher. Versucht man mit der bestückten Platine die Löcher passgenau zu setzen, erweist sich dies als relativ schwierig.

Die Gehäuse bestehen aus Aluminiumblech der Stärke 1 mm und sind ebenfalls günstig zu erwerben. Die einzelnen Löcher werden zunächst mit Hilfe der Schablonen oder der Platine markiert und anschließend mit immer größer werdenden Bohrern gesetzt. Hier ist es notwendig, eine feste Apparatur mit senkbarer Bohrmaschine zu benutzen. Per Hand erreicht man bei kleineren Löchern auch brauchbare Ergebnisse, jedoch ist eine Bohrung mit Halterung genauer. Es wird in der Anleitung darauf hingewiesen, dass beim Bohren von Aluminiumblech mit Bohrern über 5 mm zusätzlich Ethanol als Schmiermittel und zur Kühlung benutzt werden sollte. Durch die entstehende Reibung erhöht sich die Temperatur des Blechs enorm und kann so reduziert werden. Alternativ dazu verwendet man sehr scharfe Bohrer und eine geringere Drehzahl der Bohrmaschine. Das dünne Blech verformt sich zusätzlich sehr leicht, weshalb generell sehr vorsichtig gearbeitet werden muss. Die Größe der Löcher ist auf der Schablone angegeben, besser ist aber durch Einsetzen der Bananenbuchsen und der Gehäuseschrauben die richtige Größe zu ermitteln. Die Angaben weichen leicht von den realen Bauteilen ab. Abschließend werden die entstehenden Grate am Rand der Löcher mit einer scharfen Klinge oder einem Gratschneider beseitigt und die Buchsen eingesetzt. Nach Anweisung des Autors sollte man die Bananenbuchsen mit Zwei-Komponenten-Kleber fixieren, alternativ reichen aber auch die vorhandenen Muttern zum Festziehen und Kontern aus. Ein großes Loch an der Unterseite der Gehäuse dient zum Befestigen einer Stativstange. Entweder verwendet man dazu Sekundenkleber, wie in der Anleitung beschrieben, oder man behilft sich mit Stativstangen, in die auf der einen Seite ein Gewinde geschnitten ist. Dieses führt man durch das Loch und fixiert die Stange mit einer einfachen Mutter.

Die Platinen werden nun mit jeweils zwei Schrauben im Inneren der Gehäuse verschraubt. Abstandshalter aus Kunststoff oder Messing halten die Platinen an der gewünschten Position. Die Drähte werden mit den Bananenbuchsen verbunden. Danach führt man die piezoelektrischen Ultraschallwandler durch die gebohrten oder gestanzten Löcher mit 18 mm Durchmesser und lötet sie an die vorgesehenen Lötstife bzw. an den Silberdraht.

Als letztes werden die logischen Schaltungen in die dafür vorgesehenen Steckplätze eingesetzt und das Gehäuse geschlossen. Beim Einsetzen der IC's gibt eine Nut in Bauteil und Bestückungsplan die geforderte Richtung an.

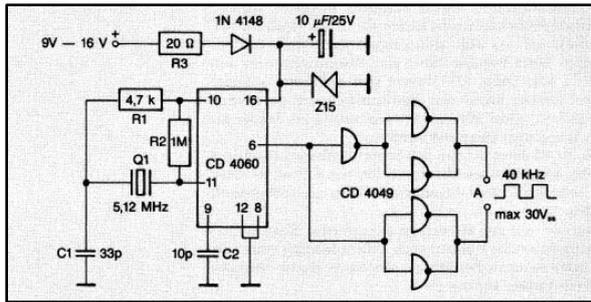


Abbildung 21: Schaltplan Ultraschallsender [Ehr02]

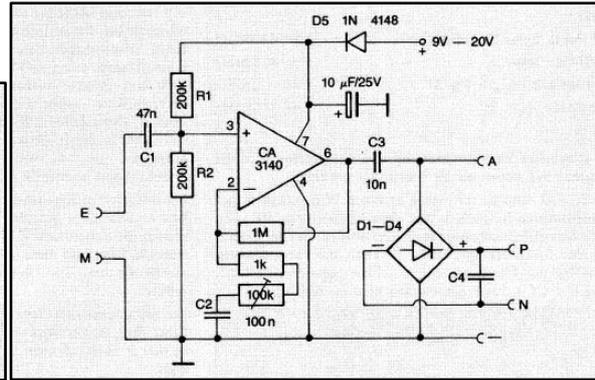


Abbildung 20: Schaltplan Ultraschallempfänger [Ehr02]

4.2 Messmethoden und -geräte

Für die Versuche werden verschiedene Messgeräte und -methoden verwendet. Dabei kann man zwischen zwei wesentlichen Verfahrensweisen unterscheiden: Die klassische und die mit neuer Technologie.

Die Messgeräte der klassischen Methode sind einerseits ein Voltmeter bzw. Multimeter für die Messung der Gleichspannung und andererseits ein Oszilloskop und ein Frequenzmessgerät für die Analyse der Wechselspannung.

Die hier verwendeten Geräte sind ein digitales Multimeter der Firma Metex, Modell ME-31, ein analoges 20Mhz Oszilloskop der Firma Hameg, Modell Hm 203.5 und ein Frequenzmesser von Philips, Modell Pm 6667.



Abbildung 24: Multimeter ME-31



Abbildung 23: Oszilloskop Hm 203.5



Abbildung 22: Frequenzmesser Pm 6667

Bemerkung: Manche der im Folgenden dargestellten Bilder wurden mit einem digitalen Oszilloskop aufgenommen.

Das Oszilloskop besitzt zwei Kanäle und kann parallel zwei Signale untersuchen. Über BNC-Buchsen verbindet man die zu untersuchenden Geräte mit dem Oszilloskop oder dem Frequenzmesser. Das Multimeter wird über Bananenstecker verbunden.



Abbildung 25: TI-Voyage 200™ [TI-1]



Abbildung 26: CBL 2 [TI-2]

Eine andere Möglichkeit liefert die neue Technologie mit grafikfähigen Taschenrechnern. Diese werden zum Aufnehmen und zur Analyse der Daten verwendet und bieten eine Vielfalt von Anwendungsgebieten. Die hier verwendeten

Rechner sind der TI-Voyage 200™ und der TI-Nspire CAS CX™ mit den zugehörigen Messsensoren. Beim TI-Voyage werden über die Schnittstelle „CBL 2“ (Calculator-Based-Laboratory) die Messsensoren an den Taschenrechner angeschlossen und mit dem vorinstallierten Programm „DataMate“ Messwerte aufgenommen. Es können gleichzeitig bis zu vier

Sensoren an die Schnittstelle angeschlossen werden. Die Software erkennt automatisch die angeschlossenen Sensoren und gibt dafür mögliche Messmethoden vor. Die einzelnen Messungen erfolgen dann automatisch, anschließend können die Daten in einem Graphikfenster analysiert werden. Dazu stellt die Software verschiedene Tools bereit. Für eine erneute Messung muss das Programm dann in die Ausgangsseite zurück navigiert werden.

Der TI-Nspire benötigt für das Anschließen der Sensoren die Schnittstelle Vernier EasyLink™. Diese verbindet jeweils nur einen Messsensor mit dem Taschenrechner, welcher aber auch direkt erkannt wird. Der Rechner besitzt verschieden *Applikationen* die zur Aufnahme und Analyse der Daten bereit stehen. Extra für wissenschaftliche Messungen wurde die *Applikation* „Vernier DataQuest“ hinzugefügt. Diese beinhaltet drei Fenster, eines zur Anzeige des aktuellen Messwerts und der Messmethode (Modus), ein Graphikfenster und eine Wertetabelle, in die die aufgenommen Messwerte direkt übertragen werden. Genau wie beim TI-Voyage stehen auch hier



Abbildung 27: TI-Nspire CX CAS™

verschiedene Messmethoden zur Verfügung, je nach gewünschter Anwendung. Die wichtigsten sind hierbei die automatische Messwerverfassung („zeitbasiert“), bei der in einem ausgewählten Zeitraum mit bestimmter Geschwindigkeit Daten aufgenommen werden. Die Daten können anschließend direkt im Graphikfenster betrachtet werden. Im Modus „Ausgewählte Ereignisse“ wird per Tastendruck der derzeit angezeigte Messwert erfasst, alternativ dazu kann der Wert auch über 10s gemittelt werden. Je nach Schwankung des aufzunehmenden Wertes bietet sich die eine oder die andere Methode an. Die Daten können dann in den verschiedenen Applikationen verwendet und ausgewertet werden. Zusätzlich dazu kann über den Verbindungslink „Vernier GOLink“ mit der entsprechenden Software die Messung mit einem PC gemacht werden.

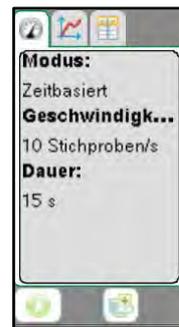


Abbildung 28: Vernier DataQuest



Abbildung 31: Vernier EasyLink® [Ver]



Abbildung 30: Vernier GoLink® [Ver]



Abbildung 29: CBR II [TI-3]

Die verwendeten Messsensoren sind bei beiden Taschenrechnern der Spannungssensor „VP-BTA Voltage Probe“ zur Erfassung der Gleichspannung und der Abstandssensor „CBL II“ (Calculator Based Ranger) zur Aufnahme der Geschwindigkeit einer Bewegung. Die Frequenz im Ultraschallbereich kann mit den Taschenrechnern nicht ermittelt werden, dazu stehen keine Sensoren zur Verfügung.



Abbildung 32: Voltage Probe [CTI]

Die Analyse der Messwerte geschieht entweder mit der Software des Taschenrechners oder mit einer Tabellenkalkulation bzw. einem wissenschaftlichen Analyseprogramm, in diesem Fall „Microsoft Excel 2007“ und „OriginLab OriginPro 8.5.1“.

5. Versuchsreihe mit Ultraschallsender und –empfänger

Im Folgenden werden einige Versuche vorgestellt, die mit den gebauten Geräten möglich sind.

5.1 Erste Versuche mit Sender und Empfänger

Die ersten Versuche mit den Bauteilen dienten dazu, sich mit den Geräten vertraut zu machen und ihre Funktionsweise zu verstehen. Dazu wurde zunächst der Sender mit einer Gleichspannung von $U=10V$ betrieben. Die beiden Enden, an denen der Wandler mit der Platine verbunden ist, wurden über Klemmen und Kabel mit Bananensteckern mit einem Oszilloskop verbunden. Nach Angabe des Autors sollte nun ein Rechtecksignal zu sehen sein. Das entstehende Bild ist in Abbildung 34 dargestellt. Man kann eine

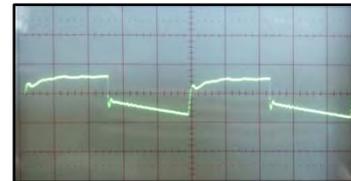


Abbildung 33:
Rechteckspannung am
Oszilloskop

alternierende Spannung erkennen, die Form des Signals ist jedoch nicht rechteckig. Überprüfungen ergaben, dass die

korrekte Rechteckspannung nur zu sehen ist, wenn die

„Spannungsversorgung des Senders massefrei [ist]“ [Ehr01, S.35]. Die korrekte Rechteckspannung ist in Abbildung 36 zu sehen.

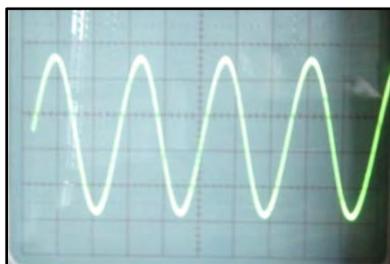


Abbildung 34: Sinusförmige
Spannung am Oszilloskop

Anschließend wurden Sender und Empfänger in einer Distanz von ca. 2m auf einer optischen Bank platziert und über einen Gleichstromgenerator mit $U=10V$ betrieben. Das Oszilloskop wurde dann an die Wechselspannungsbuchsen angeschlossen und zeigte die erwartete Sinuskurve. (Abbildung 33) Das

Potentiometer auf der Platine des Empfängers ermöglichte dabei die Spannung derart zu verringern, dass keine Übersteuerung auftrat. Diese ist sichtbar durch eine an den Spitzen abgeschnittene Sinuskurve, trat allerdings beim Abstand von 2m zwischen Sender und Empfänger nicht auf. Mit Hilfe der Bilder am Oszilloskop konnte die Frequenz des gesendeten und empfangenen Schalls bestimmt werden. Dazu misst man die Länge einer Periode L , multipliziert diese mit dem am Oszillator eingestellten Zeitkoeffizienten Z und bildet daraus den Kehrwert:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{L \cdot Z}$$

(Ham, S.5). Für die dargestellten Bilder erhält man $f_{generator} = 41.32kHz$ und $f_{Empfänger} = 41.24kHz$. Die Werte sollten eigentlich bei $f = 40kHz$ liegen, weichen

aber aufgrund der dürftigen Bestimmungsmethode der Frequenz leicht davon ab. Schließt man an Stelle des Oszilloskops einen Frequenzmesser an die Ausgänge, erhält man eine Frequenz von $f = 40.021\text{kHz}$. Diese wird für die folgenden Berechnungen verwendet.

5.1.1 Messung der Schallgeschwindigkeit:

Um die Schallgeschwindigkeit zu ermitteln, wird das Prinzip der stehenden Welle benutzt. Dazu wird die Wellenlänge der stehenden Welle zwischen Ultraschallsender und -empfänger ermittelt um aus dieser mit Hilfe der Frequenz des Schalls die Schallgeschwindigkeit zu errechnen.

Versuchsaufbau:

Sender und Empfänger sind auf einer optischen Bank aufeinander ausgerichtet. An beide wird eine Spannung in Höhe von $U = 10\text{V}$ angelegt. Über die Wechselspannungsbuchsen (Empfänger) und eine Klemme (Sender) werden sie an ein



Abbildung 35: Versuchsaufbau Schallgeschwindigkeit

Oszilloskop angeschlossen. Die Entfernung zwischen Sender und Empfänger wird mit der Skala auf der optischen Bank oder mit einem Lineal gemessen. Der Abstand beträgt zu Anfang $l = 0.3\text{m}$

Versuchsdurchführung:

Spannungsquelle und Oszilloskop werden eingeschaltet. Der Zeitkoeffizient für beide Kanäle wird identisch gewählt. Die Skalierung der Spannung wird so eingestellt, dass

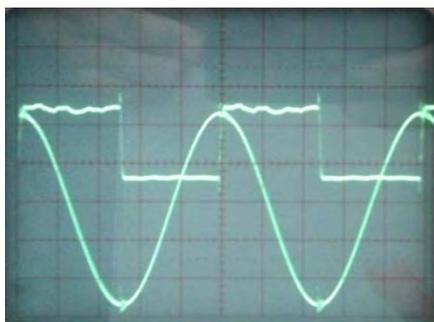


Abbildung 36: Signal von UE und UG

die Signale von Sender und Empfänger deutlich zu erkennen sind. Eine gleich hohe Amplitude ist nicht notwendig. Man erkennt auf dem Oszilloskop die übereinanderliegenden Bilder von Rechteckspannung (Sender) und Wechselspannung (Empfänger). Nun wird der Sender so weit vom Empfänger weg bewegt, dass der Graph der

Wechselspannung genau eine Periode auf dem Bild des Oszilloskops beschreibt. Die neue Position des Empfängers wird abgelesen. Dieser Vorgang wird ca. 20-mal wiederholt.

Auswertung:

Die aufgenommenen Messwerte werden in ein Analyseprogramm eingefügt und der Mittelwert der Wellenlängen wird gebildet. Dabei kann entweder über eine entsprechende Formel das arithmetische Mittel $\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i$ berechnet oder per Auftragen in ein Diagramm durch lineare Anpassung gemittelt werden.

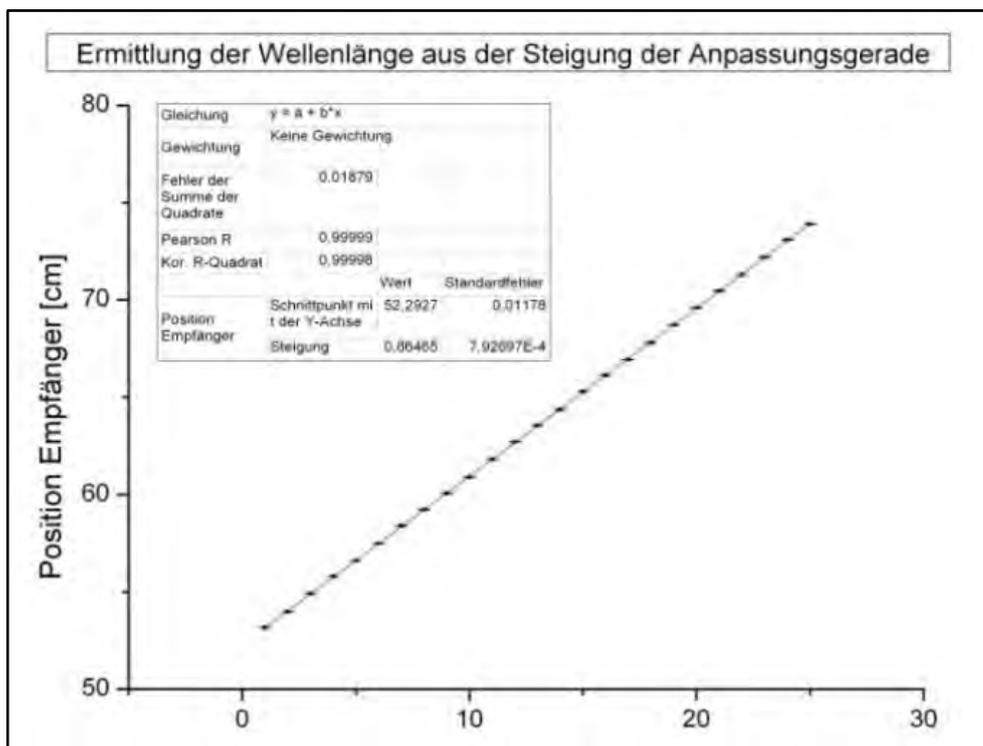


Abbildung 37: Lineare Anpassung der Wellenlänge

Die aufgenommenen Werte ergaben folgende Ergebnisse:

Steigung der Anpassungsgerade

$$\lambda = 0,0086465 \pm 7,9 \cdot 10^{-6} m.$$

Mit

$$f = 40,021 kHz$$

folgt

$$c = \lambda \cdot f = 346,042 \pm 0,316 \frac{m}{s}.$$

Die Temperatur zur Zeit der Messung wurde auf $T=22^{\circ}C$ geschätzt. Somit beträgt die errechnete Schallgeschwindigkeit

$$c = (331 + 0.6 \cdot T) \frac{m}{s} = 344.2 \frac{m}{s}.$$

Die Abweichung zum gemessenen Wert und der relative Fehler betragen

$$\Delta c_{\text{Absolut}} = 1.842 \frac{m}{s}, \Delta c_{\text{relativ}} = 0.535\%.$$

Demnach ist die Messung der Schallgeschwindigkeit mit dieser Methode sehr genau, da der relative Fehler unter einem Prozent liegt.

5.1.2 Bestimmung der Dämpfung und Abstrahlcharakteristik

Für die weiteren Versuche ist es wichtig zu wissen, wie groß die Sendeleistung des Ultraschallsignals ist und welchen Winkel in Ausbreitung und Aufnahme des Schallpegels die gebauten Geräte besitzen. Weiter interessiert die Dämpfung des Signals, um Aussagen über verschiedene Abstände zwischen Sender und Empfänger zu treffen. Wie weit kann der Abstand sein, sodass noch sinnvolle Messwerte aufgenommen werden? Wie entscheidend ist es, beide genau senkrecht aufeinander auszurichten und unter welchem Winkel können die Messungen erfolgen?

Bestimmung der Dämpfung

Versuchsaufbau:

Sender und Empfänger werden auf der optischen Bank platziert und aufeinander ausgerichtet. Die Spannungsversorgung geschieht über einen Konstanter mit der Spannung $U = 10V$. Die Ausgänge für Gleichspannung am Empfänger werden mit einem Voltmeter (Multimeter) verbunden. Ein Oszilloskop dient dabei als Überprüfung der Übersteuerung des Empfängers. Um ein möglichst störungsfreies Umfeld zu erhalten, wird der Aufbau seitlich durch eine Acrylglaswand begrenzt.

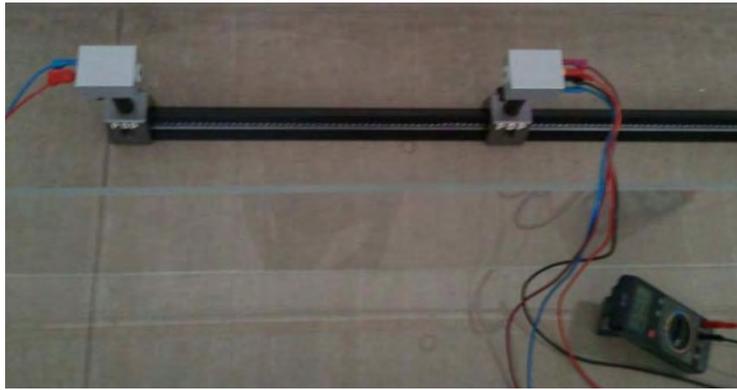


Abbildung 38: Versuchsaufbau Dämpfungsmessung

Versuchsdurchführung:

Der erste Abstand zwischen Sender und Empfänger wird so gewählt, dass das Signal nicht übersteuert wird. Dieses wird mit Hilfe des Oszilloskop überprüft. Die Distanz beträgt zunächst $l = 0,5\text{m}$ und wird in Schritten von $\Delta l = 0,05\text{m}$ erhöht. Dabei wird jeweils die Spannung als Indikator der Schalldruckintensität gemessen. Die maximale Distanz zwischen Sender und Empfänger betrage etwa $l_{max} = 0,7\text{m}$.

Messung und Auswertung:

Die eigentlich recht simpel gehaltene Messung beinhaltete trotzdem einige Probleme. Die Spannung am Messgerät schwankte so stark, dass lediglich ein intuitiver Mittelwert gebildet werden konnte. Qualitativ konnte die Spannung somit bestimmt werden, quantitativ sind die erhaltenen Ergebnisse jedoch nicht zu gebrauchen.

Abbildung 38 zeigt den Verlauf der Spannung bei Vergrößerung der Entfernung. Man erkennt zum einen den erwarteten Abfall der Spannung über den gesamten Bereich. Gleichzeitig ist aber deutlich eine wellenförmige Veränderung der Signalspannung auszumachen. Die Wellenlänge nimmt bei größerer Entfernung zu und kann daher nicht exakt bestimmt werden. Warum dieses Phänomen auftritt kann zu dieser Zeit

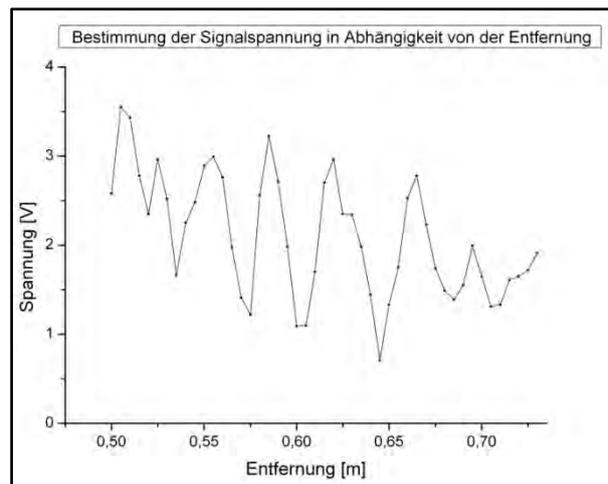


Abbildung 39: Messergebnisse Dämpfungsmessung

nicht erklärt werden. Zuerst könnte man vermuten, dass der Kurvenverlauf Hinweise auf eine Störung durch äußere Einflüsse zeigt. Eine weitere Messung ohne die Schutzwand ergab einen ähnlichen Kurvenverlauf der Spannung. Weiter könnte

aufgrund der geringen Maximalspannung, eine hohe Abweichung durch die ungeeigneten Wandler entstehen.

Bestimmung der Abstrahlcharakteristik

Versuchsaufbau:

Im ersten Versuchsteil ist der Ultraschallsender mit einer Stativklemme am Tischende befestigt und senkrecht zur Tischebene ausgerichtet. Der Empfänger wird auf einem Reiter über einen Winkelmesser bewegt, der auf dem Tisch befestigt ist. Der Abstand zwischen Sender und Empfänger beträgt permanent



Abbildung 40: Versuchsaufbau Winkelabhängigkeit

$l = 25\text{cm}$. Die Spannungsversorgung geschieht wieder über zwei Konstanter, $U = 10\text{V}$. Die Gleichspannung am Empfänger wird mit einem Multimeter gemessen.

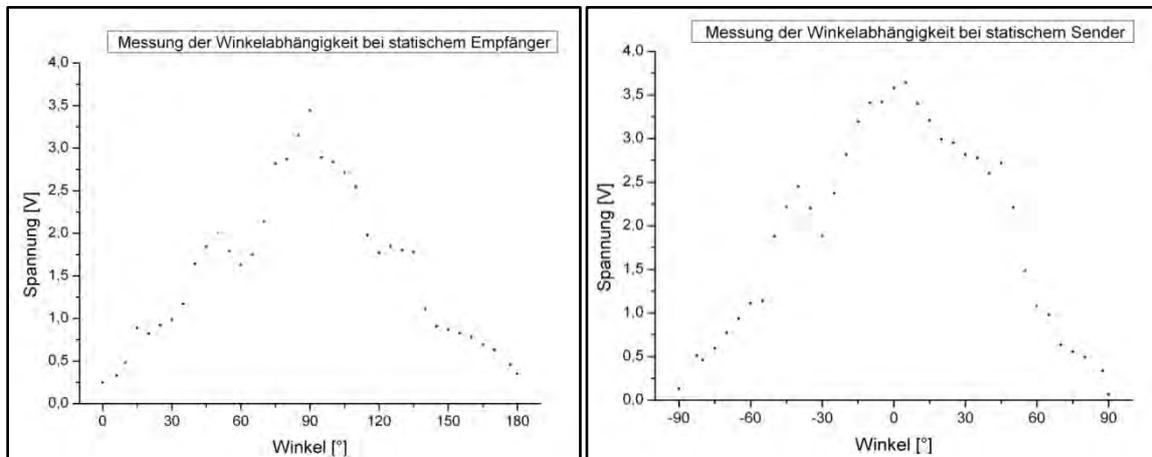
Im zweiten Versuchsteil fixiert man den Empfänger am Tischende, der Sender wird auf einem Reiter befestigt. Um die Einflüsse von Schallwellen aus dem Umfeld abzuschirmen, werden Styroporplatten als Schallschutz aufgestellt.

Versuchsdurchführung:

Zunächst positioniert man Sender und Empfänger direkt gegenüber, um möglichst genau die Ausrichtung zu kalibrieren. Dann bewegt man den auf dem Reiter befestigten Wandler - Sender oder Empfänger - über den Winkelmesser. Im Abstand von 5° wird die Spannung gemessen und in ein Graphikprogramm übertragen. Beim Auftragen wählt man entweder eine Skala von -90° bis 90° mit der senkrechten Ausrichtung beider Geräte bei 0° oder man trägt den am Winkelmesser abgelesenen Winkel auf und erhält eine Skalierung von 0° bis 180° . Bei 90° stehen sich dann Sender und Empfänger senkrecht gegenüber.

Auswertung der Ergebnisse:

Die beiden dargestellten Abbildungen 41 und 42 zeigen den Verlauf der Spannung für unbewegten Sender und Empfänger.



**Abbildung 42: Messergebnisse
Abstrahlcharakteristik bei statischem Empfänger**

**Abbildung 41: Messergebnisse
Abstrahlcharakteristik bei statischem Sender**

Man erkennt deutlich, dass das Maximum der Schallintensität bei etwa 0° also bei senkrechter Ausrichtung erreicht wird. Das Maximum beim statischen Sender ist jedoch um 5° verschoben, was auf eine nicht ideale Ausrichtung von Sender und Empfänger hinweist. Vergrößert man den Winkel zur Mittelachse, so nimmt die Spannung stetig ab. Der Verlauf ist jedoch nicht linear sondern zeigt diverse lokale Maxima bei bestimmten Winkeln. Besonders bei statischem Empfänger fällt auf, dass der Graph nicht symmetrisch zur Senkrechten ist, was zum einen durch die fehlerhafte Ausrichtung erklärbar ist. Zum anderen kann vermutet werden, dass der Ultraschallwandler des Senders keinen symmetrischen Schallpegel aussendet.

Die erkennbaren Intensitätsverläufe konnten anhand der Graphen nicht ausreichend erklärt werden. Bei der Messung der Spannung waren die Schwankungen bei den am Multimeter angezeigten Werte so groß, dass auch hier nur ein intuitiver Mittelwert gebildet werden konnte.

Zusammenfassung und Begründung des weiteren Vorgehens:

Die Messung der Dämpfung und der Strahlungscharakteristik von Sender und Empfänger konnten keine quantitativen Ergebnisse erbringen. Zum einen lag das an der Schwierigkeit, beide Wandler genau aufeinander auszurichten. Zum anderen beeinträchtigt die Schwankung der Messwerte eine sinnvolle Aussage. Qualitativ kann aus den Versuchen gefolgert werden, dass eine Abschwächung der

Schallintensität durch Absorption des Übertragungsmediums auftritt. Weiter ist die Schallausbreitung abhängig vom Winkel zwischen Sender und Empfänger und ist für eine senkrechte Ausrichtung maximal. Aufgrund der großen Fehler in der Spannungsmessung wurden im weiteren Vorgehen die Ultraschallwandler ausgetauscht um bessere Ergebnisse zu erzielen.

5.2 Veränderung der Wandler und Bau neuer Geräte

Die zuerst verwendeten piezoelektrischen Ultraschallwandler in Sender und Empfänger maßen einen Durchmesser von $d = 9\text{mm}$. Da die Löcher für die Wandler einen Durchmesser von 18 mm betragen, konnten andere Piezo-Wandler mit einem größeren Durchmesser ($d = 16\text{mm}$) eingebaut werden (siehe Abbildung 43).



Abbildung 43:
neuer Piezo-
Wandler

Neben diesem Austausch wurde eine neue Senderplatine mit den oben beschriebenen Bauteilen bestückt, die zusätzlich über einen Drehkondensator verfügt (siehe Abbildung 44 unten). Dieser wurde vor den IC 4060 geschaltet um die Spannung am Quarz zu erhöhen, damit dieser mit einer anderen Frequenz schwingt. Dadurch kann per Drehen des Kondensators eine andere Sendefrequenz erzeugt werden, die für die Darstellung einer Schwebung verwendet wird.



Abbildung 44: Veränderte Platine des UG mit Drehkondensator

Um Versuche zur Interferenz durchzuführen, wurden vier weitere Ultraschallwandler auf einer Lochrasterplatine in Reihe geschaltet und mit Schaltern versehen, um die Wandler an oder auszuschalten. Ein Drehpotentiometer, ebenfalls in Reihe geschaltet, ermöglichte, es die Spannung an den Bauteilen zu verringern, damit bei Verwendung aller vier Wandler der Empfänger nicht übersteuert wird. Die Verbindung dieser Schaltung mit dem Sendergehäuse geschieht über den Einbau

von Bananenbuchsen bzw. Bananensteckern. So kann die Lochrasterplatte direkt am Aluminiumgehäuse fixiert werden.

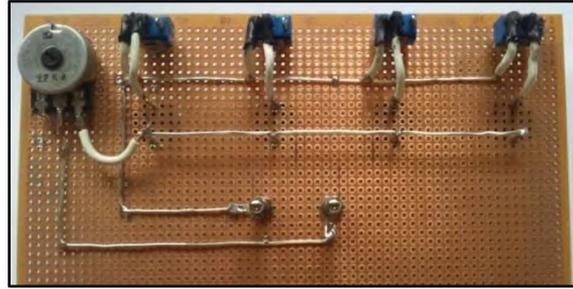


Abbildung 45: Lochrasterplatte mit vier Wandlern, hinten

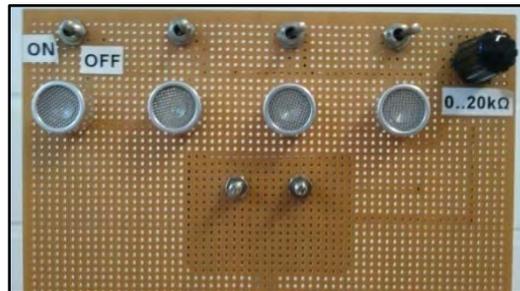


Abbildung 46: Lochrasterplatte mit vier Wandlern, vorne

5.3 Versuche mit neuen Wandlern:

Die Versuche zur Abstrahlcharakteristik und Dämpfung waren der Grund für den Austausch der Wandler. Daher werden zunächst die veränderten Geräte auf dieselbe Weise untersucht um Aussagen über die Nutzbarkeit der neuen Wandler machen zu können

5.3.1 Messung der Dämpfung:

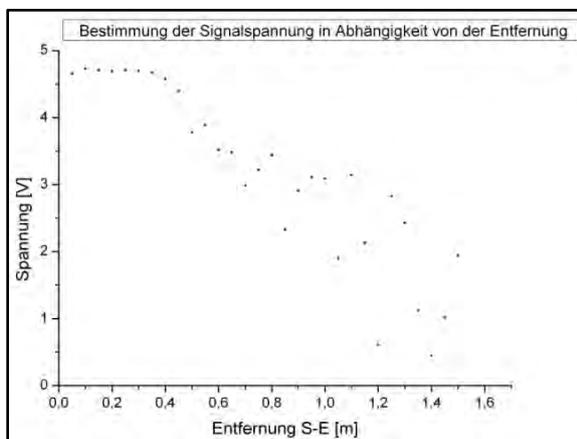


Abbildung 47: Messung Spannung in Abh. der Entfernung

Versuchsaufbau und Durchführung erfolgen zunächst genau wie oben beschrieben. Sender und Empfänger werden auf der optischen Bank platziert und die Spannung mit dem Voltmeter gemessen, während der Abstand vergrößert wird. Die Vermessung erfolgt zwischen 0.05 m und 1.5 m, jeweils im Abstand von 0.05 m. Abbildung 47 zeigt

die aufgenommenen Werte der Spannung in Abhängigkeit von der Entfernung. Man kann erkennen, dass die Spannung bis 0.4 m in etwa linear abnimmt und darüber hinaus annähernd exponentiell abnimmt, jedoch insgesamt eine große Streuung aufweist. Um diese Streuung genauer darzustellen, wird der Versuchsaufbau verändert.

Versuchsaufbau:

An Stelle einer optischen Bank wird nun eine elektrische Schienenbahn verwendet. Die Spannungsversorgung der Lokomotive, die auf den Schienen fährt, geschieht über einen Transformator, 0..22 V bei 1 A. Der Empfänger wird mit Reiter auf der Lokomotive gestellt und mit Klebeband fixiert. Der Sender wird in gleicher Höhe am Ende der Bahn positioniert. Der Abstand der beiden beträgt zunächst 0.25 m. Die Spannung wird mit dem TI-Nspire und dem angeschlossenen Sensor Voltage Probe gemessen. Der Messmodus wird auf „zeitbasiert“ eingestellt.



Abbildung 48:
Transformator



Abbildung 49: Versuchsaufbau Dämpfungsmessung

Versuchsdurchführung:

Als erstes wird die Geschwindigkeit der Bahn bestimmt. Dazu wird der Bewegungssensor CBR II am Ende der Bahn aufgestellt und über die Schnittstelle Vernier EasyLink mit dem TI-Nspire verbunden. Der Transformator der Schienenbahn kann über einen Drehknopf geregelt werden und wird für die Messung auf die erste Stufe gestellt. Gleichzeitig misst der CBR II den Abstand zwischen Bahn und Sensor, überträgt die Daten automatisch auf den TI-Nspire und berechnet daraus die Geschwindigkeit der Bahn.



Abbildung 50:
Bestimmung der
Bahngeschwindigkeit

Danach werden Sender und Empfänger auf Lokomotive und Waggon gestellt und aufeinander ausgerichtet. Während die Spannung am Empfänger gemessen wird, fährt die Lokomotive zurück. Der maximale Abstand beträgt etwa 2m. Die Messung dauert 5 s, pro Sekunde werden 20 Messwerte aufgenommen.

Auswertung der Ergebnisse

Die nebenstehende Graphik (Abbildung 51) zeigt den zeitlichen Verlauf der Bewegung bei Messung der Position und der daraus resultierenden Geschwindigkeit. Man kann erkennen, dass die Geschwindigkeit teilweise stark schwankt, in den beiden horizontalen Bereichen ist sie annähernd konstant und beträgt $v = 0.15 \frac{m}{s}$.

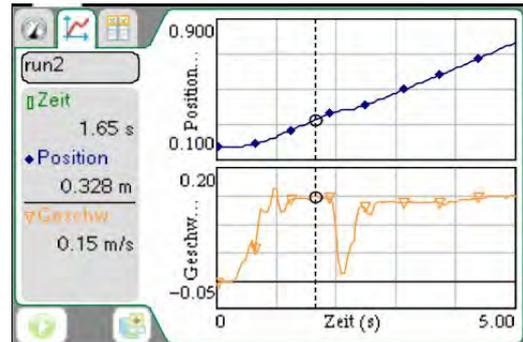


Abbildung 51: Messung der Geschwindigkeit

Die Schwankungen sind darauf zurückzuführen, dass die Position der sich bewegenden Lok teilweise zu ungenau erfasst wird. Durch die nicht plane Oberfläche der Lokomotive kommt es zu Streuungen des Ultraschallsignals, welche die Messung beeinflussen. Weiter sind Brechungen an umliegenden Gegenständen, z. B. Tischbeine, ein weiterer Störfaktor. Für die Auswertungen ist der ermittelte Wert der Geschwindigkeit jedoch ausreichend genau und da er durch mehrere Messreihen verifiziert wurde.

Die Analyse der Dämpfung ergab folgende Graphen.

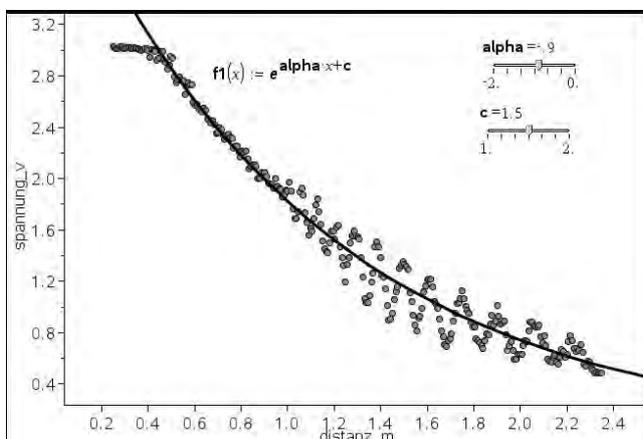


Abbildung 52: Interpolieren einer exponentiellen Kurve bei der Dämpfungsmessung

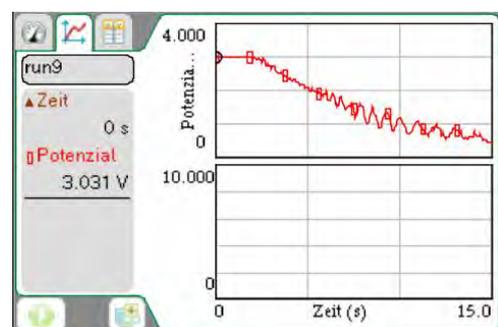


Abbildung 53: Messwerte der Spannung während der Bewegung

Der rechte, kleinere Graph ist die

Kurve der Spannung bei automatischer Messung über fünf Sekunden wie sie direkt nach der Durchführung angezeigt wird (Abbildung 53). Verwendet man die vorher berechnete Geschwindigkeit, kann ein Weg-Spannungs-Diagramm erstellt werden. Die Anfangswerte wurden dabei teilweise ausgeblendet, da die Bewegung der Bahn erst kurz nach Beginn der Messung einsetzte und die Bahn zunächst auf die konstante Geschwindigkeit beschleunigte. Nach einem nur geringen Abfall der Spannung in den ersten 40 Zentimetern, erkennt man einen exponentiellen Verlauf der Kurve. Der erste Bereich des Graphen deutet auf das sogenannte Nahfeld des Schallsenders hin. In diesem Bereich ist die Spannung nahezu konstant, der Schalldruck nimmt nur gering ab. Das folgende Fernfeld zeigt deutlich die exponentielle Absorption der Schallintensität. Diese ist mit Hilfe der Funktion $f_1(x) = e^{-\alpha x + c}$ modelliert (Abbildung 51), die Konstanten können dabei mit Hilfe von „Schiebereglern“ ermittelt werden. Allerdings weicht die gefundene Funktion zur Beschreibung der Dämpfung von der theoretisch zu Grunde liegenden ab, die bekanntlich ohne Konstante c formuliert wird (siehe 2.1). Nach der Gleichung zur Berechnung der gesamten Absorptionskonstanten α bei einer Raumtemperatur von $T = 22^\circ\text{C}$ beträgt diese

$$\alpha = \alpha_w + \alpha_v = \frac{\kappa - 1}{2\kappa} \cdot \frac{v\omega^2}{c_v\rho c^3} + \frac{2\eta\omega^2}{3\rho_0 c^3} = 0.02849$$

mit den Konstanten

$$\rho = 1.1957 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \eta = 0.0000182 \frac{\text{kg}}{\text{ms}}, \omega = 2\pi \cdot 40021 \text{kHz}, c_v = 717 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}},$$

$$c_p = 1004.89 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \quad v = 0.0254298 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}, \kappa = 1.40153, c = 344.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

(Win07, S.99, 102, [Sfn]). Demnach beträgt die gemessene Absorptionskonstante $\alpha = 0.9 + \frac{c}{x}$ ein Vielfaches der berechneten Konstante. Der Grund dafür liegt an der Vereinfachung der theoretischen Gleichung. Diese gilt wie beschrieben nur für einatomige Gase, also nicht für Gasgemische wie in diesem Fall Luft. Bei molekularen Gasen beträgt die Absorptionskonstante durch die zusätzliche Aufteilung und Umwandlung der Freiheitsgrade ein Vielfaches der in einatomigen Gasen gültiger Konstanten.

Anhand des Versuchs kann aber die exponentielle Natur der Absorption im Übertragungsmedium gezeigt werden. Die periodischen Schwankungen der Spannung, deutlich sichtbar ab einer Distanz von etwa 1m, können durch diese Gleichung jedoch nicht begründet werden. Die Wellenlänge dieser Periode ist nicht

konstant, sie beträgt im Mittel etwa 0.1m, zunehmend bei größerem Abstand. Folglich ist keine stehende Welle Ursache für das Phänomen. Wahrscheinlich wurde die erzeugte Schallwelle von den Wänden reflektiert und induziert dadurch eine Interferenz zwischen ausgesandter und reflektierter Welle welche diesen wellenförmigen Verlauf der Spannungskurve begründet. Folgemessungen ergaben ein ähnliches Schema, weshalb ein einfacher Messfehler nicht die Ursache sein kann. Ein weiterer Test konnte den Einfluss der durch die Fahrbahn entstehenden Geräusche auf die gemessene Schallamplitude ausschließen. Die dazu verwendete Messung der Schallintensität bei ausgeschaltetem Sender erbrachte keine nennenswerten Messwerte.

Die im ersten Versuch der Dämpfungsmessung mit den kleineren Ultraschallwandlern erhaltenen Ergebnisse stimmen insofern mit den neu gewonnenen Erkenntnissen überein. Die dort erkennbaren Schwankungen zeigen einen kleinen Bereich des Gesamtverlaufs der Schallabsorptionskurve.

5.3.2 Messung der Abstrahlcharakteristik

Genau wie mit den kleineren Ultraschallwandlern wird die Abstrahlcharakteristik der Schallintensität bei den neuen Bauteilen untersucht.

Versuchsaufbau und Durchführung1:

Sender und Empfänger werden wie beim ersten Mal im Abstand von 0.25 m an einem Winkelmesser positioniert. Die Spannungsversorgung mit $U = 10V$ erfolgt durch Konstanter, die Signalspannung wird mit einem Voltmeter gemessen.

Der auf dem Reiter fixierte Sender bzw. Empfänger wird über den Winkel bewegt und die Spannung gemessen. Dabei werden jeweils die Abstrahlcharakteristik der Signalspannung bei bewegtem Sender und statischem Empfänger, sowie bei bewegtem Empfänger und statischem Sender ermittelt.

Auswertung der Ergebnisse:

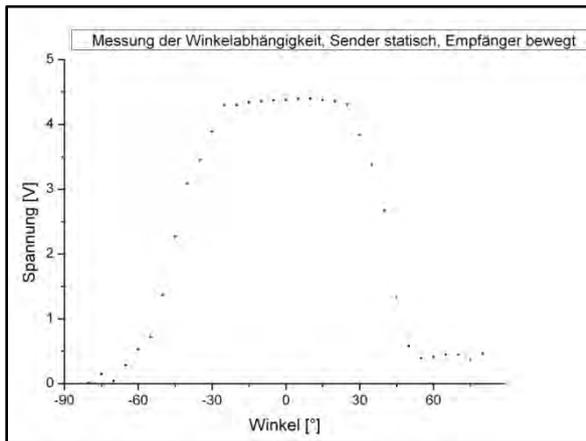


Abbildung 55: Messung der Abstrahlcharakteristik UE

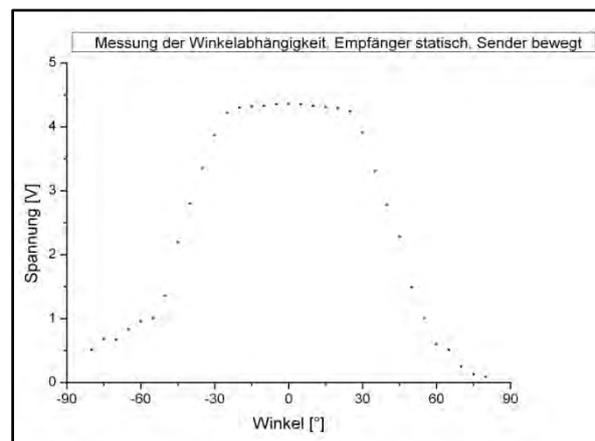


Abbildung 54: Messung der Abstrahlcharakteristik US

Anhand der Graphen (Abbildung 54 und 55) kann man erkennen, dass die Schallintensität im Bereich von -30° bis 30° nahezu konstant ist. Bei größerem Winkel nimmt die Intensität deutlich ab, bis zu einem Winkel von 58° sehr schnell, danach langsamer werdend. Dabei fällt auf, dass bei statischem Sender die maximale Intensität leicht um 0° nach rechts verschoben ist, was auf eine nicht exakt lotrechte Ausrichtung hinweist. Weiter sieht man, dass der Kurvenverlauf bei größeren Winkeln nicht symmetrisch ist, entweder durch nicht genaue Ausrichtung oder durch wandlerbedingte Verschiebung der Sendekeule verursacht. Diese Abweichung ist für die weiteren Versuche jedoch nebensächlich. Entscheidend ist die sehr konstante Schallintensität im Bereich von 0° , also der senkrechten Ausrichtung.

Durchführung 2:

Die ermittelten Werte der Abstrahlcharakteristik erfolgten bei einem Abstand von 0.25 m, also im nahen Umfeld des Senders. Als nächstes wird der Abstand zwischen Sender und Empfänger auf 0.5 m vergrößert und bei dieser Distanz die Abstrahlcharakteristik und die Schallintensität bei horizontaler Verschiebung des Empfängers analysiert. Dazu wird der Empfänger zuerst auf einer weiter entfernten Winkelskala und anschließend auf einer optischen Bank im Abstand von 0.5 m bewegt. Spannungsversorgung und –messung erfolgt wie bei Durchführung 1.

Auswertung der Ergebnisse:

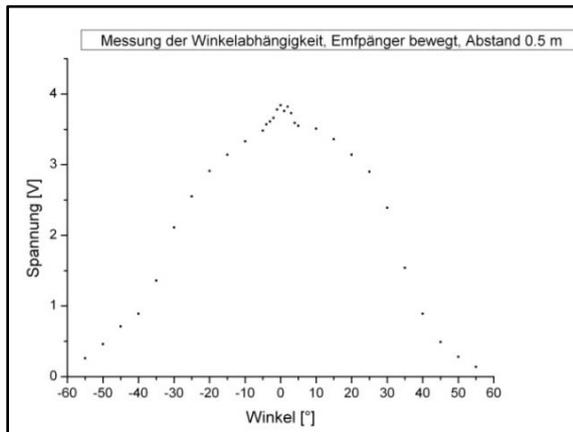


Abbildung 56: Messung der Abstrahlcharakteristik bei $d=0.5m$

Der Graph der Abstrahlcharakteristik zeigt die erwartete maximale Schallintensität bei senkrechter Ausrichtung. Die Abnahme erfolgt bei größerem Winkel nicht linear, sondern in Form einer Hyperbel mit einem Wendepunkt bei etwa $\pm 30^\circ$.

Vergleicht man die Abstrahlcharakteristik bei unterschiedlicher Entfernung (Abbildung 54 und 56), so fällt auf, dass die Schallintensität in beiden Fällen bei

senkrechter Ausrichtung maximal ist, die Breite des Bereichs größter Intensität aber in doppelter Entfernung viel geringer ist. Beim Abstand $d = 0.5m$ ist das Maximum auf wenige Grad beschränkt, im Vergleich dazu weist der Graph bei dem Abstand $d = 0.25m$ eine maximale Intensität im Winkel zwischen -30° und 30° auf. Dieser Winkelbereich zeigt auch bei größerer Entfernung eine hohe Schallintensität, allerdings mit einer hyperbelförmigen Abnahme.

Der Randbereich zwischen -30° und -60° bzw. 30° und 60° in Abbildung 56 zeigt eine ähnliche Abnahme der Intensität, wie der Randbereich in Abbildung 54 bei Winkeln kleiner als -30° bzw. größer als 30° . Bei kleinerer Entfernung ist der Verlauf des Graphen jedoch viel steiler, die Intensität nimmt demnach stärker ab.

Wir erhalten also in geringer Entfernung einen großen Winkelbereich maximaler Intensität, welcher auch bei größerer Entfernung eine hohe Intensität aufweist. Das Maximum bei doppelter Entfernung tritt allerdings nur innerhalb einer kleinen Umgebung der Mittelachse auf. Damit kann für den Pegel der Schallintensität geschlossen werden, dass dieser nah am Sender einen definierten Bereich konstanter Intensität aufweist, welcher in größerer Entfernung schmaler wird. Je größer der Winkel bezüglich der Mittelachse ist, desto geringer ist die Schallintensität. Diese Ergebnisse lassen sich nur im Ansatz mit der Richtcharakteristik eines Schallgebers (2.3) vergleichen. Der konstante Bereich kann Hinweise auf eine schmale Sendekeule geben, die bei größerer Entfernung zwischen Schallquelle und Empfänger zur Mitte zuläuft. Da aber auch im Bereich außerhalb dieser vermuteten Keule ein Schalldruck messbar ist, besonders bei größer werdender Entfernung, so kann zwar die größte Schallintensität innerhalb dieser

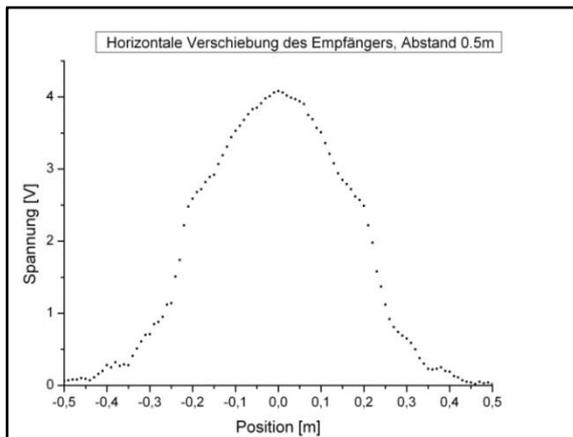


Abbildung 57: Messung der Intensität bei horizontaler Verschiebung

Messung auf der Mittelachse und eine Abschwächung in größerer Entfernung davon. Die Intensität nimmt wie bei der Abstrahlcharakteristik bei $d = 0.5m$ nicht linear sondern hyperbelförmig ab. Der Verlauf bestätigt die Annahme einer Schallintensitätskeule mit maximaler Intensität ansatzweise, weist aber wie oben auch eine weitere Ausbreitung der Schalldruckverteilung auf.

Keule gemessen werden. Der gesamte Schall breitet sich aber nicht nur innerhalb des durch die Richtcharakteristik definierten Bereichs aus. Diese dient also lediglich zur Vereinfachung der Darstellung des Schallpegels.

Die Abhängigkeit der Schallintensität bei horizontaler Verschiebung in Abbildung 57 zeigt, wie in den vorherigen Abbildungen, eine maximale Intensität bei

5.4 Weitere Versuche

Die vorangegangenen Versuche dienten vor allem dazu, die grundlegende Ausbreitung des Ultraschalls zu skizzieren. Aus ihnen lässt sich schließen, dass die Schalldruckintensität bei zunehmendem Abstand durch die Schallabsorption im Medium deutlich abnimmt. Weiter kann gefolgert werden, dass bei senkrechter Ausrichtung die besten Messergebnisse erzielt werden, durch die Winkelabhängigkeit der Intensitätsverteilung aber auch Messungen in einiger Entfernung vom Lot möglich sind. Im Weiteren werden nun Versuche vorgestellt, die Ultraschall als gerichtete Schallwelle ausnutzen um physikalische Phänomene von Wellen darzustellen.

5.4.1 Dopplereffekt

Versuchsaufbau:

Ultraschallsender und Empfänger werden auf der Schienenbahn platziert. Je nach Vorgehen ist einer der beiden statisch an einem Ort fixiert und der andere auf der Lokomotive beweglich angebracht. Der Wechselspannungsausgang des Empfängers wird an das Frequenzmessgerät angeschlossen. Die Spannungsversorgung beider Geräte kann wie gewohnt über zwei Konstanter erfolgen. Um eine größere Flexibilität zu ermöglichen, können Sender und Empfänger auch an eine 9V Blockbatterie angeschlossen werden. Die Geschwindigkeit der Lokomotive wird mit Hilfe des TI-Nspire bzw. des TI-Voyage und angeschlossenem Bewegungssensor CBL 2 gemessen, der dazu vor der Bahn platziert wird. (5.3.1, Abbildung 50)

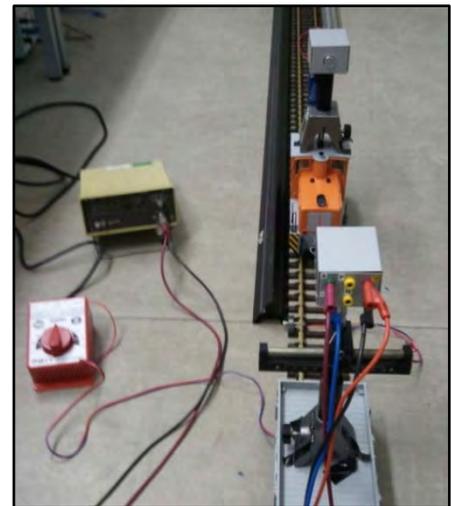


Abbildung 58: Versuchsaufbau
Dopplereffekt

Versuchsdurchführung:

Im ersten Versuchsteil zur Messung des Dopplereffekts wird die Schallquelle auf den Empfänger zu- bzw. von ihm wegbewegt. Die Lokomotive wird dazu über den Transformator mit einer stufenweise verstellbaren, konstanten Spannung betrieben. Die Geschwindigkeit der Lok, mit der sich der Sender bewegt, wird für drei

verschiedene Stufen ermittelt. Der Regler rastet jedoch nicht bei den einzelnen Stufen ein, es muss also möglichst genau auf die Pfeilrichtung des Drehknopfes geachtet werden. Anschließend misst man die Frequenz des empfangenen Schalls für die drei Geschwindigkeiten bei beiden Bewegungsrichtungen. Diese wird anschließend über mindestens fünf verschiedene Messungen gemittelt.

Im zweiten Versuchsteil bewegt sich der Empfänger auf die ruhende Schallquelle zu bzw. von ihr weg. Es wird ebenfalls die Frequenz bei drei verschiedenen Geschwindigkeiten gemessen und über mindestens fünf Messwerte gemittelt.

Für die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit wird die Umgebungstemperatur mit einem Thermometer gemessen.

Auswertung der Ergebnisse:

Die Umgebungstemperatur betrug zur Zeit der Messung $T=22^{\circ}\text{C}$. Die Berechnung der Schallgeschwindigkeit ergab demnach $c = 344.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Die Geschwindigkeit der Lokomotive beträgt für die drei eingestellten Stufen:

Stufe	Geschwindigkeit v
1	$0.15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
2	$0.39 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
3	$0.89 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Tabelle 2: Geschwindigkeit der Bewegung in Abh. der Stufen

Die Ergebnisse der Frequenzmessung des empfangenen Schalls sind in den folgenden Tabellen aufgeführt. Die Frequenz des gesendeten Schalls betrug $f = 40.021\text{kHz}$. Es wurde jeweils über fünf bis acht Messwerte gemittelt, je nach Übereinstimmung in den abgelesenen Frequenzwerten.

1. Bewegung des Senders auf den Empfänger zu

Geschwindigkeit	Mittelwert der gemessenen Frequenz [kHz]	Errechnete Frequenz [kHz]	Absoluter Fehler [Hz]	Relativer Fehler [%]
$0.15 \frac{m}{s}$	40,0380	40,0385	0,5	0,0012
$0.39 \frac{m}{s}$	40,0647	40,0664	1,7	0,0043
$0.89 \frac{m}{s}$	40,1216	40,1248	3,2	0,0080

Tabelle 3: Messwerte, Bewegung des Senders auf den Empfänger zu

2. Bewegung des Senders vom Empfänger weg

Geschwindigkeit	Mittelwert der gemessenen Frequenz [kHz]	Errechnete Frequenz [kHz]	Absoluter Fehler [Hz]	Relativer Fehler [%]
$0.15 \frac{m}{s}$	40,0026	40,0036	1	0,0023
$0.39 \frac{m}{s}$	39,9760	39,9757	0,3	0,0007
$0.89 \frac{m}{s}$	39,9191	39,9178	1,3	0,0032

Tabelle 4: Messwerte, Bewegung des Senders vom Empfänger fort

3. Bewegung des Empfängers auf den Sender zu

Geschwindigkeit	Mittelwert der gemessenen Frequenz [kHz]	Errechnete Frequenz [kHz]	Absoluter Fehler [Hz]	Relativer Fehler [%]
$0.15 \frac{m}{s}$	40,0387	40,0384	0,3	0,0006
$0.39 \frac{m}{s}$	40,0725	40,0663	6,2	0,0152
$0.89 \frac{m}{s}$	40,1209	40,1245	3,6	0,0036

Tabelle 5: Messwerte, Bewegung des Empfängers auf den Sender zu

4. Bewegung des Empfängers vom Sender fort

Geschwindigkeit	Mittelwert der gemessenen Frequenz [kHz]	Errechnete Frequenz [kHz]	Absoluter Fehler [Hz]	Relativer Fehler [%]
$0.15 \frac{m}{s}$	40,0040	40,0036	0,4	0,001
$0.39 \frac{m}{s}$	39,9796	39,9757	3,9	0,0099
$0.89 \frac{m}{s}$	39,9200	39,9175	2,5	0,0063

Tabelle 6: Messwerte, Bewegung des Empfängers vom Sender fort

Die Messwerte zeigen bei jedem der vier Teilversuche die erwartete Änderung der Frequenz. Ein Vergleich mit den theoretisch berechneten Frequenzen belegt die Güte der Messung. Die Abweichungen liegen im Bereich weniger Hertz, der relative Fehler ist aufgrund der hohen Frequenzen des gesendeten Schalls praktisch vernachlässigbar. Dabei schwanken die Frequenzunterschiede bei den verschiedenen Geschwindigkeiten nicht regelmäßig. Man kann jedoch erkennen, dass die Abweichungen bei höherer Geschwindigkeit generell zunehmen. Das liegt zum einen an der Schwierigkeit, die empfangene Frequenz genau zu bestimmen, da eine höhere Geschwindigkeit die Zeit der Messung verkürzt und somit der Ablesefehler zunimmt. Zum anderen ist auch die Bestimmung der Geschwindigkeit weniger genau, je größer diese ist. Weiter beeinflussen hinterher schleifende Kabel bei Messungen mit der Spannungsversorgung über einen Konstanter die Werte. Außerdem ist die Einstellung der Versorgungsspannung der Bahn am Transformator durch die „stufenlose“ Regelung am Transformator nicht exakt. Insgesamt sind die Fehler jedoch sehr gering, weshalb das Auftreten des Dopplereffektes mit dem Versuchsaufbau experimentell klar bewiesen werden kann.

5.4.2 Schwebung

Bisher wurden Schallwellen von einem Sender betrachtet. Um eine Schwebung zu erhalten, benötigt man zwei Schallquellen, die mit einer unterschiedlichen Frequenz und gleicher Amplitude schwingen. Dieses wird mit Hilfe des normalen und des modifizierten Ultraschallsenders ermöglicht.

Versuchsaufbau:

Die beiden unterschiedlichen Ultraschallsender werden nebeneinander gestellt und auf den in einiger Entfernung aufgestellten Empfänger ausgerichtet. Die Versorgungsspannung beträgt bei allen Geräten $U=9V$ und wird über Blockbatterien und Konstanter ermöglicht. An den Empfänger wird über den Wechselstromausgang zuerst das Frequenzmessgerät und danach ein Oszilloskop angeschlossen.



Abbildung 59: Ausrichtung beider Sender

Versuchsdurchführung:

Über den Drehkondensator des veränderten Ultraschallsenders wird eine von der Grundfrequenz $f = 40.021\text{Khz}$ verschiedene Frequenz eingestellt und mit dem Frequenzmessgerät ermittelt. Dabei wird nur einer der vier möglichen Wandler eingeschaltet. Nun wird der unveränderte Ultraschallsender eingeschaltet, es überlagern sich beide Schwingungen. Die dadurch entstehende Schwebung wird mit dem Oszilloskop sichtbar gemacht und das Bild vermessen. Um die Frequenz der Schwebung zu berechnen, werden wie beim Ermitteln der Frequenz des einfachen Senders die Länge einer Welle und der am Oszilloskop eingestellte Zeitkoeffizient benötigt.

Auswertung der Ergebnisse:

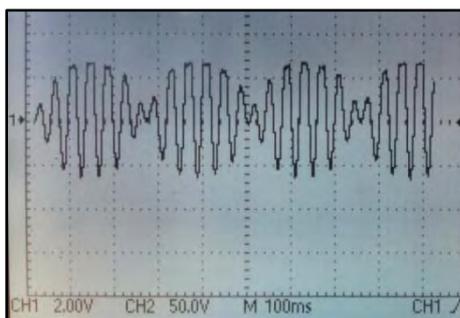


Abbildung 60: Schwebung von zwei Wellen

Mit der per Drehkondensator eingestellten Frequenz $f_2 = 40.020\text{kHz}$ und der Grundfrequenz $f_1 = 40.021\text{kHz}$ ergibt sich das links dargestellte Bild am Oszilloskop (Abbildung 60). Die Länge einer Schwebungsperiode beträgt $L = 2.4\text{cm}$, bei einem Zeitkoeffizienten von $Z = 100\text{ms}$. Demnach

beträgt die Frequenz $f_{Schwebung} = \frac{1}{L \cdot Z} = 1.04 \text{ Hz}$. Dabei ist die Länge einer Schwebungsschwingung nur die Hälfte einer normalen Periode (siehe 3.3). Mit den beiden eingestellten Frequenzen ergibt sich theoretisch eine Schwebungsfrequenz von

$$f_{Schwebung} = f_1 - f_2 = 1 \text{ Hz}.$$

Die Abweichung von gemessener und berechneter Frequenz der Schwebung beträgt $\Delta f = 0.04 \text{ Hz}$ und $\Delta f_{rel} = 4\%$. Der Fehler liegt dabei in der Messung der Frequenz des gesendeten Schalls und der Vermessung des Bildes am Oszilloskop. Insgesamt ist dieser so gering, dass der Versuch als qualitativer Nachweis der Schwebung mit Bestätigung der theoretischen Formel für die Berechnung der Schwebungsfrequenz verwendet werden kann.

Anmerkung: Wird die Spannung am Drehkondensator so weit erhöht, dass der Frequenzunterschied zwischen den beiden Schwingungen groß genug ist, kann die Schwebungsfrequenz akustisch wahrgenommen werden. Die Schwebungsfrequenz liegt dann im hörbaren Bereich.

5.4.3 Interferenz

Mit den vier in Reihe geschalteten Ultraschallwandlern, die mit gleicher Frequenz und Amplitude schwingen, ist eine Überlagerung von zwei oder mehreren in Phase schwingenden Erregern möglich. Dadurch können Interferenzerscheinungen von Schall sichtbar gemacht werden. Der Versuch mit zwei Schallquellen entspricht dabei dem Doppelspaltversuch mit Licht. Drei oder vier Wandler verhalten sich wie Versuche mit mehreren Spalten nebeneinander.

Versuchsaufbau:

Der Ultraschallsender mit den vier in Reihe geschalteten Wandlern wird mit einem Reiter auf eine optische Bank gestellt. Der Reiter verfügt über einen horizontalen Schieber, der die mittige Stellung der Wandler ermöglicht. Senkrecht dazu wird die Schienenbahn aufgebaut und mit einer weiteren optischen Bank oder einem Zollstock versehen. Die Skala dient dazu, die Länge und den Mittelpunkt der abzufahrenden Strecke zu bestimmen. Damit kann der Sender auf die Mitte der Strecke ausgerichtet werden. Auf der Lokomotive wird der Ultraschallempfänger mit

Klebeband fixiert und senkrecht auf den Sender ausgerichtet. (Abbildung 61) Die Spannungsversorgung der Geräte geschieht mit zwei 9V Blockbatterien. An den Gleichstromausgang des Empfängers wird der TI-Nspire mit dem Sensor Voltage Probe angeschlossen. Der Rechner wird auf einen leeren Waggon gelegt und an die Lokomotive angehängt (Abbildung 62). Für die Messung wird der Sender im gewünschten Abstand von der Bahn auf der optischen Bank positioniert.

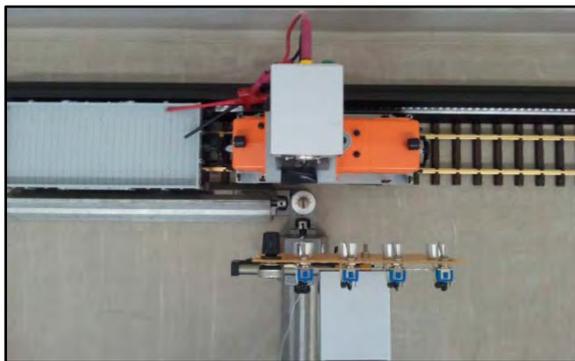


Abbildung 61: Versuchsaufbau Interferenzmessung: Ausrichten von Sender und Empfänger



Abbildung 62: Grundeinstellung für die Messung der Interferenz

Versuchsdurchführung:

Vor der Messung wird der Sensor kalibriert, das heißt bei ausgeschalteter Schallquelle auf null normiert. Der Sender wird in einer Entfernung von 1m von der Bahn positioniert und der erste Wandler angeschaltet. Der Empfänger auf der Lok ist am Anfang der Bahn aufgestellt. Während die Lokomotive mit dem Empfänger die festgelegte Strecke von 2m abfährt, wird die Spannung am Empfänger mit dem Taschenrechner automatisch gemessen. Die Wahl des Messintervalls ist abhängig von der Geschwindigkeit der Bahn, die man am Transformator einstellt. Die besten Ergebnisse werden bei der geringsten Stufe erreicht. Als Messintervall des Rechners wählt man möglichst viele Datenaufnahmen pro Sekunde, damit das abgefahrene Schallfeld genau skizziert werden kann. Nach der Messung wird die Lokomotive mit dem Empfänger wieder zum Anfang der Bahn zurückbewegt. Anschließend werden weitere Wandler am Sender eingeschaltet und das Feld mit dem Taschenrechner vermessen.

Um das Schallfeld zu zentrieren, wird der Sender mit dem Schieber mittig auf die Bahn ausgerichtet. Es bietet sich an, den Sender dazu wieder direkt an der



Abbildung 63: Wandlerplatte mit Lot

Bahn zu positionieren, um eine exakte Ausrichtung zu ermöglichen. Dabei kann ein an der Lochrasterplatte fixiertes Lot die nötige Orientierung geben (siehe Abbildung 63). Bei den Messungen wählt man nacheinander zwei, drei und vier Wandler, sowie zwei Wandler mit unterschiedlichem Abstand. Außerdem kann der Abstand zwischen Sender und Bahn verringert werden. Falls der Empfänger übersteuert wird (Messbar mit einem Oszilloskop) kann das Drehpotentiometer für die Verringerung der Spannung verwendet werden.

Auswertung der Ergebnisse:

Die ersten Messungen ergaben folgende Graphen am Taschenrechner:

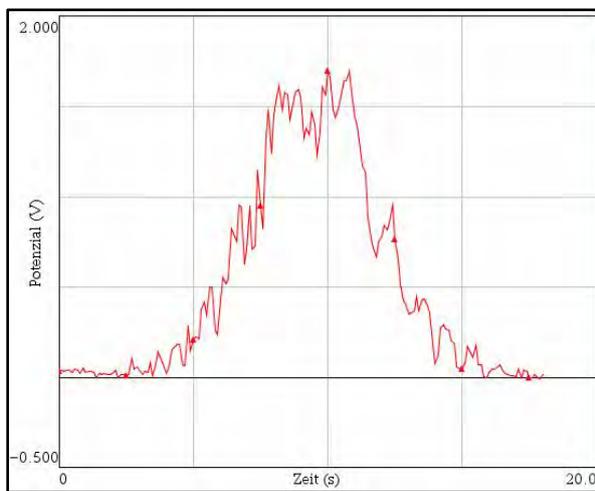


Abbildung 65: Messung mit einem eingeschalteten Wandler

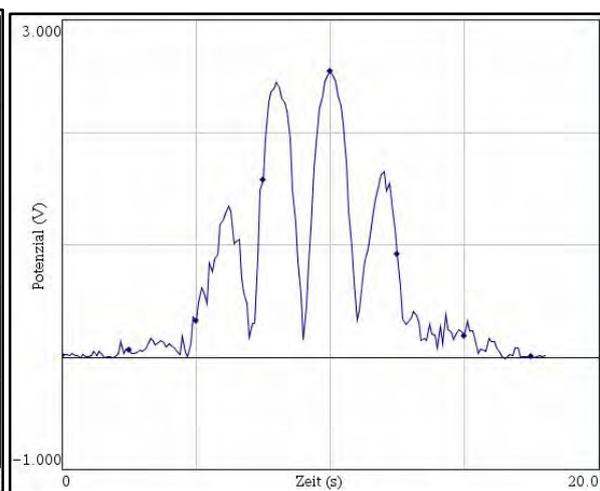


Abbildung 64: Messung mit zwei eingeschalteten Wandlern

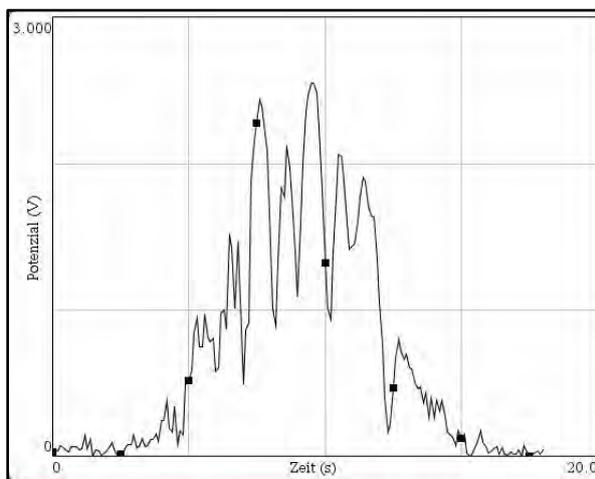


Abbildung 67: Messung mit drei eingeschalteten Wandlern

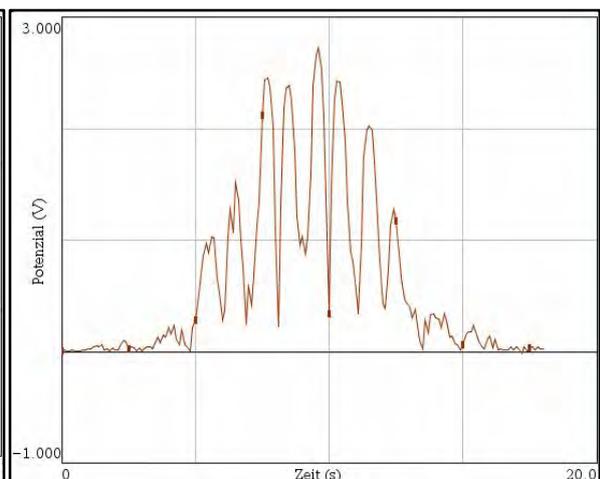


Abbildung 66: Messung mit vier eingeschalteten Wandlern

Bei einem eingeschalteten Wandler (Abbildung 64) ergab sich der erwartete Verlauf der Spannungskurve. Je weiter sich der Empfänger dem Mittelpunkt der Strecke nähert, desto größer ist die Schallintensität. Allerdings verursachen Störungen z. B. durch die Bahnbewegung Schwankungen im Kurvenverlauf. Betrachtet man die Abbildungen von zwei, drei und vier eingeschalteten Wandlern (Abbildung 65-67), so kann man eine Interferenz der Schallquellen feststellen, es treten diverse Maxima und Minima im Spannungsverlauf auf. Allerdings sind diese verschoben und haben nicht die erwartete Ausrichtung. Nach den theoretischen Grundlagen der Interferenz von zwei bis vier Schallquellen, müsste sich im Zentrum das Maximum nullter Ordnung ausbilden, neben dem Maxima weiterer Ordnungen erkennbar sein sollten. Da die Messung über 20s erfolgte, die Bahn jedoch nach 18s stoppte, befindet sich das Zentrum der Bahn bei 9s, also in geringer Abweichung zum Bildzentrum bei $t=10s$ (senkrechter Strich in den Abbildungen) Die Graphen zeigen aber kein Hauptmaximum im Zentrum. Auch eine Versuchsdurchführung mit verringerter Spannung durch Einstellen des Drehpotentiometers erbrachte keine besseren Ergebnisse. Demnach gibt es mit diesem Versuchsaufbau zwar erkennbare Interferenzerscheinungen, die jedoch nicht auswertbar sind.

Zur Analyse dieser Verschiebungen wurden die einzelnen Wandler separat mit Hilfe eines Oszilloskops auf ihre gesendete Schallwelle untersucht. Aus der Untersuchung ergab sich, dass der erste Wandler, der permanent für die Versuche verwendet wurde, eine geringere Amplitude aufweist, als die anderen drei. Die Amplitude des vierten Wandler wich geringfügig von den zwei mittleren ab. Diese Unterschiede in der Maximalspannung sind die Ursache für die fehlerhaften Interferenzbilder. Wenn zwei Wellen unterschiedlicher Amplitude sich überlagern, dominiert die Position des stärkeren Senders. Folglich verschieben sich die Maxima und Minima des Interferenzmusters. Daraufhin wurden dieselben Messungen noch einmal ohne den ersten Wandler durchgeführt, zunächst für die beiden mittleren Wandler, danach für den 2. und vierten Wandler auf der Platine. Dabei wurde vorsichtshalber die Spannung reduziert, um eine mögliche Übersteuerung zu unterbinden. Die folgenden Graphen zeigen den Verlauf der Spannungskurve, abhängig von der Position des Empfängers. Diese wurde mit Hilfe der Zeit und der Geschwindigkeit der Bewegung mittels $s = v \cdot t$ berechnet. Die Geschwindigkeit der Lokomotive mit angehängtem Empfänger wurde mit dem Bewegungssensor ermittelt.

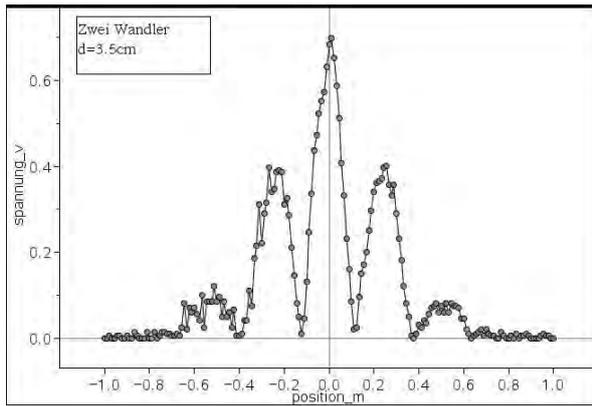


Abbildung 69: Signalspannung in Abhängigkeit vom Ort bei zwei Sendern mit $d=3,5\text{cm}$

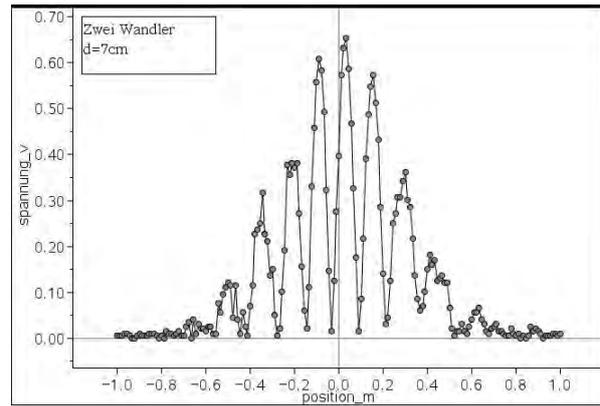


Abbildung 68: Signalspannung in Abhängigkeit vom Ort bei zwei Sendern mit $d=7\text{cm}$

Die Abbildungen 68 und 69 für jeweils zwei Sender mit unterschiedlichem Abstand weisen den erwarteten Verlauf der Spannung bei Interferenz der beiden Schallwellen auf. Das Maximum nullter Ordnung befindet sich im Zentrum bei $l=0\text{m}$ (+ geringe Abweichung), die Nebenmaxima folgen bei nahezu konstanter Entfernung vom Hauptmaximum. Vermisst man die Abstände und vergleicht diese mit den theoretisch zugrunde liegenden Werten, so erhält man folgende Ergebnisse:

Ordnung des Maximums	Distanz der Schallquellen d [cm]	Abstand zum vorhergehenden Maximum [m]	Errechneter Abstand [m]	Abweichung [m]
0.	3,5	0	0	0
1.	3,5	0,244 ; 0,244	0,247	0,003
2.	3,5	0,244 ; 0,255	0,247	0,003 ; 0,008

Tabelle 7: Vergleich von gemessenen und berechneten Abständen der Maxima bei $d=3,5\text{cm}$

Ordnung des Maximums	Distanz der Schallquellen d [cm]	Abstand zum vorhergehenden Maximum [m]	Errechneter Abstand [m]	Abweichung [m]
0.	7	0	0	0
1.	7	0,122 ; 0,122	0,124	0,002
2.	7	0,122 ; 0,144	0,124	0,002 ; 0,02
3.	7	0,133 ; 0,111	0,124	0,009 ; 0,013

Tabelle 8: Vergleich von gemessenen und berechneten Abständen der Maxima bei $d=7\text{cm}$

Die Maxima erster Ordnung liegen in beiden Fällen sehr nah an den berechneten Werten. Für Maxima höherer Ordnung wird die Abweichung größer, was vor allem an der Ungenauigkeit im Ablesen der Position liegt. Insgesamt kann die Formel zur

Berechnung der Maximaabstände experimentell bestätigt werden. Mit dem Versuchsaufbau kann man die Abhängigkeit zwischen dem Abstand der auftretenden Interferenzmaxima und der Entfernung der Schallquellen darstellen. Weiter ist es möglich durch Veränderung der Distanz zwischen Sender und Empfänger zu zeigen, dass auch die Position der Interferenzmaxima abhängig von dieser Entfernung ist.

Das Bild dreier Schallquellen weist eine Verfeinerung der Maxima und das Auftreten von weiteren Nebenmaxima auf. Allerdings bewirkt auf hier der geringe Unterschied in der Amplitude eine Verschiebung der Maxima. Dies zeigt sich an der Asymmetrie des Graphen und den verschieden hohen Maxima höherer Ordnung (siehe Abbildung 70)

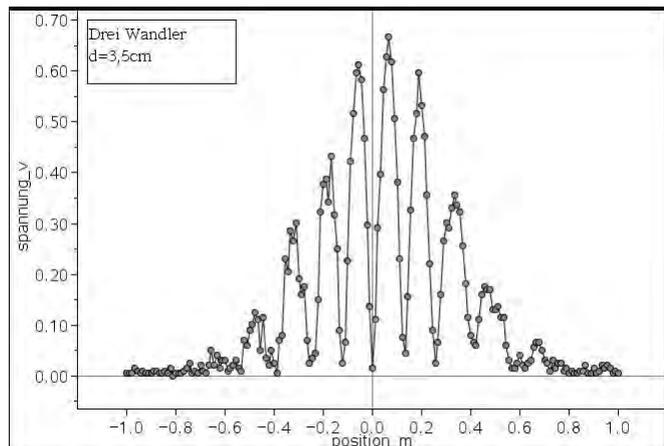


Abbildung 70: Abhängigkeit der Spannung von der Position des Empfängers bei drei Sendern mit $d=3.5\text{cm}$

5.4.4 Braggreflexion

Für die Braggreflexion benötigt man ein „Kristallgitter“ das der Größenordnung der verwendeten Wellenlänge entspricht. Da diese für den verwendeten Ultraschall etwa $\lambda = 8,5\text{mm}$ beträgt, muss der Abstand der Netzebenen wenige Zentimeter messen. Das Gitter wird durch eine Holzplatte realisiert, in die Eisennägel platziert werden. Es bietet sich an, die Löcher für



Abbildung 71: Kristallgitter

die Nägel vorzubohren, um Ausbrüche zu vermeiden und einen in etwa konstanten Abstand der Netzebenen zu ermöglichen. Das verwendete Holzbrett hat die Ausmaße $13,4\text{cm} \times 9,45\text{cm}$, die Löcher werden im Abstand von 1cm gebohrt. Die Nägel sind etwa 8cm lang und haben einen Durchmesser von 3mm . Es werden

zunächst drei Ebenen mit sieben Nägeln im Abstand von 1 cm in das Brett geschlagen.

Versuchsaufbau:

Das Kristallgitter wird mit Stativklammern an der Tischkante befestigt. Der Tisch wird zusätzlich mit einem Winkelmesser versehen. An diesen werden Ultraschallsender und -empfänger auf Reitern positioniert. Die Spannungsversorgung der Geräte erfolgt durch Blockbatterien (9V) oder Konstanter mit einer Spannung von $U=10V$. An die Gleichspannungsausgänge des

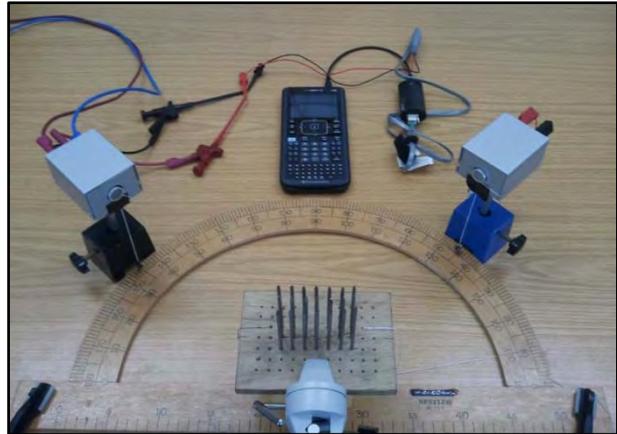


Abbildung 72: Versuchsaufbau Braggreflexion

Empfängers wird der TI-Nspire über den Spannungssensor angeschlossen. Der Abstand zwischen Gitter und Sender bzw. Empfänger beträgt 25 cm.

Versuchsdurchführung:

Sender und Empfänger werden in 1° Schritten am Winkelmesser entlang bewegt und die Spannung am Empfänger wird gemessen. Der eingestellte Winkel bezieht sich dabei auf den Winkel zwischen Sender bzw. Empfänger und der Horizontalen (Tischkante). Die Messwerterfassung geschieht im Messmodus „ausgewählte Ereignisse“, entweder direkt oder über 10s gemittelt. Die abzuschreitenden Winkel liegen zwischen 8° und 80° . Kleinere oder größere Winkel sind mit dem Aufbau nicht möglich. Um die Genauigkeit der Messung zu erhöhen, wird an die Geräte ein Lot angebracht, das den eingestellten Winkel genau anzeigt.

Auswertung der Ergebnisse:

Die Spannungsschwankungen während der Messungen waren teilweise sehr hoch. Daher wurde einmal mit Mittelung und einmal ohne gemessen. In den Abbildungen 73 und 73 ist der Verlauf der Spannung in Abhängigkeit vom Winkel dargestellt. Der Graph in Abbildung 72 wurde mit der direkten Messungsmethode erstellt, Abbildung 74 zeigt den Spannungsverlauf über 10s gemittelten.

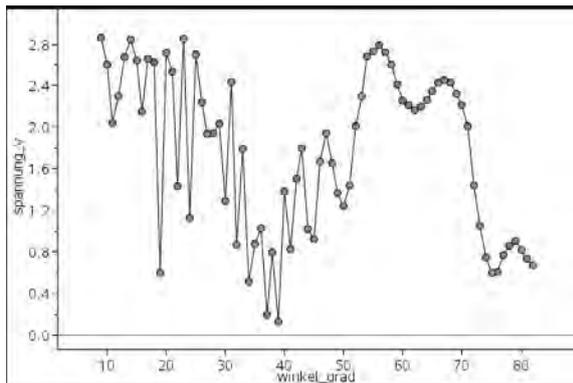


Abbildung 74: Messung der Signalspannung in Abhängigkeit des Winkel, direkt

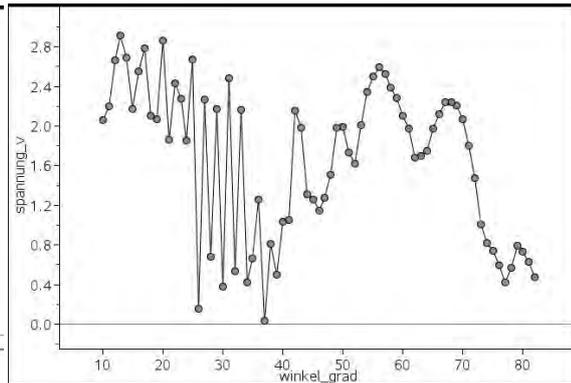


Abbildung 73: Messung der Signalspannung in Abhängigkeit des Winkel, gemittelt

Beide Graphen zeigen einen ähnlichen Verlauf. Bis etwa 40° kann keine sinnvolle Analyse der aufgenommenen Daten geschehen. Die Schwankungen im Kurvenverlauf sind so groß, dass nur Störungen und enorme Streuung Ursache sein können. Die Ultraschallwellen werden an den nah beieinanderliegenden Nägeln reflektiert und interferieren teilweise miteinander. Deutlich zu erkennen sind zwei Maxima im weiteren Verlauf der Spannungskurve, nämlich bei 56° und 67°. Hier scheint durch konstruktive Interferenz zwischen den Schallwellen, die an der Oberfläche und an der ersten Gitterebene reflektiert wurden aufzutreten. Berechnet man mit den gegebenen Werten für $d = 1\text{cm}$, $T = 25.4^\circ\text{C}$ Schallgeschwindigkeit, Wellenlänge und Bragg-Winkel, so erhält man

$$c = (331 + 0.6T) \frac{\text{m}}{\text{s}} = 346.24 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = 8,65 \cdot 10^{-3} \text{m}.$$

Für den Winkel, bei dem konstruktive Interferenz auftritt gilt damit

$$\phi(m) = \sin^{-1}\left(\frac{m\lambda}{2d}\right)$$

$$\phi(1) = 25,65^\circ$$

$$\phi(2) = 59,97^\circ$$

Der kleinere der beiden Winkel kann durch die große Streuung in diesem Bereich nicht wahrgenommen werden. Der zweite Winkel weicht von dem experimentell

erhaltenen um fast 4° ab, kann also auch nicht präzise ermittelt werden. Bei 67° kann nach der Bragg-Gleichung keine konstruktive Interferenz mit den gegebenen Größen auftreten. Wahrscheinlich tritt bei diesem Winkel eine Interferenz zwischen Reflexionen an 0. und 2. Gitterebene oder zwischen nebeneinanderliegenden Kristallelementen auf. Um dieses zu untersuchen und die Streuungen wenn möglich zu minimieren, wird das Kristallgitter abgeändert. Der Abstand zwischen zwei Ebenen bzw. zwischen zwei Nägeln, wird auf $d=2\text{cm}$ erhöht. Mit dem veränderten Versuchsaufbau erhält man folgende Graphen:

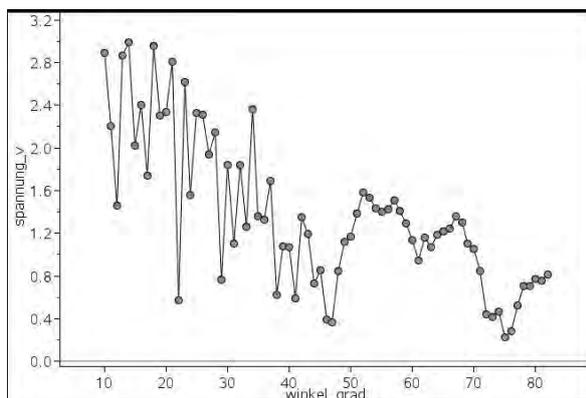


Abbildung 76: Messung der Signalpannung in Abhängigkeit des Winkels für $d=2\text{cm}$, direkt

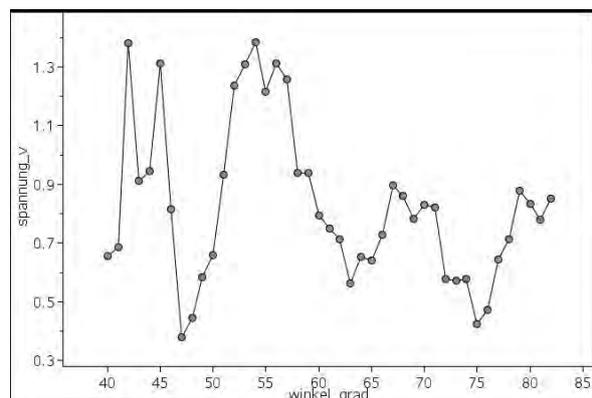


Abbildung 75: Messung der Signalpannung in Abhängigkeit des Winkels für $d=2\text{cm}$, gemittelt

Der erste Graph (Abbildung 75) zeigt den Gesamtverlauf der Spannung im Winkel zwischen 10° und 82° . Da auch hier bis etwa 40° große Schwankungen auftreten, wurde der Bereich zwischen 40° und 82° noch einmal genauer untersucht. Die Messwernerfassung erfolgte dort mit einer Mittelwertbildung über 10 s (Abbildung 76). Auch in diesen Graphen sind Schwankungen auszumachen. Man findet Maxima der Spannung bei einem Winkel von 43° , 54° und 69° . Der Kurvenverlauf in Abbildung 76 lässt darauf schließen, dass die lokalen Maxima durch große Schwankungen der gemittelten Messwerte teilweise nicht exakt erreicht wurden. Der Betrag der Spannung fällt beispielsweise bei einem Winkel von 55° auf einmal schlagartig ab, obwohl der Kurvenverlauf einen Hochpunkt vermuten lässt.

Berechnet man nun mit dem neuen Gitterabstand $d = 2\text{cm}$ und der Umgebungstemperatur $T = 24^\circ\text{C}$ Schallgeschwindigkeit, Wellenlänge und Bragg-Winkel so erhält man

$$c = (331 + 0.6T) \frac{\text{m}}{\text{s}} = 345.4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = 8,63 \cdot 10^{-3} m$$

$$\phi(m) = \sin^{-1}\left(\frac{m\lambda}{2d}\right)$$

$$\phi(1) = 12,46^\circ; \phi(2) = 25,56^\circ; \phi(3) = 40,34^\circ; \phi(4) = 59,66^\circ$$

Die ersten beiden Winkel verschwinden wie im ersten Versuchsteil mit kleinerem Gitterabstand in der großen Streuung der Messwerte. Für die beiden Weiteren findet man experimentell Parallelen, die jedoch um $2,66^\circ$ bzw. $5,66^\circ$ abweichen. Berechnet man andersherum mit den experimentell gefundenen Winkeln die Wellenlänge und die Frequenz, so erhält man

$$\lambda_3 = 9,09 \cdot 10^{-3} m; f_3 = 37,984 kHz$$

$$\lambda_4 = 8,19 \cdot 10^{-3} m; f_4 = 42,1656 kHz,$$

und damit gemittelt $\bar{\lambda} = 8,64 \cdot 10^{-3} m; \bar{f} = 40,075 kHz$. Der Index von Wellenlänge und Frequenz bezieht sich dabei auf die Ordnung m .

Die Abweichungen zwischen experimentell und theoretisch errechnetem Winkel sind deutlich vorhanden und die Messungen können nicht als direkter Beweis der Bragg-Gleichung angesehen werden. Verwendet man die Messwerte jedoch, um Aussagen über den gesendeten Schall zu machen, so gleichen sich die Abweichungen aus. Als Mittelwert erhält man für Wellenlänge und Frequenz relativ genaue Werte. Somit kann der Versuch eine Annäherung zur Bestimmung der gesendeten Frequenz sein, die die Bragg-Gleichung verwendet.

6. Diskussion der Versuche

Die vier gezeigten Versuche ermöglichen einen Einblick in die Wellennatur von Ultraschall. Durch den gut richtbaren Schall können physikalische Phänomene dargestellt werden, die mit anderen Mitteln schwieriger zu zeigen sind. Der Dopplereffekt beispielsweise kann zwar auch anders sichtbar - oder besser hörbar gemacht werden, die Versuche mit Ultraschallsender und Empfänger liefern aber gute Messwerte um quantitativ und qualitativ die zugrunde liegende Berechnung zu belegen.

Die sonst häufig nur mit Licht durchgeführten Versuche zur Interferenz können mit Hilfe der Ultraschallversuche erweitert werden. Als Einführung bietet sich eher der Doppelspaltversuch an, doch kann man hier häufig nur helle oder dunkle Punkte als Interferenzerscheinung betrachten. Durch die Aufnahme des gesamten Schallfeldes werden jedoch die Bereiche zwischen den Maxima und Minima sichtbar. Graphiken, die häufig nur in Schulbüchern abgedruckt werden, sind durch die Methode der Ultraschallmessung direkt zugänglich.

Auch die Schwebung kann mit den benutzten Aufbauten gut realisiert werden. Dadurch können die Überlagerungen von zwei Schallquellen unterschiedlicher Frequenz direkt anschaulich gemacht werden. Im Bereich des Ultraschalls kann diese zwar meist nur am Bild des Oszilloskops gesehen werden. Verändert man allerdings die Frequenz des einen Ultraschallsenders um einige hundert Hertz, so bleibt die eingestellte Frequenz an sich im nicht hörbaren Bereich. Durch den Frequenzunterschied beider Quellen im hörbaren Bereich kann die Schwebungsfrequenz aber deutlich wahrgenommen werden. Für die Anwendung in der Schule ist dieses Phänomen sehr gut zu gebrauchen, da es sowohl optisch als auch akustisch ansprechend ist. Die Kombination zweier einzeln nicht-hörbarer Schallwellen, die gemeinsam hörbar sind, könnte die Begeisterung der Schüler wecken.

Für die Herleitung der Bragg-Gleichung, können die verwendeten Geräte mit diesem Aufbau nur schwer benutzt werden. Optimiert man den Versuchsaufbau, ist die Herleitung sicherlich möglich und eine Alternative zu den sonst verwendeten Versuchen mit Mikrowellen. Aufgrund der großen Streuung bei geringen Winkeln ist der Versuch allerdings nicht besonders praktikabel. Zur Veranschaulichung und

Visualisierung der entstehenden Interferenz wiederum kann er unter Umständen verwendet werden. Verbesserung in Aufbau des Gitters und Verwendung anderer Kristallelemente (Nägel) können hier wahrscheinlich Abhilfe schaffen. Andererseits kann unter Verwendung der Bragg-Gleichung der Versuch zur Ermittlung der gesendeten Frequenz gut genutzt werden.

Um die Dämpfung von Schallwellen durch das Trägermedium darzustellen, lassen sich die Geräte qualitativ gut verwenden. Berechnungen des Absorptionskoeffizienten sind zwar nicht möglich, die exponentielle Natur der Absorption ist aber klar erkennbar. Der Versuch kann dazu dienen, die Ausbreitung innerhalb eines Mediums darzustellen und die Folgen der durch das Medium verursachten Veränderung der Schallwelle sichtbar zu machen.

Die Messungen der Winkelabhängigkeit dienen vor allem dem Zweck, sich über die Ausbreitung und Aufnahme des Schalls in radialer Richtung klar zu werden. Für die Schule sind diese nur interessant, wenn die Abhängigkeit der Schallausbreitung von der Wellenlänge thematisiert wird. So kann durch den Versuch gezeigt, dass sich Ultraschall, anders als hörbarer Schall mit großer Wellenlänge und kleiner Frequenz, durch seine hohe Frequenz und geringe Wellenlänge ausrichten lässt. Vergleicht man das Schallfeld eines normalen Lautsprechers mit dem des Ultraschalls fällt dieser Unterschied sofort auf.

Zur Schallgeschwindigkeitsmessung und der gleichzeitigen Darstellung einer stehenden Welle sind Ultraschallgeräte gerade durch die gute Richtbarkeit sehr nützlich. Die errechneten Ergebnisse zeigen wie genau eine Messung mit ihnen möglich ist. Für die Einführung der stehenden Welle sind die Geräte jedoch nicht so gut geeignet, da diese Voraussetzung für die Schallgeschwindigkeitsmessung ist. Die Triggerung des Oszilloskops geschieht meist automatisch, sodass bei nahezu jeder Distanz zwischen Sender und Empfänger eine „stehende“ Welle ausgemacht werden kann, auch wenn für die Berechnung nur ganz bestimmte Abstände möglich sind.

Insgesamt sind alle Versuche schultauglich und dienen zur Einführung oder Vertiefung des jeweiligen Fachgebiets. Die Spannungsversorgung mit 10V bei

geringer Stromstärke ist für Schüler ungefährlich. Die Bauteile sind sehr robust, wodurch keine Gefahren durch unvorsichtiges Umgehen mit den Geräten entstehen.

7. Diskussion der Messmethoden

Die Messungen mit klassischen Messgeräten, sprich Multimeter, Frequenzmessgerät und Oszilloskop sind immer möglich. Es wird nicht mit Hochspannung gearbeitet, so dass die Versuche für Schüler sowie für Lehrer zur Vorstellung durchführbar sind. Die langen Messreihen, wie zum Beispiel die Vermessung der Schallabsorption sind mit den klassischen Mitteln jedoch umständlich und werden durch die erheblichen Schwankungen verkompliziert. Die Messungen mit moderner Technologie, also mit den grafikfähigen Computertaschenrechnern sind hingegen sehr simpel und intuitiv. Durch die automatische Messwerterfassung können schnell große Datenmengen aufgenommen und analysiert werden. Die Verarbeitung der Daten kann mithilfe der voreingestellten Analysewerkzeuge direkt am Gerät geschehen und muss nicht per Hand oder mit einem externen PC vorgenommen werden. Durch die verschiedenen Sensoren können mehrere physikalische Größen mit einem Rechner gemessen werden. Die größten Probleme der neuen Messmethoden sind jedoch zum einen die entstehenden Kosten, zum anderen das Fachwissen und die benötigte Erfahrung im Umgang mit den Geräten. Ist es vielleicht möglich, dass die Lehrkraft einen Taschenrechner und die benötigten Messsensoren zur Verfügung stellen kann, so ist es nur schwer realisierbar, dass jeder Schüler mit seinem eigenen Rechner arbeitet. Für Schulklassen, die generell mit einem grafikfähigen Taschenrechner dieser Art bestückt sind, kommt dieses Problem sicherlich nicht auf. Trotzdem bleibt die Problematik, dass die Lehrperson sich mit der Technologie auskennen muss, damit die Versuche sinnvoll durchgeführt und eventuelle Schwierigkeiten beseitigt werden können. Besonders erfahrene Lehrerinnen und Lehrern nutzen daher eher ihre bekannten und bewehrten Messgeräte und –methoden, an Stelle sich mit neuer Technologie auseinander zu setzen.

Für manche der vorgestellten Versuche existieren noch keine passenden Sensoren, so dass dort ohnehin auf die klassischen Messgeräte zurückgegriffen werden muss. Insgesamt ist daher zu sagen, dass die neue Technologie die Messwerterfassung deutlich erleichtert und neue Möglichkeiten bietet, die klassisch nicht vorhanden sind. Beispiele sind dafür die automatische Aufnahme (zeitbasiert), direkte Visualisierung

der Messwerte und schnelle Berechnungen von Gleichungen oder Mittelwerten. Es werden aber neben den Rechnern auch noch weitere Messgeräte benötigt, um beispielsweise den Wechselspannungsausgang des Ultraschallempfängers per Oszilloskop oder Frequenzmessgerät zu analysieren.

Daher sind die Computertaschenrechner eine Erleichterung und Vereinfachung zur klassischen Messmethode, aber kein vollständiger Ersatz.

8. Diskussion des Eigenbaus

Das Bauen der Geräte ist für einen Laien mit etwas handwerklichem Geschick möglich. Mit der Bauanleitung gelingt es durch die gute Struktur und die schrittweise Erklärung, auch ohne besonderes Verständnis von Elektronik die Geräte funktionstüchtig zu bauen. Ohne die Schaltskizze, die der eigentlichen Bauanleitung nicht beiliegt, wird das korrekte Zusammenbauen schwieriger. Zwar gibt der Bestückungsplan die nötige Orientierung, trotzdem wünscht man sich an manchen Stellen eine größere Transparenz der Elektrik. Aufgrund einer Fehlbezeichnung im Bestückungsplan, der die beiden IC's vertauscht, kann ohne die Schaltskizze kein funktionstüchtiges Ergebnis erzielt werden. Erst nach Kontrolle mit der Schaltskizze kann dieser Fehler behoben und der Sender in Betrieb genommen werden. Für die zusätzlichen Bauten, also der durch den Drehkondensator veränderten Platine des Ultraschallsenders und der Schaltung für vier Wandler in Reihe, gibt die Bauanleitung nur Hinweise, jedoch keine konkrete Vorgehensweise. Da dies in der Anleitung mehr als Ausblick angesehen wird und das eigentliche Bauen auf die einfachen Sender und Empfänger beschränkt wird, kann von zu viel Kritik abgesehen werden. Für Erfahrene stellen diese geringen Angaben sicherlich kein Problem dar, als Laie ist das erweiterte Bauen herausfordernd. Die Fotos in der Anleitung sind dabei wenig zu gebrauchen. Besonders bei diesem aber auch beim generellen Bauvorgang gilt daher: Learning by Doing.

Die Schablonen für die Gehäuse sind für genaue Arbeiten untauglich. Die Skalierung passt weder mit den angegebenen Löchern für die Bananenbuchsen noch mit den Bohrlöchern für die Platinenschrauben überein. Legt man keinen besonders großen Wert auf das Aussehen, so kann man mit Hilfe der Schablonen zu einem annehmbaren Ergebnis gelangen. Für die Funktionsweise ist das Aussehen generell nebensächlich. Um die Ultraschallwandler genau aufeinander auszurichten wäre

aber zumindest hier eine exakte Schablone hilfreich. Es geht allerdings auch mit einem Lot für die senkrechte und Augenmaß für die waagerechte Ausrichtung. Die Verschiebungen entstehen dadurch, dass beide Platinen nicht waagrecht im Gehäuse befestigt werden konnten und die Löcher für die Wandler nicht auf derselben Höhe platziert wurden. Vermutlich liegt Letzteres aber nicht nur an den ungenauen Schablonen sondern viel mehr an der nicht passenden Zentrierung des Bohrloches. Die Angaben des Autors über das Bohren in Aluminium stimmen mit den Erfahrungen überein. So verbiegt sich das Blech sehr leicht, besonders bei stumpferen Bohrern führt das zu Unsauberkeiten. Es stellte sich heraus, dass es ohne feste Einspannvorrichtung der Gehäuse schwierig ist, präzise Löcher zu setzen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Bauanleitung, mit Ergänzung der Schaltpläne, eine gute Möglichkeit darstellt, elektronische Geräte ohne besondere Vorkenntnisse zu bauen, daran zu lernen und die Bauteile für anschauliche Versuche zu verwenden.

Durch den hohen Zeitaufwand für den gesamten Bauprozess, ist der Eigenbau für Lehrerinnen oder Lehrer einer Schulklasse jedoch schwer realisierbar. In der Schule könnten die Bauteile in einer Projektwoche oder einer AG erstellt werden. Im zeitlich begrenzten Lehreralltag ist das Bauen, wenn überhaupt, in der Freizeit, im Hobbyraum möglich. Wenn besonderes Interesse an dem Eigenbau von Elektronik besteht, ist diese Anleitung sehr nützlich. Um eine Unterrichtseinheit mit Ultraschall durchzuführen, muss sehr viel Vorbereitungszeit eingeplant werden.

9. Zusammenfassung und Fazit

Für eine technikbegeisterte Lehrkraft, die gerne nach ihrem Unterricht noch Zeit für den Bau von elektronischen Geräten investiert, bieten die vorgestellten Ultraschallbauteile eine sehr gute Möglichkeit. Im Unterricht kann mit Ultraschallsender und -empfänger ohne weiteres gearbeitet werden, die erzielten Ergebnisse deuten auf eine gute Alternative zu anderen Versuchen der Themengebiete hin. Als Schülerprojekt ist der Bau durch den erschwinglichen Preis machbar aber zeitintensiv. Die Versuche mit den Geräten dürften daher besonders in Praktika, Lehrerversuchen oder im Stationenlernen ihren Platz finden.

Als Laie kann man anhand der Bauanleitung den Umgang mit Lötarbeiten und einfacher Elektronik lernen. Dadurch erweitert sich der persönliche Horizont und ähnliche Projekte können leichter durchgeführt werden. Jedoch ist es ohne zusätzliche Betreuung teilweise schwierig, da das Themengebiet der Elektronik und Elektrotechnik sehr komplex ist und für Neulinge verwirrend erscheinen kann.

Durch die alternativen Messmethoden können klassisch schwierige Messreihen gut bewältigt und zügig ausgewertet werden. So bieten sich diese nicht nur für die gezeigten Versuche, sondern auch für andere Themengebiete der Physik an, um den Zugang zu schwierigen Sachverhalten zu erleichtern. Besonders durch die Visualisierung der Daten wird das Interesse und mitunter auch das Verständnis der Physik gesteigert.

10. Ausblick

Die vorausgehenden Versuche und der Bau der dafür benötigten Geräte sind direkt für die Schule konzipiert und ermöglichen dort den Umgang mit Ultraschall, zum Beweis und zur Verdeutlichung physikalischer Phänomene. Im Folgenden soll nun gezeigt werden, wozu Ultraschall in der Schule und darüber hinaus noch verwendet werden kann

10.1 Fledermausdetektor

Der Fledermausdetektor, oder Bat Detector, ist ein elektronisches Gerät, das den von Fledermäusen ausgesendeten Ultraschall hörbar macht. Diverse Bauanleitungen und Bausätze sind im Internet zu finden. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Anleitung wurde vom Deutschen Amateur Radio Club e.V. (DARC) erstellt [Dar].

Der Detektor besteht aus einer vorgefertigten Platine, die mit diversen Widerständen, Kondensatoren, Dioden, und anderen elektronischen Bauteilen bestückt wird. Die Aufnahme des Umgebungsschalls erfolgt wie in den zuvor vorgestellten Geräten durch einen piezoelektrischen Wandler, der als Ultraschallempfänger fungiert. Das aufgenommene Signal wird von der Schaltung so umgewandelt, dass aus dem nicht hörbaren Ultraschall ein hörbares Signal entsteht.

Neben dem primären Anwendungsgebiet der Fledermausdetektion ist es mit dem Gerät möglich, verschiedene Quellen von Ultraschall auszumachen. So erzeugt beispielsweise ein TFT- oder ein Röhrenmonitor Schall im sonst nicht hörbaren Bereich. Diese Schwingungen in den elektrischen Schaltkreisen lassen sich auf magnetostruktive oder elektrostatische Ultraschallerzeugung zurückführen.

Ein Anwendungsgebiet des Fledermausdetektors in der Schule ist die akustische Wahrnehmung des Dopplereffektes. Wird der Detektor von der Ultraschallquelle weg- oder zu ihr hinbewegt, so vernimmt man deutlich die Veränderung der empfangenen Frequenz.

Die frei erhältliche Bauanleitung kann für spezielle Projektwochen oder AG's in der Schule verwendet werden, um mit den Schülern die Geräte zu bauen. Dank der schrittweisen Heranführung an Lötarbeiten und Bau von elektronischen Schaltungen werden keine besonderen Vorkenntnisse benötigt.



Abbildung 78: Fledermausdetektor, geschlossen



Abbildung 77: Fledermausdetektor, offen

10.2 Ultraschalllautsprecher

In der modernen Beschallungstechnik wird im Zuge der Lärmbelastigung auf Ultraschall zurückgegriffen, da dieser durch seine geringe Wellenlänge eine gezielte Schallausbreitung ermöglicht. Verwendet werden dazu handelsübliche piezoelektrische Ultraschallwandler die in großer Anzahl im Verbund zusammengeschlossen werden, um eine konzentrierte Schallquelle großer Intensität zu erhalten. Der gesendete Ultraschall wird dann mit Hilfe einer elektrischen Schaltung mit einem hörbaren, akustischen Signal kombiniert. Das entstehende Bild der gesendeten Schallwelle ähnelt dabei einer Schwebung die durch die Kombination der beiden Schallwellen entsteht. Physikalisch wird der hörbare Schall als Modulation der Amplitude der Ultraschallwelle verwendet. Die Ultraschallwelle ist somit die Trägerwelle und lässt sich aufgrund der geringen Wellenlänge in die gewollte Richtung lenken. Durch den Unterschied in der Amplitude erkennt das menschliche Ohr die Veränderung der Trägerwelle und setzt diese in den hörbaren Schall um, das Signal wird demoduliert. Folglich kann das Signal nur gehört werden, wenn man sich im Kegel der Ultraschallwelle aufhält.

Diese Technologie wird zum Beispiel in Diskotheken verwendet, um nur die Tanzfläche mit Musik zu beschallen. So sind Unterhaltungen außerhalb dieser Fläche ohne Geräuschbehinderung möglich. Ebenso kann man mit Hilfe von Ultraschalllautsprechern Musik in der Wohnung eines Mehrfamilienhauses abspielen, ohne die Nachbarn oder die Untermieter damit zu stören. Im Friseursalon können die Kunden ihre persönliche Musik oder die Geräusche ihrer Spielekonsole dank an der Decke befestigter Lautsprecher hören, ohne dass das Haarschneiden von

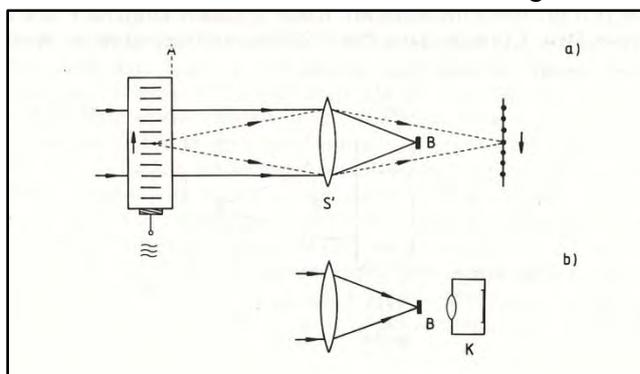
Kopfhörer kabela behindert wird oder andere Kunden von der Musik belästigt werden. Auch bei Militär- und Polizeiarbeit findet diese Technologie Verwendung. In Gefängnissen können gewalttätige Auseinandersetzungen von Häftlingen durch die Beschallung mit Tönen einer Frequenz nahe der Schmerzgrenze unterbunden werden, ohne physische Gewalt anzuwenden. Nur die Häftlinge hören den Ton, die Justizvollzugsbeamten bleiben unbeschadet.

10.3 Sichtbarmachen von Ultraschall

Um Ultraschall sichtbar zu machen, benötigt man nicht unbedingt einen Empfänger und ein Oszilloskop. Hier kann man sich der Eigenschaft von Schall zu nutzen machen, die in verschiedenen Medien auftreten. Wird Ultraschall durch eine Flüssigkeit gesendet, so verursacht die Druckschwankung des Schalls eine Veränderung der Materialdichte.

Stellt man nun eine Lichtquelle senkrecht zur Ausbreitung des Schalls an das Gefäß mit der Flüssigkeit, so wird das Licht zunächst durch den Übergang zwischen zwei Medien unterschiedlicher Dichte gebrochen. Der austretende Lichtstrahl ist nach zweimaliger Brechung parallel zum Eingehenden. Die Ausbreitung des Schalls in der Flüssigkeit bewirkt nun, dass sich die Dichte im Medium kontinuierlich verändert, wodurch eine unterschiedliche Brechung des Lichtstrahls auftritt. Die durchgehenden Lichtstrahlen werden dann mit einer Linse auf einen Schirm projiziert. Dabei ist die zeitliche Veränderung des Drucks nur mithilfe einer Stroboskopaufnahme zu sehen. Normal betrachtet erscheint ein einfacher Lichtpunkt auf dem Schirm.

Der Unterschied zwischen den gebrochenen Lichtstrahlen mit und ohne Schall ist ein Merkmal, für die Druckintensität des gesendeten Schalls. So kann dieser Versuch zur



ihrer Untersuchung dienen. Diese Methode zum Sichtbarmachen des Ultraschalls heißt Toeplersches Schlierenverfahren (Abbildung 78) [Kut88].

Abbildung 79: Sichtbarmachen von Ultraschall mit dem Schlierenverfahren -a. Schirm -b. Kamera [Kut88]

Literaturverzeichnis

- [Boy97]: BOYSEN, Gerd; HEISE, Harri; LICHTENBERGER, Jochim et al; *Oberstufe Physik, Ausgabe A Band 1*, Berlin: Cornelsen, 1997
- [Gia08]: GIANCOLI, Douglas C; *Physik*, 3., aktualisierte Auflage, München: Pearson, 2008
- [Kut88]: KUTTRUFF, Heinrich; *Physik und Technik des Ultraschalls*, Stuttgart: S. Hirzel, 1988
- [Tip09]: TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene; *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*, 6. Deutsche Auflage, Heidelberg: Spektrum, 2009
- [Win07] WINTER, Dr. Wolf et al; *Das große Tafelwerk – Formelsammlung für die Sekundarstufen I und II*, Berlin: Cornelsen, 2007
- [Ham]: HAMEG, Manual Oscilloscope Hm 203.5

Internetquellen:

[TI-1]

http://education.ti.com/educationportal/sites/DEUTSCHLAND/productDetail/de_v200.html?bid=1
letzter Zugriff: 21.07.2011

[TI-2]

http://education.ti.com/educationportal/sites/US/productDetail/us_cbl_2.html
letzter Zugriff: 21.07.2011

[TI-3]

http://education.ti.com/educationportal/sites/US/productDetail/us_cbr_2.html?bid=1
letzter Zugriff: 21.07.2011

[CTI]

<http://www.cti-texas.com/tivose.html>
letzter Zugriff: 21.07.2011

[Sfn]

http://www.schweizer-fn.de/stoff/luft/v2_luft.htm
letzter Zugriff: 21.07.2011

- [Ver] <http://www.vernier.com>
letzter Zugriff: 21.07.2011
- [Ehr01] http://www.ehretphysik.de/bauanleitungen/bau_uss_use.PDF
letzter Zugriff: 26.07.2011
- [Ehr02] http://www.ehretphysik.de/bauanleitungen/bau_interferenz_us.PDF
letzter Zugriff: 26.07.2011
- [Ehr03] http://www.ehretphysik.de/bauanleitungen/bau_doppler_us.PDF
letzter Zugriff: 26.07.2011
- [Phy] www.physiktreff.de
letzter Zugriff: 21.07.2011
- [Dar] <http://www.dn1kid.de/Fledek-Site/download/Baumappe.pdf>
letzter Zugriff: 26.07.2011
- [Lin] Linder, Physik für Ingenieure
http://books.google.com/books?id=5olUmkRuac4C&pg=PA253&lpg=PA253&dq=richtbarkeit+ultraschall&source=bl&ots=U8m3-2msRm&sig=GxYHnCUSsXJo52uRq1cDrE7I7NA&hl=en&ei=N9MuTuOQMJS7hAeh-OQ0&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=0CBQQ6AEwAA#v=onepage&q=richtbarkeit%20ultraschall&f=false
letzter Zugriff: 26.07.2011

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig verfasst und gelieferte Datensätze, Zeichnungen, Skizzen und graphische Darstellungen selbständig erstellt habe. Ich habe keine anderen Quellen als die angegebenen benutzt und habe die Stellen der Arbeit, die anderen Werken entnommen sind - einschl. verwendeter Tabellen und Abbildungen - in jedem einzelnen Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht.

Bielefeld, den

(Unterschrift)