

Schallversuche

Alfons Reichert



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1 Einleitung	3
2 Grundlagen	5
2.1 Schallgeschwindigkeit.....	5
2.2 Reflexion.....	7
2.3 Interferenz.....	11
2.3.1 Linearwellen	11
2.3.2 Kreiswellen	12
2.3.3 Stehende Welle	14
2.3.4 Schwebung	16
2.4 Dopplereffekt	17
3 Schallschranke	20
3.1 Schaltplan	20
3.2 Aufbau	20
4 Ultraschallsender	24
4.1 Schaltungen	24
4.1.1 Sender mit fester Frequenz.....	24
4.1.2 Sender mit variabler Frequenz.....	24
4.1.3 Empfänger mit Audioeinheit	26
4.2 Benötigte Teile	27
4.2.1 Sender mit fester Frequenz.....	27
4.2.2 Sender mit variabler Frequenz.....	28
4.2.3 Empfänger mit Audioeinheit.....	29
4.3 Bau der Schaltungen	30
4.3.1 Sender mit fester Frequenz.....	30
4.3.2 Sender mit variabler Frequenz.....	33
4.3.3 Empfänger mit Audioeinheit.....	34
5 Versuche	38
5.1 Schallgeschwindigkeit.....	38
5.2 Reflexionsgesetz.....	41
5.3 Interferenz.....	43
5.3.1 Linearwellen	43
5.3.2 Kreiswellen	44
5.3.3 Stehende Wellen	45
5.3.4 Schwebung	47
5.4 Dopplereffekt	52
6. Literaturverzeichnis	55

1 Einleitung

Wir sind ständig und überall von Schallquellen umgeben. Einige wecken in uns ein unbeschreibliches Glücksgefühl oder erfreuliche Erinnerungen, etwa ein melodischer Song der Beatles, andere nerven uns in unvorstellbarer Weise und verursachen Stress, im schlimmsten Fall sogar irreparable Hörschäden, wie der Start eines Düsenjets aus nächster Nähe oder ohrenbetäubende Disco-Musik. Im ersten Fall sprechen wir von einem Hörgenuss, im zweiten Fall von unerträglichem Lärm. Dabei können wir unseren Hörsinn nicht abschalten wie etwa den Sehsinn durch Schließen der Augenlider. Die Schallwellen, die in unser Ohr dringen, werden automatisch als Nervenimpulse zum Gehirn weitergeleitet und dort registriert. Unser Gehör nimmt den Schall unbewusst wahr. Das bietet Vor- und Nachteile. Eine laute Explosion lässt uns aus dem Schlaf schrecken, um uns vor einer Gefahr zu warnen. Möchten wir dagegen einschlafen, so kann uns jedes kleinste Geräusch wie das Ticken eines Weckers den letzten Nerv rauben. Damit ist der Hörsinn einer der wichtigsten Sinne unseres Körpers. Außerdem erlaubt er uns, Vorgänge genau zu orten. Dabei spielt die Schallgeschwindigkeit eine wichtige Rolle. Sie nutzt man aus, um die Entfernung eines Gewitters näherungsweise abzuschätzen. Man misst lediglich die Zeit in Sekunden zwischen Blitz und Donner. Teilt man das Ergebnis durch drei, so weiß man, wie viele Kilometer das Gewitter noch ungefähr entfernt ist. Folgen Blitz und Donner unmittelbar aufeinander, so befindet sich das Gewitter direkt über einem. Dass Schall und Licht sehr unterschiedliche Geschwindigkeiten haben, beobachtet man bei Flugzeugen. Man hört sie aus einer bestimmten Richtung, z.B. aus Westen auf einen zukommen. Schaut man aber zum Himmel, so sieht man das Flugzeug bereits über sich, oder sogar schon in östlicher Richtung davon fliegen. In der Zeit, in der der Schall vom Flugzeug zum Ohr dringt, hat es sich bereits merklich weiter bewegt, da Passagiermaschinen in aller Regel mit ca. 70% der Schallgeschwindigkeit fliegen. Das Licht braucht dagegen wegen der sehr viel höheren Geschwindigkeit nur Bruchteile von Sekunden, um unser Auge zu erreichen. Wäre die Schallgeschwindigkeit unendlich groß, so könnten wir mit unserem Gehör keine Gegenstände orten. Denn die geringen Laufzeitunterschiede zum linken bzw. rechten Ohr nutzt der Gehörsinn, um die Richtung zu erkennen, aus der der Schall kommt. Dass die Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Materialien unterschiedlich ist, wird mir immer wieder unfreiwillig demonstriert. Wir wohnen ca. 350 m von einem Steinbruch entfernt. Bei einer Sprengung spürt man zunächst eine leichte Bodenwelle und hört dann mit einer Verzögerung erst den Knall. Im Boden pflanzt sich der Schall schneller fort als in Luft. Landvermesser nutzen die Schallgeschwindigkeit, um die mittlere Temperatur der umgebenden Luft zu bestimmen. Die Schallgeschwindigkeit und damit die Laufzeit eines Schallsignals für eine bestimmte Strecke hängen von der Temperatur der Luft ab.

Grund genug, Schallphänomene im Unterricht ausführlich zu thematisieren. Hinzu kommt, dass Wellen und Wellenerscheinungen wie Beugung, Interferenz, Brechung, Reflexion und Totalreflexion zu den vorrangigen Pflichtthemen in der Schulphysik gehören. Es lassen sich eine Reihe interessanter Effekte zeigen und viele Anwendungsbeispiele finden. Benutzt man Schallwellen im Hörbereich, so gestalten sich die Versuche recht schwierig, da die Wellenlängen im Bereich von 0,1 – 1 m liegen. Lautsprecher, die einen so großen Bereich gleichmäßig ausstrahlen, sind kaum erhältlich. Außerdem erfordern sie einen großen, von Reflexionsquellen freien Arbeitsbereich, der auf einem Labortisch meist nicht zu bewerkstelligen ist. Die Wellenlängen von Ultraschallwellen liegen dagegen im Bereich weniger Millimeter oder Zentimeter, vergleichbar mit Mikrowellen für elektromagnetische Wellen. Mikrowellengeräte sind jedoch recht teuer. Die Kosten für einen Zehnersatz für Schülerübungen in der Oberstufe übersteigen den Physiketat jeder Schule. Die hier vorgestellten Schaltungen machen

Schülerversuche zu den genannten Themen für 200 Euro pro Bausatz erschwinglich, wenn man über einige Bastelerfahrung verfügt und Schülerinnen und Schüler am Bau beteiligt. Meist erfahren sie ein zusätzliches Erfolgserlebnis, denn was gibt es Schöneres für einen Bastler als zum Schluss ein funktionsfähiges, sinnvoll nutzbares Gerät in Händen zu halten.

Stolberg, im Juni 2013 und im Februar 2021

2 Grundlagen

2.1 Schallgeschwindigkeit

Schall hat Wellencharakter. Als Beweis dienen Beugungs- und Interferenzerscheinungen. Huygens erklärte sie mit der Modellvorstellung der Elementarwellen und formulierte dazu zwei Prinzipien, die ihm zu Ehren nachträglich als Huygensche Prinzipien bezeichnet wurden. Nach seinen Überlegungen ist jeder Punkt einer Wellenfront Ausgangspunkt einer kreis- bzw. kugelförmigen Elementarwelle. Überlagern sich diese Elementarwellen, so ergibt ihre Einhüllende die neue Wellenfront. Bei Interferenz können sich die Elementarwellen je nach Phasenverschiebung verstärken oder auslöschen. Man erhält Minima oder Maxima.

Schallwellen sind Longitudinalwellen. Sie lassen sich nicht polarisieren. Schickt man sie durch zwei gekreuzte Spalte, die senkrecht aufeinander stehen, so werden sie nicht vollkommen ausgelöscht. Die Materieteilchen schwingen in die gleiche Richtung, in die sich die Welle ausbreitet. Durch die Schwingungen der Teilchen entstehen im Fortpflanzungsmedium Druckschwankungen, die sich entlang des Stoffes ausbreiten. An den Stellen, an denen die schwingenden Teilchen ihre größte Geschwindigkeit erreichen, herrscht ein Unterdruck. Man unterscheidet daher bei Schallwellen Druck- und Schnellebäuche und –knoten. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c hängt von der Dichte und der Elastizität des Materials ab, bei Gasen außerdem vom Druck bzw. der Temperatur. Sie ist umso kleiner, je größer die Dichte bzw. die Molmasse des Gases ist (s. Tabelle 1)¹⁾. In Flüssigkeiten und Feststoffen ist sie höher als in Gasen.

Medium	ρ in g/cm ³	c in m/s
Luft	0,00129	344
Helium	0,00017	1007
Kohlendioxid	0,00183	267
Wasser	0,998	1483
Blei	11,3	1230
Stahl	7,8	5170
Aluminium	2,7	5110
Granit	2,8	6000

Tabelle 1:
Schallgeschwindigkeit
in einigen Stoffen bei 20°C

Es gelten folgende Gesetzmäßigkeiten:¹⁾

Festkörper:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

mit E als Elastizitätsmodul in N/m² und ρ als Dichte in kg/m³. Für Aluminium erhält man bei 20°C:

$$c = \sqrt{\frac{7,1 * 10^{10} \text{ N/m}^2}{2700 \text{ kg/m}^3}} = 5216 \text{ m/s},$$

in sehr guter Übereinstimmung mit dem Wert aus Tabelle 1.

Flüssigkeiten:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

mit κ als Kompressionsmodul in N/m^2 und ρ als Dichte in kg/m^3 . Für Wasser erhält man bei 20°C :

$$c = \sqrt{\frac{2 * 10^9 \text{ N/m}^2}{998 \text{ kg/m}^3}} = 1416 \text{ m/s},$$

in guter Übereinstimmung mit dem Wert aus Tabelle 1.

Gase:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa * p}{\rho}}$$

mit κ als Adiabatenexponent, p als Druck in N/m^2 und ρ als Dichte in kg/m^3 . Mit Hilfe des allgemeinen Gasgesetzes erhält man

$$p * V = n * R * T = \frac{m * R * T}{M}$$

und damit

$$p = \frac{m * R * T}{M * V} = \frac{\rho * R * T}{M}.$$

Darin bedeuten

P: Druck in N/m^2

V: Volumen in m^3 ,

n: Stoffmenge in mol

R: allgemeine Gaskonstante in $\text{J}/(\text{K} * \text{mol})$

T: absolute Temperatur in K

m: Masse in kg und

M: Molmasse in kg/mol.

Setzt man diese Gleichung in das Geschwindigkeitsgesetz ein, so lässt es sich wie folgt formulieren:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa * R * T}{M}}$$

Für Luft erhält man bei 20°C:

$$c = \sqrt{\frac{1,4 * 8,31 \text{ J}/(\text{K} * \text{mol}) * 293 \text{ K}}{0,029 \text{ kg/mol}}} = 343 \text{ m/s},$$

in sehr guter Übereinstimmung mit dem Wert aus Tabelle 1.

2.2 Reflexion

Trifft eine Schallwelle auf die Grenzfläche zweier Medien, so wird ein Teil der Welle reflektiert, ein Teil dringt ins Medium ein und wird beim Übergang gebrochen. Für die Reflexion gilt das so genannte Reflexionsgesetz. Nach ihm liegen einfallender, reflektierter Strahl und Lot in einer Ebene. Außerdem sind der Winkel zwischen dem einfallenden Strahl und dem Lot, auch Einfallswinkel α genannt, und der Winkel zwischen dem reflektierten Strahl und dem Lot, auch Reflexionswinkel β genannt, gleich groß. Kurz formuliert gilt: Einfallswinkel α gleich Reflexionswinkel β . Dieses Gesetz lässt sich durch einfache geometrische Überlegungen mit den Huygenschen Elementarwellen herleiten, wie im Folgenden gezeigt wird. Trifft eine ebene Wellenfront AB schräg auf ein gerades Hindernis, so erreichen nicht alle Punkte gleichzeitig die Grenzfläche. Während die Erregung von B nach C fortschreitet, schwingt das Teilchen bei A bereits. Es erzeugt in dieser Zeit eine kreisförmige Elementarwelle mit dem Radius AD = BC (s. Abb.1).

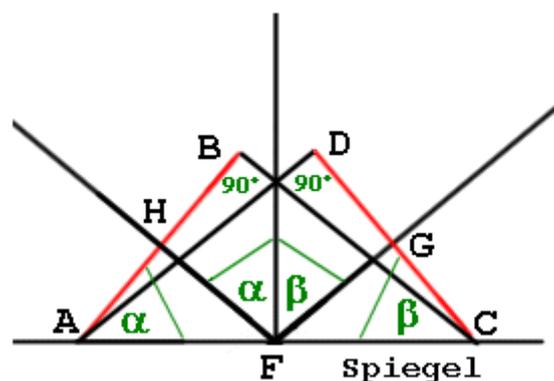


Abb.1: Reflexionsgesetz

Die von der Mitte H weiterlaufende Erregung braucht nur die halbe Zeit, bis sie zum Punkt F am Hindernis gelangt. Die sich dann von F ausbreitende Elementarwelle erreicht daher nur noch den Radius $FG = AD/2$. Entsprechende Überlegungen gelten für alle von den Punkten

zwischen A und C ausgehenden Elementarwellen. Sie haben als Einhüllende die neue Wellenfront CD. Die Senkrechte FG zeigt die neue Ausbreitungsrichtung an. Der Einfallswinkel α tritt im Dreieck BAC, der Reflexionswinkel β im Dreieck DCA noch einmal auf. Da die beiden rechtwinkligen Dreiecke aufgrund ihrer gemeinsamen Basis AC und den gleichgroßen Seiten AD und BC kongruent sind, ergibt sich: Der Einfallswinkel α ist gleich dem Reflexionswinkel β .

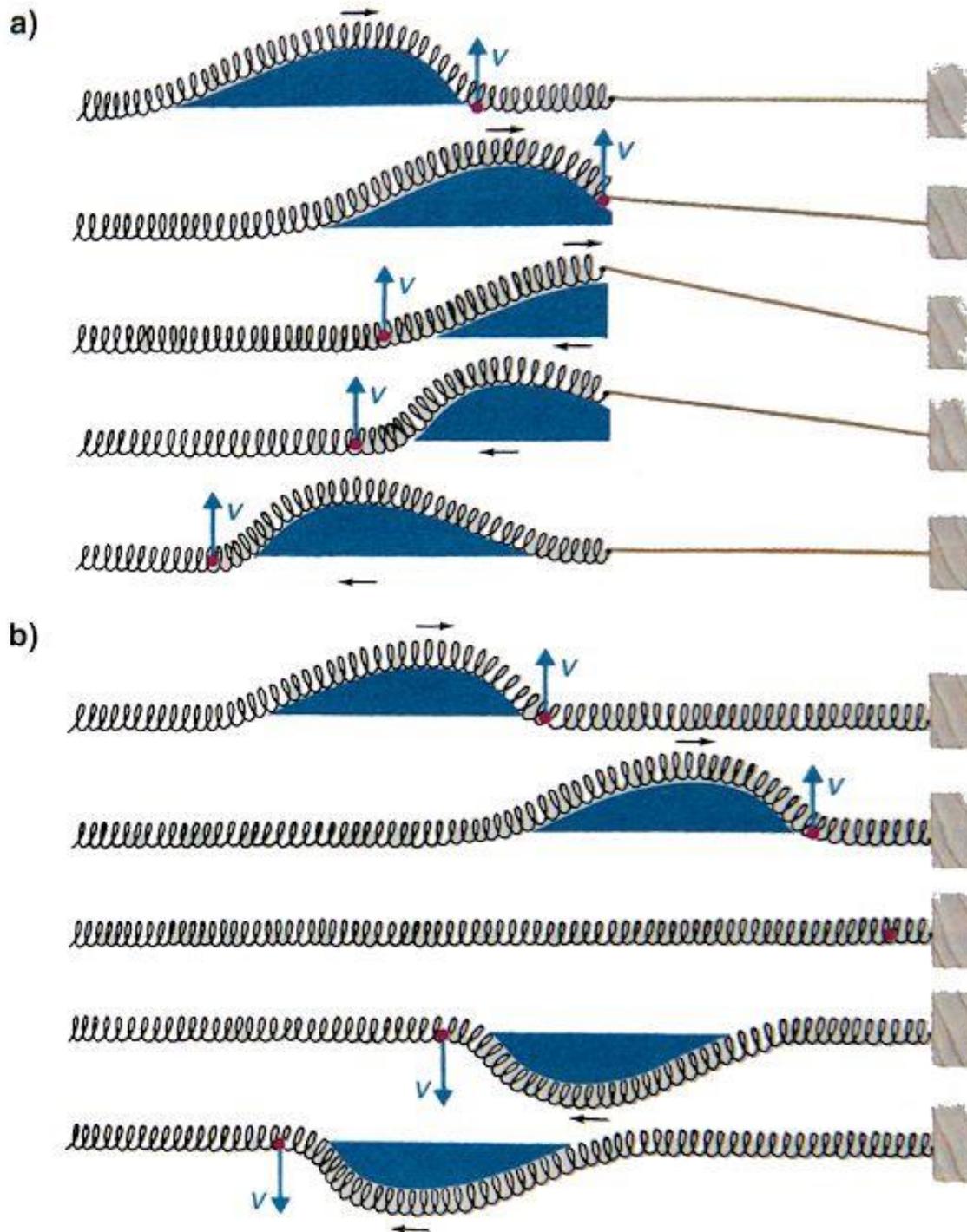


Abb.2: Reflexion a) am losen Ende, b) am festen Ende
Quelle: Metzler Physik, Band Oberstufe, S. 138

Ist das Medium, aus dem der Schall kommt, weniger dicht als das Medium, in das der Schall eintritt, so spricht man von Reflexion am festen Ende. Aus einem Wellenberg wird ein Well-

lental, aus einem Wellental ein Wellenberg (s. Abb. 2b). Man beobachtet einen Phasensprung von $\pi/2$ oder 90° . Ist das Material, aus dem der Schall auf die Grenzfläche zum anderen Medium trifft, dichter, so liegt eine Reflexion am losen Ende vor. Bei ihr wird ein Wellenberg als Wellenberg und ein Wellental als Wellental reflektiert (s. Abb.2a). Es gibt keinen Phasensprung. Diese Überlegungen sind bei Musikinstrumenten von Bedeutung, in denen ein Ton durch eine schwingende Luftsäule erzeugt wird.

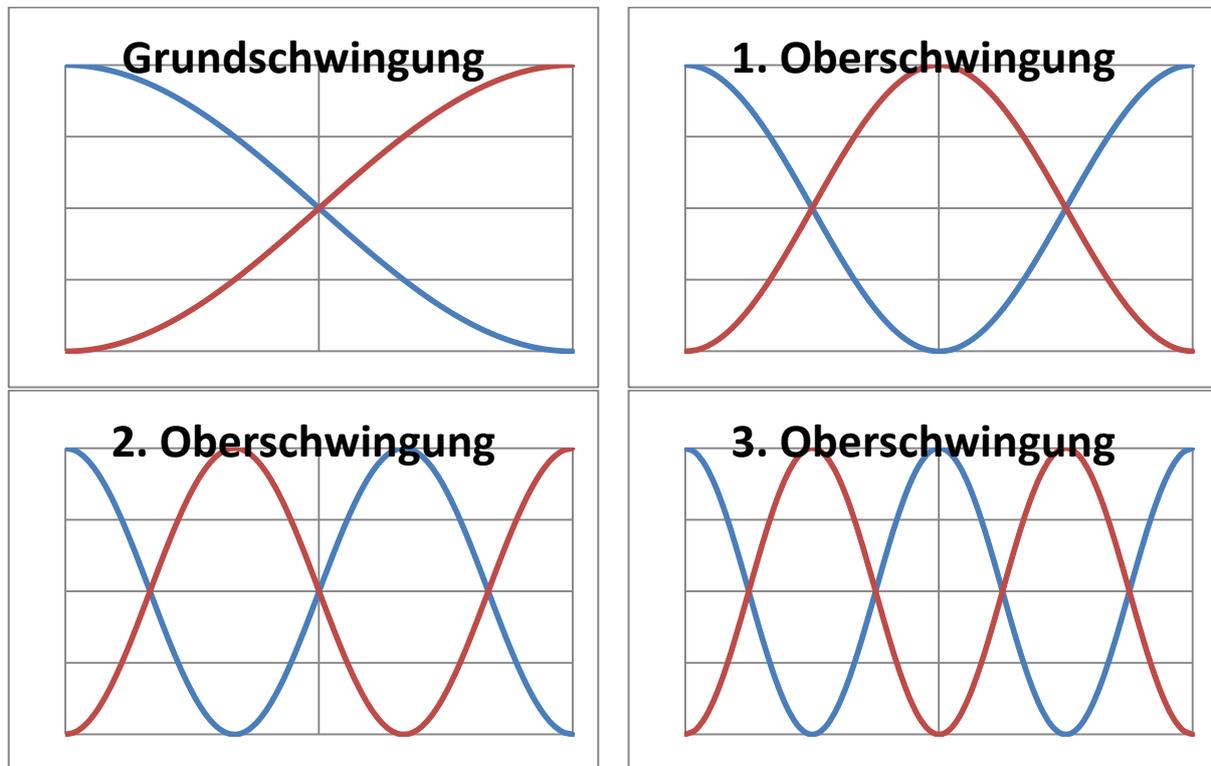


Abb.3: Eigenschwingungen beidseitig offenes Glasrohr

Abb.3 zeigt die möglichen Eigenschwingungen in einem beidseitig offenen Glasrohr. Sie entstehen, wenn die Wellen an beiden Enden mehrfach reflektiert werden. Es baut sich eine stehende Welle (s. Kapitel 2.3.3) im Glasrohr auf, durch die die Lautstärke des abgestrahlten Tones zunimmt. Nur Töne, deren Wellenlänge zur Länge des Glasrohres passen, können eine Eigenschwingung ausbilden. Sie werden verstärkt und als Grund- und Obertöne vom Musikinstrument ausgestrahlt. Beide zusammen machen den Klang des Instrumentes aus. Auf diese Art und Weise werden die Töne in vielen Blasinstrumenten, wie Flöte, Oboe, Klarinette, Posaune usw. erzeugt. Zwischen der Länge l der schwingenden Luftsäule und der Wellenlänge λ gilt folgender Zusammenhang:

$$l = \frac{k * \lambda_k}{2} \quad (k = 1,2,3 \dots)$$

Für die Frequenzen ergibt sich mit Hilfe der Grundgleichung der Wellenlehre

$$c = \lambda * f$$

$$l = \frac{k * c}{2 * f_k}$$

$$f_k = \frac{k * c}{2 * l}$$

Mit $k = 1$ erhält man die Frequenz des Grundtones, auch 1. Harmonische genannt, mit $k = 2$ den 1. Oberton oder 2. Harmonische usw.

Ist das Glasrohr einseitig geschlossen, so gilt:

$$l = k * \frac{\lambda_k}{2} - \frac{\lambda_k}{4}$$

$$= \frac{(2k - 1) * \lambda_k}{4} \quad (k = 1, 2, 3 \dots)$$

und für die Frequenzen:

$$f_k = \frac{(2k - 1) * c}{4 * l}$$

Abb.4 zeigt in diesem Fall die ersten vier Harmonischen.

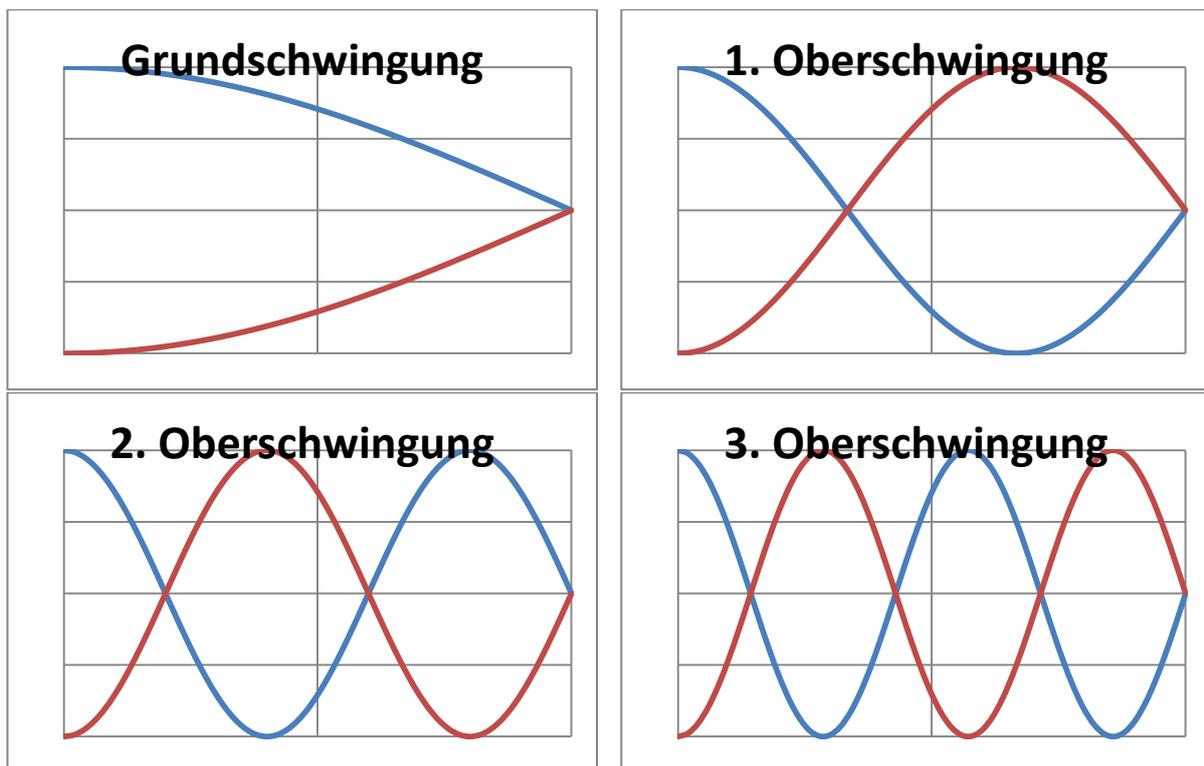


Abb.4 Eigenschwingungen einseitig geschlossenes Glasrohr

Besitzt die reflektierende Schicht eine Struktur in der Größenordnung der Wellenlänge des Schalls, so werden die Elementarwellen unter verschiedenen Winkeln gestreut, da jede auf ein etwas anders gerichtetes Oberflächenelement trifft. Die Elementarwellen interferieren miteinander und es können sich Maxima und Minima ausbilden, wie im nächsten Kapitel genauer ausgeführt wird.

2.3 Interferenz

Überlagern sich mehrere Wellen, so beobachtet man unterschiedliche Phänomene je nach Frequenz, Phasenlage und Richtung der Wellen.

2.3.1 Linearwellen

Überlagern sich zwei lineare Wellen gleicher Frequenz, die sich in die gleiche Richtung fort-pflanzen, so können sie sich je nach Phasenlage gegenseitig verstärken oder auslöschen. Man spricht von konstruktiver bzw. destruktiver Interferenz (s. Abb.1).

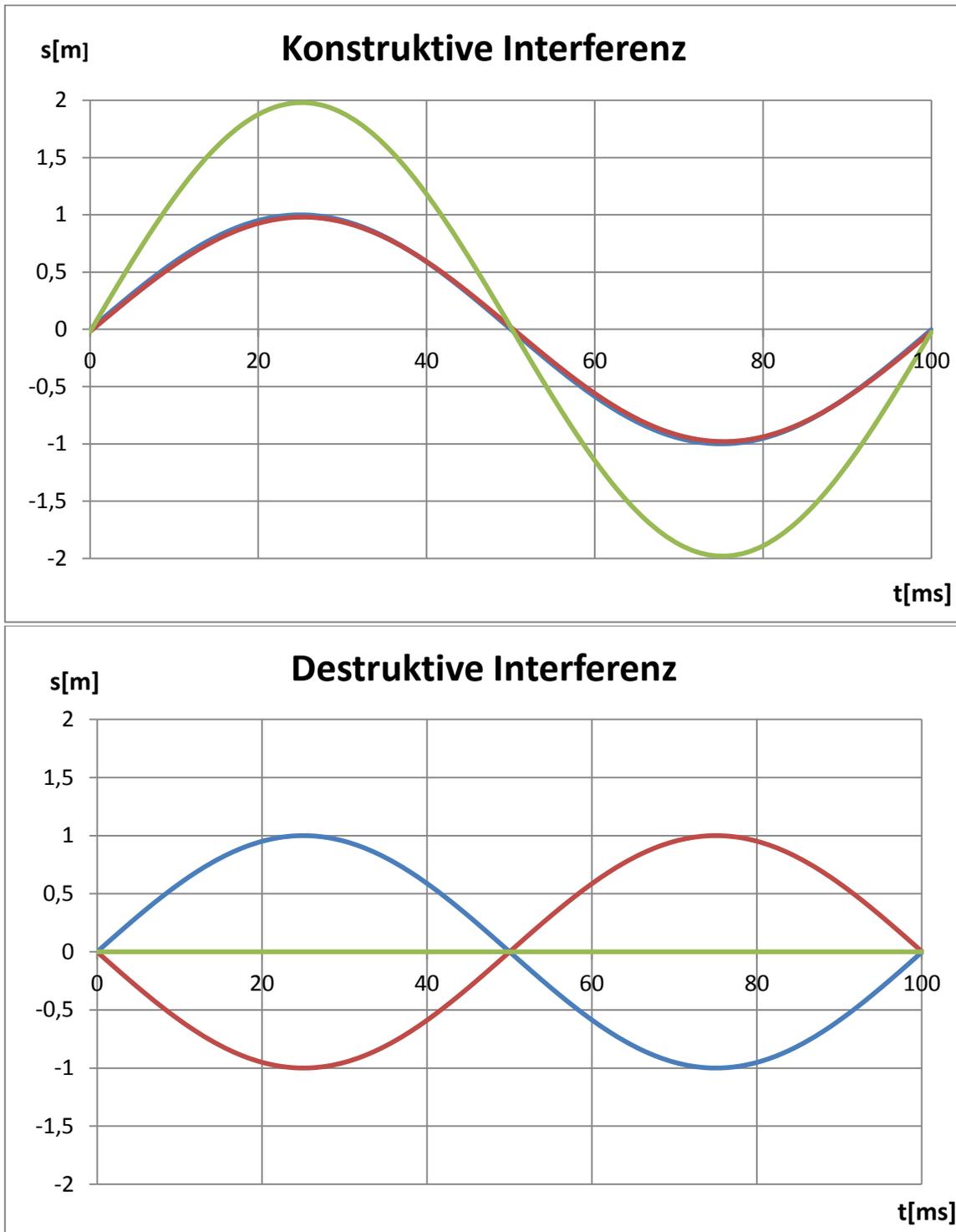


Abb.1: Interferenz

Erregen sie einen Schwinger an einem bestimmten Ort in gleicher Phase, so addieren sich zu jedem Zeitpunkt die beiden Elongationen zu einer Gesamtelongation doppelter Größe. Das gilt für alle Schwinger entlang des gemeinsamen Ausbreitungsweges der beiden Wellen. Treffen die Wellen gegenphasig am Schwinger ein, so heben sich die Elongationen auf und alle Schwinger entlang des Überlagerungsweges der beiden Wellen bleiben in Ruhe. Schall und Schall ergibt im ersten Fall Schall doppelter Intensität, im zweiten Fall Ruhe. Unerträglichen Lärm kann man z.B. dadurch bekämpfen, dass man ihn mit gleichlautem, aber gegenphasig sich ausbreitendem Schall überlagert.

2.3.2 Kreiswellen

Interferieren die kreisförmigen Wellen mehrerer Quellen, so liegen die Orte, an denen sie sich auslöschen bzw. verstärken, auf Hyperbeln. Abb.2 zeigt das erhaltene Muster für zwei Quellen.

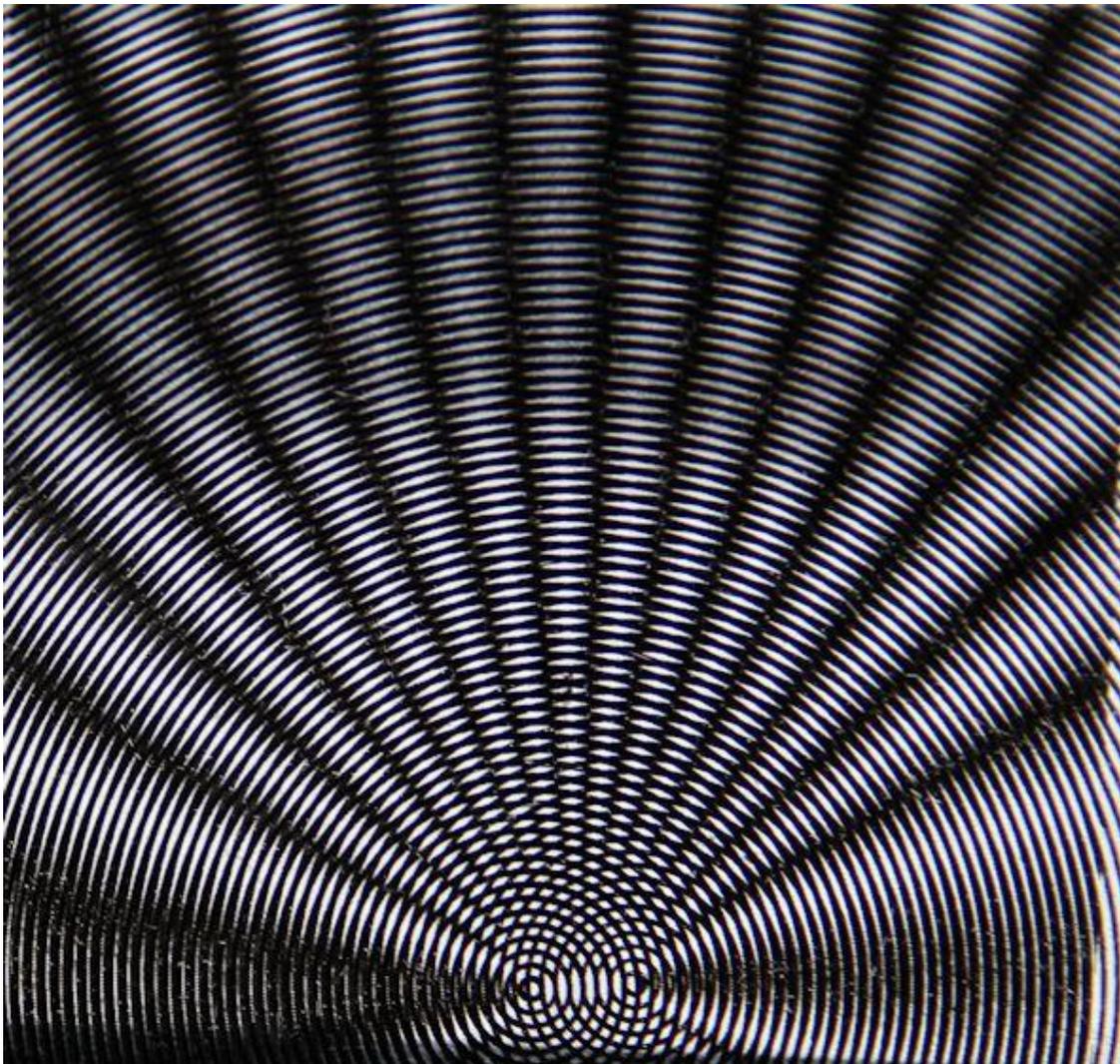


Abb.2: Interferenz zweier Kreiswellen

Diese Kurven lassen sich berechnen, indem man die Intensität der einzelnen Elementarwellen, die von jedem Punkt der Quellen ausgehen, unter Berücksichtigung ihrer Phasenverschiebung addiert. Die Herleitung der Formel ist recht kompliziert und soll deshalb hier nicht durchgeführt werden. Man findet sie in vielen Hochschullehrbüchern²⁾. Das Ergebnis lautet:

$$I = I_0 * \left(\frac{\sin\left(\pi b \sin\frac{\alpha}{\lambda}\right) * \sin\left(\pi n g \sin\frac{\alpha}{\lambda}\right)}{\pi b * \sin\left(\frac{\alpha}{\lambda}\right) * \sin\left(\pi g \sin\frac{\alpha}{\lambda}\right)} \right)^2.$$

Darin bedeuten:

I: Intensität in Abhängigkeit vom Beugungswinkel α

I_0 : Intensität bei $\alpha = 0^\circ$

b: Breite einer Quelle in m

g: Abstand zweier Quellen in m

λ : Wellenlänge in m

n: Anzahl der Quellen.

Auswerten lässt sich die sehr komplizierte Formel nur mit Computerprogrammen, etwa Excel. Man kann für verschiedene Quellenanzahlen, Quellenbreiten, Quellenabstände und Wellenlängen die Intensitätsverteilung berechnen und graphisch darstellen, bei Bedarf auch für mehrere Wellenlängen gleichzeitig.

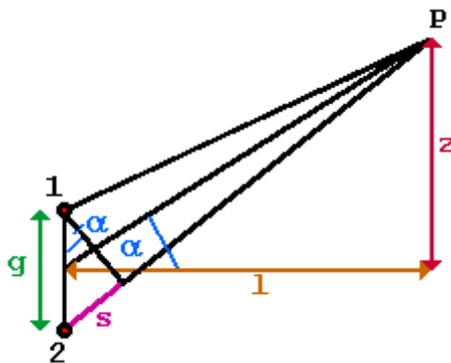


Abb.3: Interferenz zweier Schallquellen

Durch einfache geometrische Überlegungen erhält man außerdem die Winkel, unter denen man Maxima und Minima entlang einer Linie findet, die parallel zur Verbindungslinie der Schallquellen verläuft. Dazu nimmt man an, die Schallquellen seien punktförmig und von jeder Quelle gehe nur eine Elementarwelle aus. Sie überlagern sich und ergeben ein Interferenzmuster. Die Überlegungen lassen sich am einfachsten am Beispiel zweier Schallquellen erläutern. Betrachten Sie dazu Abb.3. Die Ziffern 1 und 2 bezeichnen die beiden Schallquellen und die von ihnen ausgehenden Wellennormalen der Elementarwellen. Man liest ab:

$$\sin\alpha = \frac{s}{g}$$

$$\tan\alpha = \frac{z}{l}.$$

Damit sich die beiden Elementarwellen im Punkt P verstärken, muss für ihren Gangunterschied s

$$s = k * \lambda$$

gelten mit

$$k = 0,1,2,3 \dots$$

Damit sie sich auslöschen, muss

$$s = \frac{(2k - 1) * \lambda}{2}$$

sein mit

$$k = 1,2,3 \dots$$

Damit beobachtet man Maxima unter Winkeln, für die gelten:

$$\sin\alpha_k = \frac{k * \lambda_k}{g}$$

$$\tan\alpha_k = \frac{z_k}{l}$$

und Minima unter Winkeln, für die gelten:

$$\sin\alpha_k = \frac{(2k - 1) * \lambda_k}{2 * g}$$

$$\tan\alpha_k = \frac{z_k}{l}.$$

Darin bedeuten:

α_k : Winkel des Nebenmaximums/Nebenminimums k.Ordnung

k: Ordnung des Nebenmaximums/Nebenminimums

λ : Wellenlänge

g: Abstand der beiden Schallquellen

z: Abstand des Nebenmaximums/Nebenminimums vom Hauptmaximum

l: Entfernung Schallquellen-Schallempfänger.

Die Winkel, unter denen Maxima und Minima auftreten, hängen von der Wellenlänge des Schalls ab, wie die obigen Formeln zeigen. Daher wird der Schall einer Schallquelle, die mehrere Frequenzen gleichzeitig abstrahlt, in die einzelnen Tonhöhen aufgespalten. Nur im Hauptmaximum hört man alle Frequenzen gleichzeitig. Tiefe Frequenzen werden stärker gebeugt als hohe, weil ihre Wellenlänge größer ist. Die gleichen Formeln ergeben sich für die Interferenz von mehr als zwei Schallquellen.

2.3.3 Stehende Welle

Eine stehende Welle entsteht, wenn sich eine hin- und eine rücklaufende Welle überlagern. Die rücklaufende Welle kann dabei z.B. durch Reflexion der hinlaufenden Welle an einem

Hindernis erzeugt werden. Eine stehende Welle zeichnet sich dadurch aus, dass es entlang des Ausbreitungsweges ortsfeste Stellen dauerhafter Ruhe und Stellen dauerhafter Bewegung gibt (s. Abb.4).

Die Stellen ständiger Ruhe nennt man die Knoten der stehenden Welle, die Orte ständiger Bewegung Bäuche. Die Entfernung zweier Knoten bzw. zweier Bäuche entspricht der halben Wellenlänge. Daher benutzt man stehende Wellen gerne, um die Wellenlänge einer unbekanntes Welle zu bestimmen. Kennt man zusätzlich die Frequenz, so kann man mit der Grundgleichung auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit errechnen.

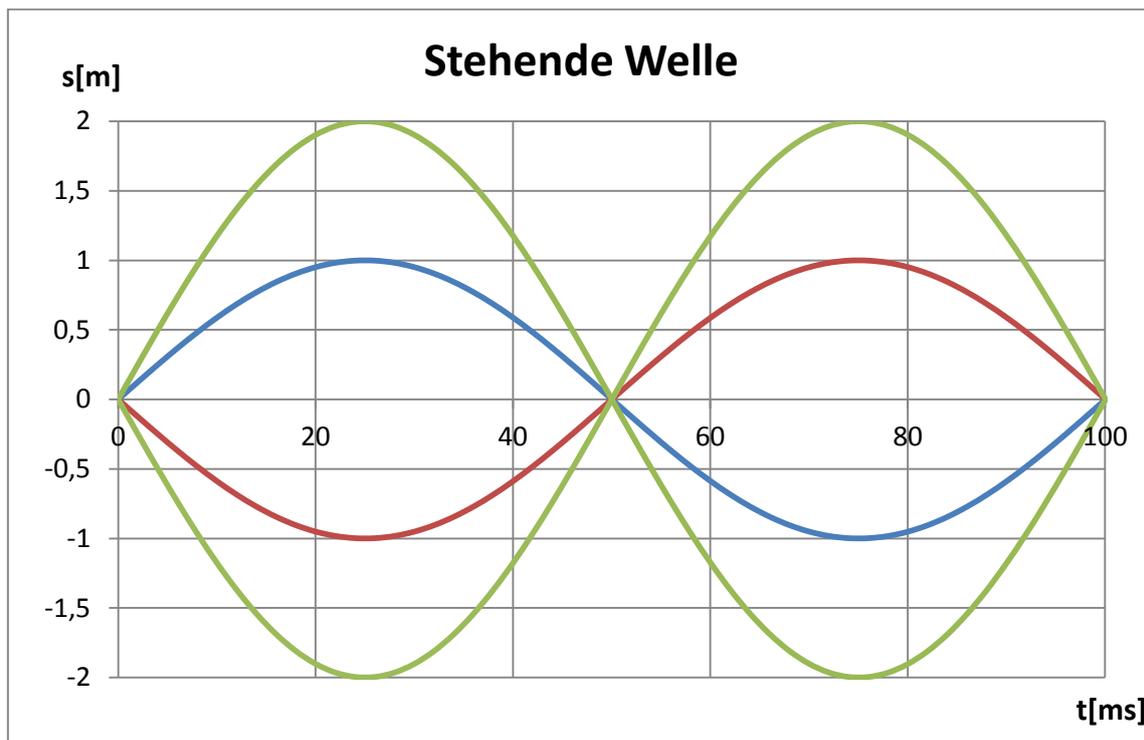


Abb.4: stehende Welle

Mathematisch kann man eine stehende Welle folgendermaßen beschreiben:

Hinwelle:

$$s_1(t, x) = s_0 * \sin(\omega * t - k * x)$$

Rückwelle:

$$s_2(t, x) = s_0 * \sin(\omega * t + k * x).$$

Für die stehende Welle gilt mit dem Additionstheorem:

$$\begin{aligned} s(t, x) &= s_1(t, x) + s_2(t, x) \\ &= 2 * s_0 * \cos(k * x) * \sin(\omega * t) \\ &= s(x) * \sin(\omega * t). \end{aligned}$$

Diese Gleichung beschreibt eine sinusförmige Schwingung, deren Amplitude cosinusförmig vom Ort abhängt. Das bedeutet: Es gibt Orte x, an denen die Amplitude und damit die

Elongation dauerhaft null ist und Stellen, an denen die Schwinger mit der doppelten Amplitude der Ausgangswelle schwingen (s. Abb.4). Eine stehende Welle erhöht die Intensität der Welle, bei Schallwellen damit die Lautstärke. Stehende Welle kann man erzeugen, in dem man eine Metallwand mit einer Schallquelle anstrahlt oder zwei in Phase schwingende Schallquellen in einiger Entfernung gegeneinander richtet. Die Intensität der Welle zwischen Quelle und Wand registriert man mit einem Mikrofon bzw. einem Ultraschallempfänger.

2.3.4 Schwebung

Eine Schwebung entsteht, wenn sich zwei in die gleiche Richtung laufende Wellen leicht unterschiedlicher Frequenz überlagern. An jedem Ort beobachtet man dann ein periodisches An- und Abschwellen der Intensität der Welle (s. Abb.5).

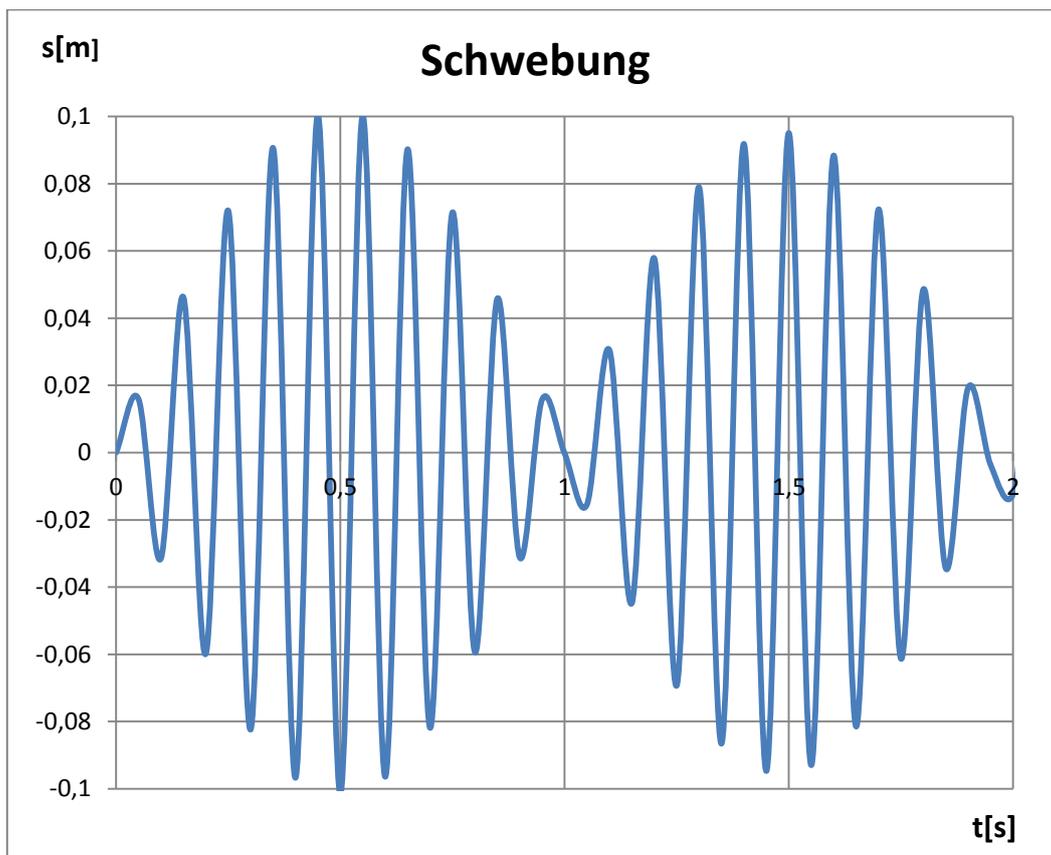


Abb.5: Schwebung

Die Frequenz, mit der dies geschieht, nennt man Schwebungsfrequenz. Sobald die Frequenzen der beiden Wellen genau übereinstimmen, hört die Schwebung auf. Im Gegensatz zu einer stehenden Welle ist die Zu- bzw. Abnahme der Amplitude nicht ortsfest. Sie läuft den ganzen Ausbreitungsweg entlang, so dass sie an jedem Ort registriert werden kann. Musiker nutzen Schwebungen, um Instrumente aufeinander zu stimmen. Sind die beiden Instrumente für einen Ton etwas gegeneinander verstimmt, so hören sie eine Schwebung. Ein oder beide Instrumente müssen solange umgestimmt werden, bis die Schwebung aufhört. Dann strahlen beide die gleiche Frequenz ab. Mathematisch lässt sich eine Schwebung wie folgt beschreiben. Für die beiden Wellen gelten:

1. Welle:

$$s_1(t, x) = s_0 * \sin(\omega_1 * t - k_1 * x)$$

2. Welle:

$$s_2(t, x) = s_0 * \sin(\omega_2 * t - k_2 * x).$$

Damit erhält man für die Schwebung mit dem Additionstheorem folgende Gleichung:

$$s(t, x) = 2 * s_0 * \cos\left(\frac{(\omega_1 - \omega_2) * t}{2} - \frac{(k_1 - k_2) * x}{2}\right) * \sin\left(\frac{(\omega_1 + \omega_2) * t}{2} - \frac{(k_1 + k_2) * x}{2}\right).$$

Man setzt:

$$\omega_S = (\omega_1 - \omega_2)/2$$

$$k_S = (k_1 - k_2)/2$$

als Schwebungskreisfrequenz bzw. Schwebungswellenzahl und

$$\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2$$

$$k = (k_1 + k_2)/2$$

als neue Schwingungskreisfrequenz bzw. Wellenzahl. Für die Schwingungsfrequenz bzw. Schwebungsfrequenz gilt damit:

$$f = (f_1 + f_2)/2$$

$$f_S = (f_1 - f_2)/2.$$

Es ergibt sich:

$$s(t, x) = 2 * s_0 * \cos(\omega_S * t - k_S * x) * \sin(\omega * t - k * x) \\ = A(t, x) * \sin(\omega * t - k * x).$$

Diese Gleichung beschreibt eine sinusförmige Welle, deren Amplitude $A(t, x)$ sich mit dem Ort und der Zeit ändert. Man könnte sie auch als amplitudenmodulierte Sinuswelle der Frequenz f auffassen, wobei die Amplitude mit der Schwebungsfrequenz f_S variiert.

2.4 Dopplereffekt

Bewegt sich eine Schallquelle auf einen Beobachter zu, so erscheint dem Hörer die Frequenz der ausgesandten Schallwelle erhöht, bewegt sie sich von ihm weg, so nimmt er eine niedrigere Frequenz wahr. Gleiches beobachtet ein Hörer, der sich auf die Schallquelle zu bzw. von ihr weg bewegt. Es kommt auf die Relativbewegung zwischen Quelle und Empfänger an. Be-

wegt sich die Quelle auf den Beobachter zu, so werden die Wellenberge gestaucht, da der nachfolgende Wellenberg an einem Ort ausgesandt wird, der näher auf Beobachter liegt. Oder anders ausgedrückt, während sich ein Wellenberg ausbreitet, bewegt sich die Quelle ein Stück weiter zum Beobachter hin oder von ihm weg, so dass der nachfolgende Wellenberg eine geringere oder größere Entfernung zum vorhergehenden hat, wie wenn die Quelle ruhen würde. Die Wellenlänge der Welle erscheint verkürzt bzw. verlängert und damit die Frequenz erhöht bzw. erniedrigt, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls gleich bleibt. Bewegt sich der Beobachter auf die Quelle zu oder von ihr, so schneidet er die Wellenberge in kürzeren bzw. längeren Zeitabschnitten, wie wenn er ruhen würde. Die Geschwindigkeit der Welle erscheint erhöht bzw. erniedrigt und damit die Frequenz, da die Wellenlänge, also die Entfernung zweier Wellenberge gleich bleibt. Der Name des Effektes rührt vom Schweizer Physiker Doppler her, der diese Erscheinung zum ersten Mal untersucht und erklärt hat. Die Gesetze lassen sich wie folgt ableiten (s. Abb.1):

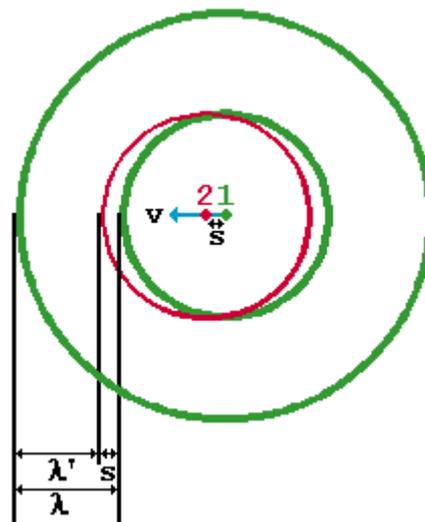


Abb.1: Dopplereffekt

Ein Schallsender mit der Frequenz f bewegt sich mit der Geschwindigkeit v auf einen Beobachter zu, in der Abb. 1 nach links. Zum Zeitpunkt $t = 0$ sendet er am Ort 1 und zum Zeitpunkt $t_2 = T$ am Ort 2 jeweils einen Wellenberg aus, worin T die Periodendauer der Welle ist. Der erste Wellenberg legt in der Zeit T eine Strecke zurück, die der Wellenlänge λ entspricht

$$\lambda = c * T = c/f,$$

die Quelle die Strecke

$$s = v * T.$$

Darin ist c die Geschwindigkeit des Schalls und v die der Quelle. Damit haben für den Beobachter die beiden Wellenberge eine Entfernung λ' und damit die Welle eine Wellenlänge

$$\begin{aligned} \lambda' &= c * T - v * T \\ &= \lambda - v * T \\ &= \lambda - v/f. \end{aligned}$$

Ersetzt man λ und λ' mit Hilfe der Wellengleichung, so folgt:

$$\frac{c}{f'} = \frac{c}{f} - \frac{v}{f}$$

und damit

$$\begin{aligned} f' &= \frac{c * f}{c - v} \\ &= \frac{f}{1 - \frac{v}{c}} \end{aligned}$$

Nähert sich der Sender dem Beobachter, so ist v positiv und f' ist größer als f . Entfernt er sich, so ist v negativ und damit f' kleiner als f . Bewegt sich der Empfänger, so erreichen ihn die fortschreitenden Wellenberge früher, ihre Geschwindigkeit relativ zum Beobachter ist auf

$$c' = c + v$$

erhöht. Deshalb empfängt er eine Welle mit der Frequenz

$$\begin{aligned} f' &= \frac{c'}{\lambda} \\ &= \frac{c + v}{\lambda} \\ &= \frac{f * (c + v)}{c} \\ &= f * \left(1 + \frac{v}{c}\right). \end{aligned}$$

In dieser Gleichung ist v positiv, wenn sich der Empfänger auf den Sender zu bewegt und negativ, wenn er sich von ihr weg bewegt. Im ersten Fall hört er eine höhere, im zweiten Fall eine niedrigere Frequenz.

3 Schallschranke

3.1 Schaltplan

Abb.1 zeigt den Aufbau der Schaltung. Sie gliedert sich in zwei Teile:

- 1) das Empfangsteil für das Schallsignal und
- 2) ein Monoflop, das TTL-kompatible Signale erzeugt.

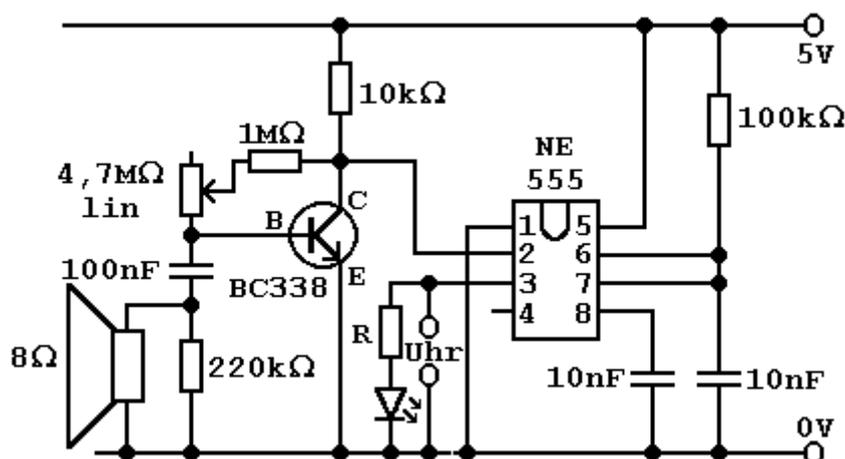


Abb.1: Schaltplan

Das Schallempfangsteil besteht aus einem kleinen Lautsprecher, der als Mikrofon dient, und einem einfachen Transistorverstärker. Der Verstärker ist erforderlich, um eine genügend große Empfindlichkeit zu erreichen. Sie kann über das Potentiometer in einem relativ weiten Bereich variiert werden. Der Kollektor des Transistors steuert den Eingang eines Zeitgeber-ICs NE555 an, das als Monoflop geschaltet ist. Mit den angegebenen Werten $R = 100 \text{ k}\Omega$ und $C = 10 \text{ nF}$ springt sein Ausgang nach dem Eintreffen eines Signals für ca.

$$T = R * C = 1 * 10^5 \Omega * 1 * 10^{-8} F = 1ms$$

von L- auf H-Niveau. Diese Zeit reicht aus, um einen angeschlossenen Digitalzähler ein- bzw. auszuschalten und die LED kurz zum Leuchten zu bringen. Sie dient als Kontrolllämpchen. Ihr Vorwiderstand R muss bei einer normalen LED 220Ω , bei einer Low-Current-LED $2,2 \text{ k}\Omega$ betragen.

3.2 Aufbau

Die benötigten Bauteile für eine Schallschranke entnehmen Sie der Tabelle 1. Zur Messung der Schallgeschwindigkeit benötigen Sie zwei dieser Schaltungen. Die einzelnen Bauteile verlötet man nach Abb. 2 auf einer Lochrasterplatine mit Leiterbahnen und baut sie anschließend mit dem Lautsprecher, dem Poti und der LED in ein kleines Gehäuse ein. Beachten Sie, dass an den mit roten Pfeilen gekennzeichneten Stellen die Leiterbahnen

unterbrochen werden müssen. Das gelingt am einfachsten mit einem scharfen Teppichmesser.

Widerstände:		
1	220 Ω bzw. 2,2 k Ω	0,25 W
1	10 k Ω	0,25 W
1	100 k Ω	0,25 W
1	220 k Ω	0,25 W
1	1 M Ω	0,25 W
Potentiometer		
1	4,7 M Ω lin	
Kondensatoren		
2	10 nF	
1	100 nF	
Transistoren/IC's		
1	BC 338/40	
1	Timer NE555 8/DIL	
weiteres Zubehör:		
1	LED, rot, 3 mm mit Fassung	
1	Lochrasterplatine mit Lötstreifen 5x9 cm, RM 2,54 mm	
1	Miniaturlautsprecher 8W/0,1 W; 40x40 mm	
1	Kunststoffgehäuse, 120x59x36 mm	
1	Buchse, gelb, für 4 mm Stecker	
1	Buchse, rot, für 4 mm Stecker	
1	Buchse, schwarz, für 4 mm Stecker	
1	Drehknopf, Typ 12/6	
1	IC-Fassung, 8polig DIL	
4	Schrauben mit Mutter, 3x15 mm	
etwas	Schaltlitze, Lötzinn	

Tabelle 1: Benötigte Bauteile

Die Vorderansicht des Gehäuses zeigt Abb. 3. Die kleinen 3 mm Bohrungen im oberen Teil sind die Schalllöcher für den Lautsprecher. Er wird mit vier 3 mm Schrauben am Gehäuse befestigt. Für das Potentiometer benötigt man eine 10 mm Bohrung. Rechts neben dem Drehknopf des Potentiometers befindet sich die LED. Ihre Fassung passt in eine 6 mm Bohrung. Über die schwarze und rote Buchse wird die benötigte Betriebsspannung $U_B = 5\text{ V}$ eingespeist. Sie kann dem 5V/1A-Ausgang des Digitalzählers von Phywe oder einem stabilisierten Netzgerät entnommen werden. Das positive Steuersignal für den Zähler liegt an der gelben Buchse, das negative an der gemeinsamen schwarzen Minusbuchse. Für die Buchsen braucht man jeweils 8 mm Bohrungen. Die Teile lassen sich je nach Gehäusegröße auch anders anordnen. Die Schaltung wird wie eine Gabellichtschranke betrieben. Am

Digitalzähler wählt man die Betriebsart „Time“ mit den beiden ansteigenden TTL-Flanken. Zur Schallgeschwindigkeitsmessung benötigt man zwei dieser Schallschranken, eine, um die Uhr zu starten, und eine, um sie zu stoppen. Statt eines Digitalzählers kann man auch ein Messwerterfassungssystem, z.B. Cassy von Leybold benutzen, das mit einem Computer verbunden wird. Vor dem eigentlichen Versuch stellt man die Empfindlichkeit der akustischen Schalter ein. Dazu dreht man die Schaltung über das Potentiometer so weit auf, dass die LED gerade dauerhaft aufleuchtet. Am Ausgang des Monoflop liegt dann ständig ein H-Signal an. Dreht man das Potentiometer so weit zurück, dass die LED gerade wieder erlischt, so ist die Schaltung betriebsbereit. Je weiter man das Poti zurückregelt, umso unempfindlicher wird sie. Die besten Ergebnisse erzielt man im oberen Bereich der Empfindlichkeit.

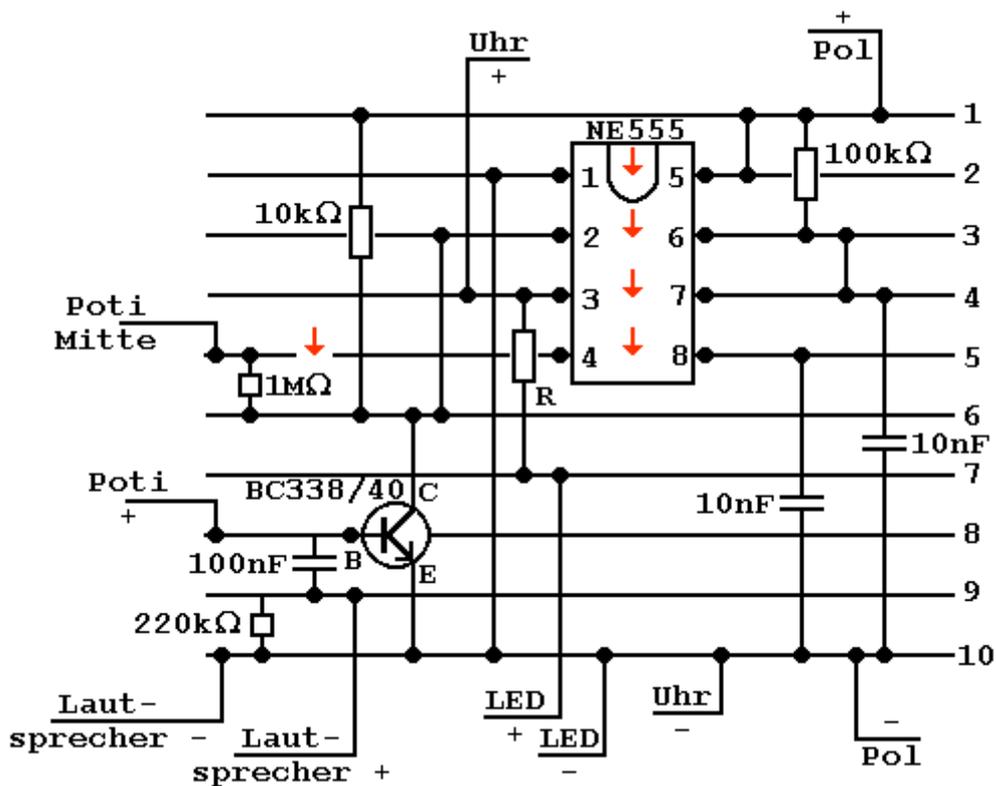


Abb.2: Verschaltung auf einer Lochrasterplatine



Abb.3:
Fertige Schallschranke

4 Ultraschallsender

4.1 Schaltungen

4.1.1 Sender mit fester Frequenz

Abb. 1 zeigt die benötigte Schaltung^{3,4)}.

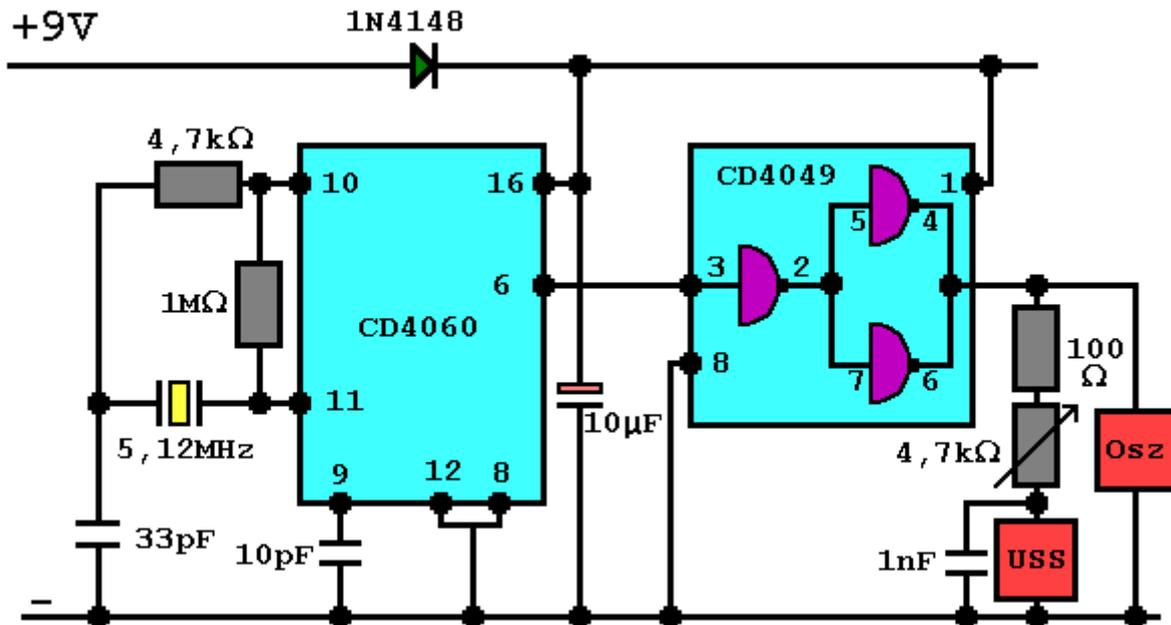


Abb.1: Ultraschallsender mit fester Frequenz

Es handelt sich um einen Quarzoszillator mit der Frequenz

$$f_0 = 5,12 \text{ MHz.}$$

Sie wird durch einen Binärteiler um den Faktor 2^7 herabgesetzt und liefert somit an Ausgang 6 eine Frequenz

$$f = \frac{5120000 \text{ Hz}}{2^7} = 40000 \text{ Hz} = 40 \text{ kHz.}$$

Oszillator und Binärteiler sind im CMOS-Baustein CD4060 integriert. Der Baustein CD4049 dient als Treiber für den Ultraschallsender. Damit man zwei Sender gleichzeitig anschließen kann, sind zwei Inverter am Ausgang parallel geschaltet. Sie werden ihrerseits über den ersten Inverter mit dem Ausgang des Oszillators verbunden. Mit Hilfe des Potentiometers am USS-Ausgang kann man die Amplitude der Schwingung des Senders einstellen.

4.1.2 Sender mit variabler Frequenz

Abb. 2 zeigt den benötigten Aufbau⁵⁾. Es handelt sich um einen Multivibrator auf der Basis des Timerbausteins NE555. Die Frequenz kann man laut Datenblatt des Herstellers bei einem Widerstand $R_T = 15 \text{ k}\Omega$ des Trimpotis über das Potentiometer $R = 4,7 \text{ k}\Omega$ einstellen zwischen

$$f_1 = \frac{1,44}{1000\Omega + 2 * (4700\Omega + 15000\Omega) * 1 * 10^{-9}F}$$

$$= 35644Hz$$

$$= 35,644kHz$$

und

$$f_2 = \frac{1,44}{1000\Omega + 2 * 15000\Omega * 1 * 10^{-9}F}$$

$$= 46452Hz$$

$$= 46,452kHz.$$

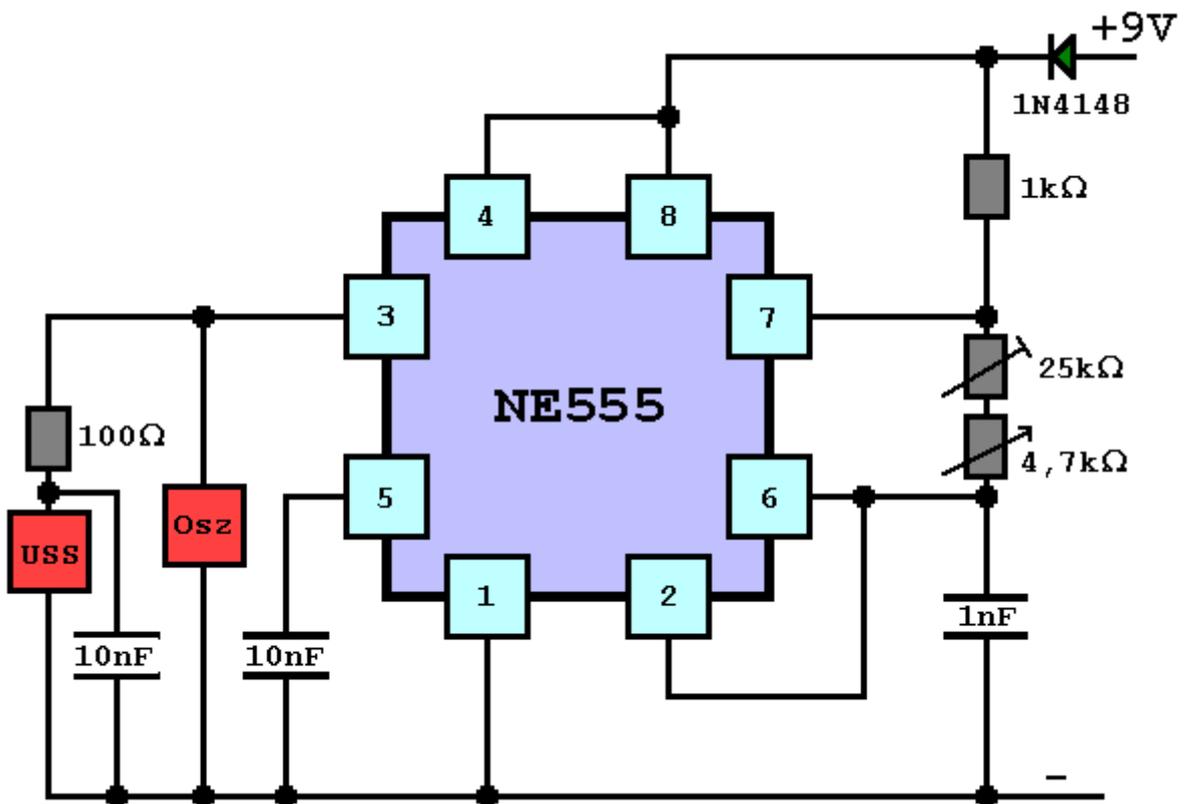


Abb.2: Ultraschallsender mit variabler Frequenz

Man kann den Oszillator somit optimal auf die Resonanzfrequenz f_{US} eines Ultraschallsenders abstimmen, da sie laut Hersteller bei

$$f_{US} = (40 \pm 1) kHz$$

liegt. Beim Nachbau der Schaltung ist allerdings der exakte Kapazitätswert des Kondensators $C = 1 \text{ nF}$ am Eingang 6 ein Problem. Bei handelsüblichen Kondensatoren kann er leicht um mehr als 20% vom Nennwert abweichen. Der wirkliche Vorwiderstand des Potentiometers liegt somit zwischen 10 und 20 k Ω . Daher ist es sinnvoll, keinen 15k Ω -Festwiderstand in die

Schaltung einzubauen, sondern einen Trimpoti mit $25\text{k}\Omega$. Er wird nach dem Bau der Schaltung einmal auf den gewünschten Frequenzbereich abgestimmt. Die genaue Vorgehensweise wird in Kapitel 4.3.2 erläutert. Man könnte im Prinzip die Kombination aus Trimpoti und Potentiometer durch ein einziges Potentiometer mit $R = 22\text{k}\Omega$ ersetzen. Dann ist jedoch der einstellbare Frequenzbereich so groß, dass man die Schaltung nur sehr schlecht auf die exakte Resonanzfrequenz des Ultraschallsenders abstimmen kann. Die Diode 1N4148 dient als Verpolungsschutz.

4.1.3 Empfänger mit Audioeinheit

Das Empfangsgerät^{3,4)} für einen Ultraschallempfänger entnehmen Sie Abb.3. In Abb.4 finden Sie eine dazu passende Audioeinheit, mit der man die Ultraschallsignale hörbar machen kann.

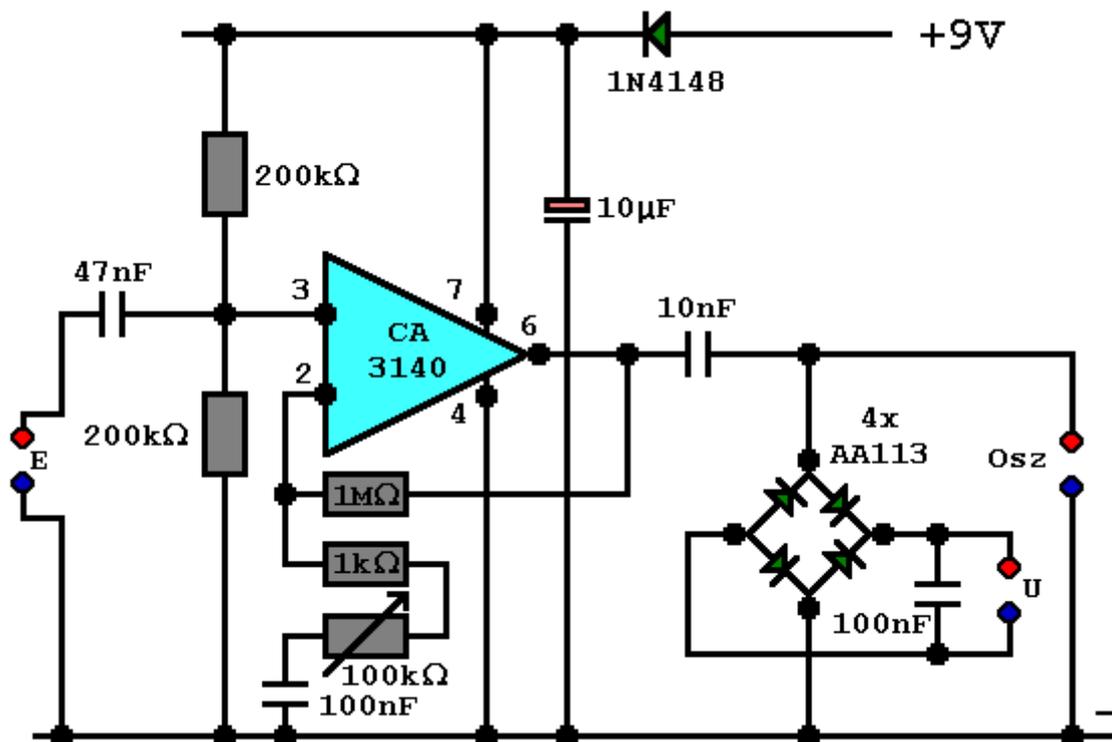


Abb.3: Empfangsgerät für Ultraschallempfänger

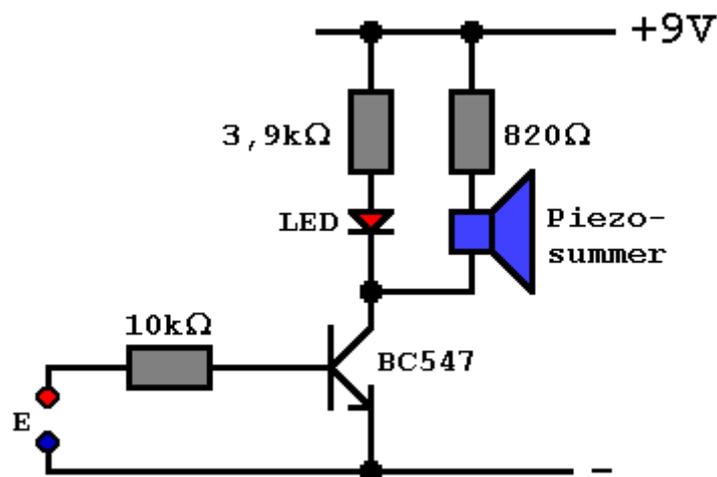


Abb.4: Audioeinheit für Ultraschallempfänger

In Abb.3 handelt sich um eine Verstärkerschaltung auf der Basis des Operationsverstärkers CA3140. Die Verstärkung V lässt sich über das Potentiometer zwischen

$$V_1 = \frac{1M\Omega}{101k\Omega} = 10$$

und

$$V_2 = \frac{1M\Omega}{1k\Omega} = 1000$$

einstellen und reicht somit in jedem Fall aus, um das Eingangssignal des Ultraschallempfängers bis in den Voltbereich zu verstärken, so dass man es mit einem Oszillographen oder einem Voltmeter problemlos nachweisen kann. Da schulübliche Demonstrationswechsellspannungsgeräte im Frequenzbereich des Ultraschallsenders meist sehr unempfindlich sind, wird das Ausgangssignal über die vier Germaniumdioden AA113 gleichgerichtet, so dass man es mit einem Gleichspannungsvoltmeter detektieren kann. Die Audioeinheit in Abb. 4 ist eine einfache Transistorschaltung. Ist das Signal am Eingang groß genug, so schaltet der Transistor durch, die LED leuchtet und der Piezoschallgeber ertönt mit einer festen Frequenz $f = 3,6 \text{ kHz}$. Dieser Ton ist durchdringend und nicht zu überhören. Sollte er nervig sein, kann man auch einen Signalgeber mit einer anderen Frequenz benutzen oder man erhöht den Vorwiderstand auf $1,2 \text{ k}\Omega$. Die Eingänge der Audioeinheit E+ und E- werden mit den Oszillographenausgängen Osz+ und Osz- des Verstärkers verbunden. Als Spannungsversorgung kann man für alle Schaltungen ein Netzteil mit $U = 9 \text{ V}$ benutzen, dessen Ausgangsspannung stabilisiert ist. Für den Verstärker und die Audioeinheit reicht ein gemeinsames Netzteil.

4.2 Benötigte Teile

4.2.1 Sender mit fester Frequenz

Man benötigt folgende Bauteile. Sie sind im Elektronikhandel erhältlich.

Menge	Bauteil	Wert
1	IC	CD4060
1	IC	CD4049
2	IC-Fassungen	16polig
1	Si-Diode	1N4148
1	Elektrolytkondensator	$10\mu\text{F}$
1	Tantalkondensator	1nF
1	Tantalkondensator	10pF
1	Tantalkondensator	33pF
1	Widerstand	$4,7\text{k}\Omega$
1	Widerstand	$1\text{M}\Omega$
1	Widerstand	100Ω
1	Potentiometer	$4,7\text{k}\Omega$, Achse $\varnothing 6 \text{ mm}$
1	Drehknopf	Achse $\varnothing 6 \text{ mm}$
1	Schwingquarz	$5,12\text{MHz}$
1	Lochrasterplatine	RM $2,54\text{mm}$, $5 \times 7\text{cm}^2$
3	Buchsen	rot, $\varnothing 4 \text{ mm}$

3	Buchsen	schwarz, \varnothing 4mm
1	Gehäuse	ca. 16,5x8,5x2,5cm ³
1	Gummistopfen	Φ 3cm, 2 Löcher \varnothing 8mm
1	Ultraschallsender	SQ40T
1	Ultraschallsender	wasserdicht, KPUS 40FS-18T-477
2	Kupplung	rot, \varnothing 4 mm, Schraubanschluss
2	Kupplung	schwarz, \varnothing 4 mm, Schraubanschluss
2	Kupferdraht	\varnothing 2 mm, Länge 3cm
2	Kupferdraht	\varnothing 2 mm, Länge 10cm
4	Schrauben	\varnothing 3 mm, Länge 1,5cm
8	Mutter	M3
1	Schaltlitze	ca. 1m
1	Lötmaterial	Lötzinn, LötKolben
1	Netzteil	Ausgang: 9V, stabilisiert

4.2.2 Sender mit variabler Frequenz

Man benötigt folgende Bauteile. Sie sind im Elektronikhandel erhältlich.

Menge	Bauteil	Wert
1	IC	NE555
1	IC-Fassung	8polig
1	Si-Diode	1N4148
1	Tantalkondensator	1nF
2	Tantalkondensator	10nF
1	Widerstand	1k Ω
1	Widerstand	100 Ω
1	Trimpoti	25k Ω
1	Potentiometer	4,7k Ω , Achse \varnothing 6 mm
1	Drehknopf	Achse \varnothing 6 mm
1	Lochrasterplatine	RM 2,54mm, 6x4cm ²
3	Buchsen	rot, \varnothing 4 mm
3	Buchsen	schwarz, \varnothing 4mm
1	Gehäuse	ca. 16,5x8,5x2,5cm ³
1	Gummistopfen	Φ 3cm, 2 Löcher \varnothing 8mm
1	Ultraschallsender	SQ40T
1	Ultraschallsender	wasserdicht, KPUS 40FS-18T-447
2	Kupplung	rot, \varnothing 4 mm, Schraubanschluss
2	Kupplung	schwarz, \varnothing 4 mm, Schraubanschluss
2	Kupferdraht	\varnothing 2 mm, Länge 3cm
2	Kupferdraht	\varnothing 2 mm, Länge 10cm
4	Schrauben	\varnothing 3 mm, Länge 1,5cm
8	Mutter	M3
1	Schaltlitze	ca. 1m
1	Lötmaterial	Lötzinn, LötKolben
1	Netzteil	Ausgang: 9V, stabilisiert

4.2.3 Empfänger mit Audioeinheit

Man benötigt folgende Bauteile. Sie sind im Elektronikhandel erhältlich.

Menge	Bauteil	Wert
1	IC	CA3140/CA3140E
1	IC-Fassung	8polig
1	Si-Diode	1N4148
4	Ge-Dioden	AA113
1	Elektrolytkondensator	10 μ F
2	Tantalkondensator	100nF
1	Tantalkondensator	47nF
1	Tantalkondensator	10nF
1	Widerstand	1M Ω
2	Widerstand	200k Ω
1	Widerstand	10k Ω
1	Widerstand	3,9k Ω
1	Widerstand	1k Ω
1	Widerstand	820 Ω
1	Potentiometer	100k Ω , Achse \varnothing 6 mm
1	Drehknopf	Achse \varnothing 6 mm
1	Transistor	BC547
1	LED	rot, 8mm, Low Current
1	LED-Fassung	Plastik, 8mm
1	Mikroschalter	Ein/Aus
1	Lochrasterplatine	RM 2,54mm, 6x5cm ²
1	Lochrasterplatine	RM 2,54mm, 4,5x3cm ²
6	Buchsen	rot, \varnothing 4 mm
6	Buchsen	schwarz, \varnothing 4mm
1	Gehäuse	ca. 16,5x8,5x2,5cm ³
1	Gehäuse	ca. 10x6x2,5cm ³
1	Gummistopfen	Φ 3cm, 2 Löcher \varnothing 8mm
1	Ultraschallempfänger	SQ40R
1	Ultraschallempfänger	wasserdicht, KPUS 40FS-18R-448
1	Piezosignalgeber	RMP-32SP/HAT, 3,6kHz
2	Kupplung	rot, \varnothing 4 mm, Schraubanschluss
2	Kupplung	schwarz, \varnothing 4 mm, Schraubanschluss
2	Kupferdraht	\varnothing 2 mm, Länge 3cm
2	Kupferdraht	\varnothing 2 mm, Länge 10cm
6	Schrauben	\varnothing 3 mm, Länge 1,5cm
12	Mutter	M3
1	Schaltlitze	ca. 2m
1	Lötmaterial	Lötzinn, LötKolben
1	Netzteil	Ausgang: 9V, stabilisiert

4.3 Bau der Schaltungen

4.3.1 Sender mit fester Frequenz

Abb.1 zeigt die Verschaltung des Senders auf einer Lochrasterplatine.

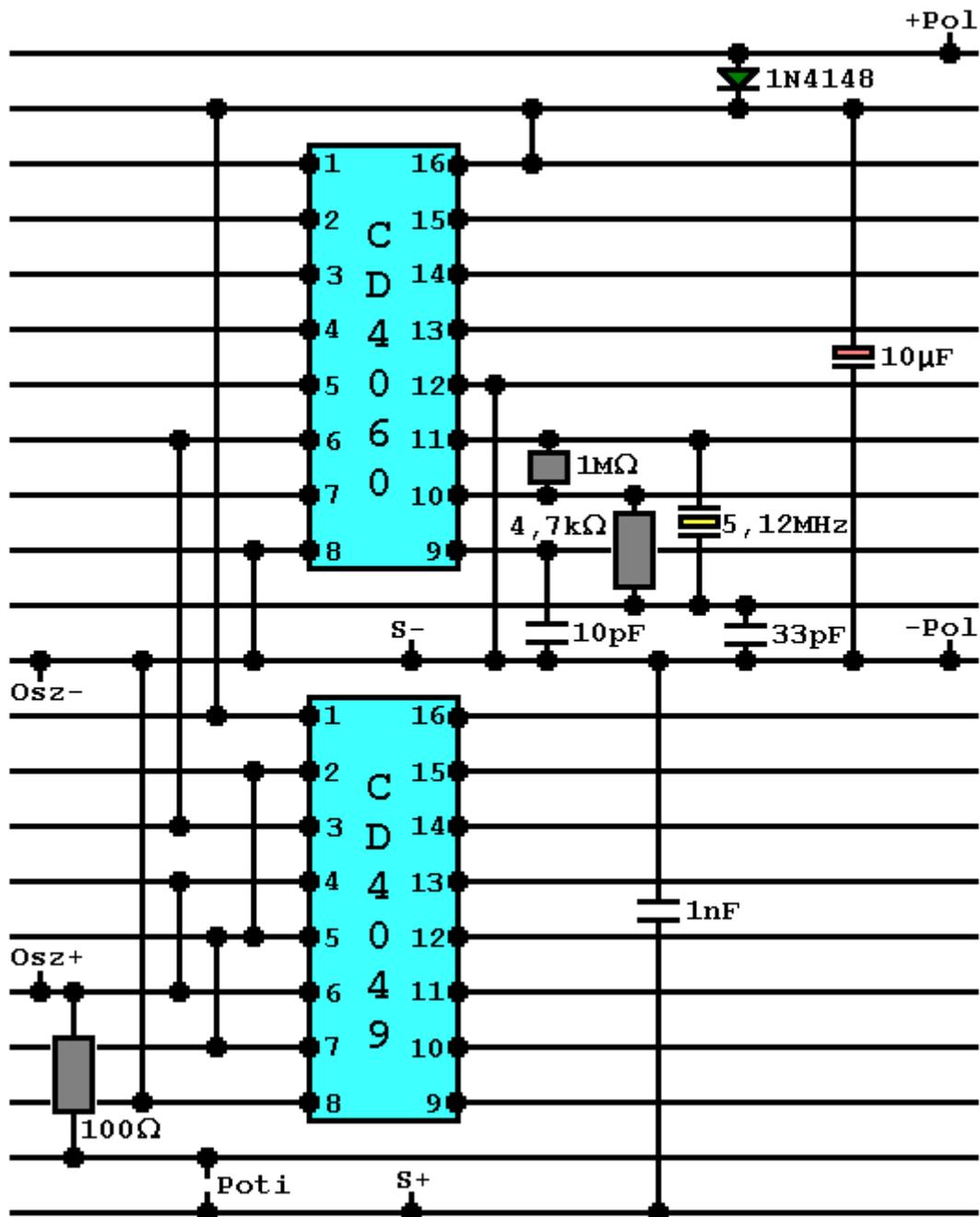


Abb.1: Verschaltung auf einer Platine

Man verlötet die Teile auf der Platine inklusive der Fassungen für die ICs CD4060 und CD4049. Zuvor muss man die Leiterbahnen unter den Fassungen mit einem Teppichmesser unterbrechen, sofern man keine spezielle Platine mit vorgegebenen Steckplätzen für ICs benutzt. Die geraden Linien sind Verbindungen aus Schalllitze. Für die USS-Ausgänge S+ und S- lötet man zwei Stücke Schalllitze der Länge ca. 5 cm ein, ebenso für die Oszillographenausgänge Osz+ und Osz-, das Potentiometer und den Plus- und den Minuspol. Die Platine versieht man mit einem Holzbohrer an den vier Ecken mit 3mm-Löcher, um sie am Gehäusede-

ckel befestigen zu können. Dann setzt man die ICs CD4060 und CD 4049 in die Fassungen ein. Man bohrt die Löcher für die anderen Bauelemente in den Gehäusedeckel, für die Buchsen jeweils mit dem Durchmesser 8 mm, für das Potentiometer mit dem Durchmesser 10 mm und für die Befestigungsschrauben der Platine mit einem 3 mm Holzbohrer. Eine mögliche Verteilung der Bauelemente auf dem Deckel des Gehäuses entnehmen Sie Abb. 2. Auch andere Anordnungen sind möglich.

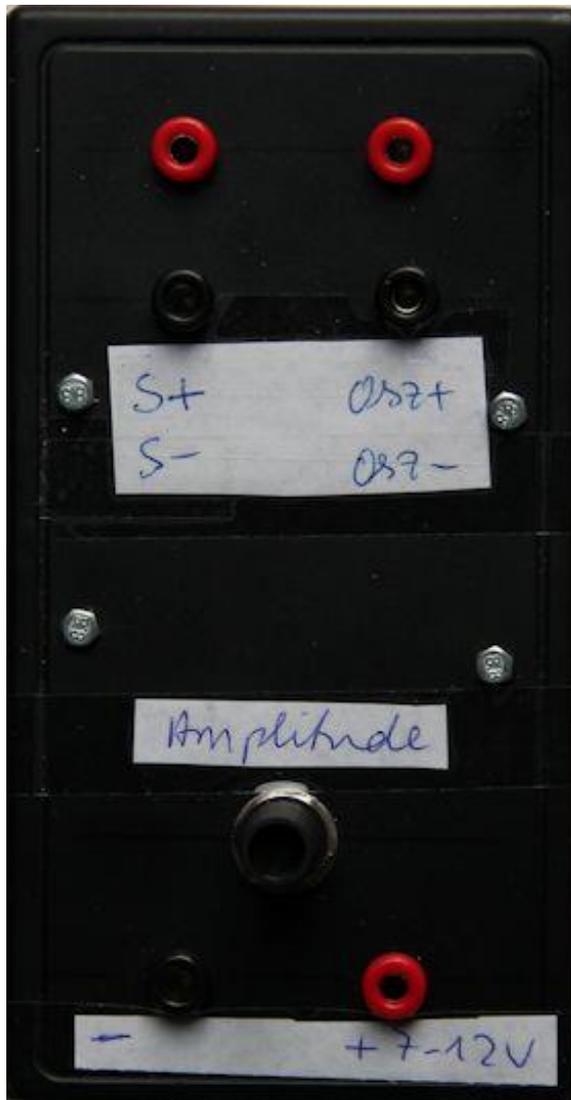


Abb.2:
Sender mit
fester Frequenz

Man benötigt drei schwarze und drei rote Buchsen, je eine schwarze und rote für die USS-Anschlüsse S+ und S-, für die Oszillographenanschlüsse Osz+ und Osz- sowie für den +Pol und den -Pol der Stromversorgung. Man verschraubt die Buchsen und das Poti am Gehäusedeckel. Die Platine befestigt man mit den vier 3 mm Schrauben und den Muttern. Damit die Platine nicht fest an den Gehäusedeckel gepresst wird, wodurch die Lötstellen beschädigt werden könnten, legt man unter die Platine ebenfalls eine Mutter. Man benötigt daher für die Platine vier Schrauben und acht Muttern. Die Schaltlitzen für den Ausgang S+, S-, Osz+ und Osz- lötet man über Lötösen an die rote bzw. schwarze Buchsen für den USS- bzw. den Oszillographenausgang, ebenso die Litzen für den +Pol und den -Pol. Das Poti schließt man an die entsprechenden Litzen auf der Platine an und zwar an den mittleren Anschluss und den rechten oder linken Eingang des Potis. Dabei sollte man darauf achten, dass die Ausgangsspannung zwischen S+ und S- bei Drehung des Potis im Uhrzeigersinn zunimmt. An-

4.3.2 Sender mit variabler Frequenz

Abb. 4 zeigt die Verschaltung des Senders auf einer Lochrasterplatine. Man verlötet die Teile auf der Platine inklusive der Fassung für den Timer NE555. Zuvor muss man die Leiterbahnen unter der Fassung mit einem Teppichmesser unterbrechen. Die geraden Linien sind Verbindungen aus Schalllitze.

Für die USS-Ausgänge S+ und S- lötet man zwei Stücke Schalllitze der Länge ca. 5 cm ein, ebenso für die Oszillographenausgänge Osz+ und Osz-, das Potentiometer und den Plus- und den Minuspol. Die Platine muss man an den vier Ecken mit 3 mm-Löchern versehen, um sie am Gehäusedeckel befestigen zu können. Dann setzt man das IC NE555 in die Fassung ein. Man bohrt die Löcher für die anderen Bauteile in den Gehäusedeckel, für die Buchsen jeweils mit dem Durchmesser 8 mm, für das Potentiometer mit dem Durchmesser 10 mm und für die Befestigungsschrauben der Platine mit einem 3 mm Holzbohrer. Eine mögliche Verteilung der Bauelemente auf dem Deckel des Gehäuses entnehmen Sie Abb. 5. Auch andere Anordnungen sind möglich.



Abb.5:
Sender mit
variabler Frequenz

Man benötigt drei schwarze und drei rote Buchsen, je eine schwarze und rote für die USS-Anschlüsse S+ und S-, für die Oszillographenanschlüsse Osz+ und Osz- sowie für den +Pol und den -Pol der Stromversorgung. Man verschraubt die Buchsen und das Poti am Gehäusedeckel. Die Platine befestigt man mit den vier 3 mm Schrauben und den Muttern. Damit die Platine nicht fest an den Gehäusedeckel gepresst wird, wodurch die Lötstellen beschädigt

werden könnten, legt man unter die Platine ebenfalls eine Mutter. Man benötigt daher für die Platine vier Schrauben und acht Muttern. Die Schaltlitzen für den Ausgang S+, S-, Osz+ und Osz- lötet man über Lötösen an die rote bzw. schwarze Buchsen für den USS- bzw. den Oszillographenausgang, ebenso die Litzen für den +Pol und den –Pol. Das Poti schließt man an die entsprechenden Litzen auf der Platine an und zwar an den mittleren Anschluss und den rechten oder linken Eingang des Potis. Dabei sollte man darauf achten, dass die Frequenz bei Drehung des Potis im Uhrzeigersinn zunimmt. Ansonsten muss man den anderen des rechten bzw. linken Anschlusses benutzen. Das Potentiometer kann man noch mit einem Knopf versehen, damit es sich exakter einstellen lässt. Dazu muss man die Achse vorher auf die zum Knopf passende Länge kürzen. Zum Schluss muss man die Schaltung auf den gewünschten Frequenzbereich abstimmen. Man schließt den Oszillographenausgang an ein Frequenzmessgerät an. Man dreht das Potentiometer in Mittelstellung und stellt mit einem Schraubenzieher den Trimpoti so ein, dass das Messgerät möglichst genau $f = 40 \text{ kHz}$ anzeigt. Mit dem Potentiometer kann man dann die Frequenz in einem Bereich von etwa

$$f = (40 \pm 6) \text{ kHz}$$

im Schwebungsversuch variieren.

4.3.3 Empfänger mit Audioeinheit

Abb. 6 zeigt die Verschaltung der Verstärkerempfangsschaltung auf einer Lochrasterplatine. Man verlötet die Teile auf der Platine inklusive der Fassung für den Operationsverstärker CA3140. Zuvor muss man die Leiterbahnen unter der Fassung mit einem Teppichmesser unterbrechen. Die geraden Linien sind Verbindungen aus Schaltlitze. Für die Voltmeterausgänge U+, U- lötet man zwei Stücke Schaltlitze der Länge ca. 5 cm ein, ebenso für die Oszillographenausgänge Osz+ und Osz-, das Potentiometer, die Ultraschallempfänger-Eingänge E+ und E- und den Plus- und den Minuspol. In die Platine muss man an den vier Ecken 3 mm-Löcher bohren, um sie am Gehäusedeckel befestigen zu können. Dann setzt man den Operationsverstärker CA3140 in die Fassung ein. Man bohrt außerdem die Löcher für die anderen Bauteile in den Gehäusedeckel, für die Buchsen jeweils mit dem Durchmesser 8 mm, für das Potentiometer mit dem Durchmesser 10 mm und für die Befestigungsschrauben der Platine mit einem 3 mm Holzbohrer. Eine mögliche Verteilung der Bauelemente auf dem Deckel des Gehäuses entnehmen Sie Abb. 7. Auch andere Anordnungen sind möglich. Man benötigt vier schwarze und vier rote Buchsen, je eine schwarze und eine rote für die Ausgänge U+ und U-, für die Oszillographenanschlüsse Osz+ und Osz-, für die USE-Eingänge E+ und E- sowie für den +Pol und den –Pol der Stromversorgung. Man verschraubt die Buchsen und das Poti am Gehäusedeckel. Die Platine befestigt man mit den vier 3 mm Schrauben und den Muttern. Damit die Platine nicht fest an den Gehäusedeckel gepresst wird, wodurch die Lötstellen beschädigt werden könnten, legt man unter die Platine ebenfalls eine Mutter. Man benötigt daher für die Platine vier Schrauben und acht Muttern. Die Schaltlitzen für die Anschlüsse U+, U-, Osz+ und Osz-, E+ und E- sowie den +Pol und den –Pol verbindet man über Lötösen mit den entsprechenden Buchsen. Das Poti schließt man an die entsprechenden Litzen auf der Platine an und zwar an den mittleren Anschluss und den rechten oder linken Eingang des Potis. Dabei sollte man darauf achten, dass die Verstärkung bei Drehung des Potis im Uhrzeigersinn zunimmt. Ansonsten muss man den anderen des rechten bzw. linken Anschlusses benutzen. Das Potentiometer kann man noch mit einem Knopf versehen, damit es sich genauer einstellen lässt. Dazu muss man die Achse vorher auf die zum Knopf passende Länge kürzen.

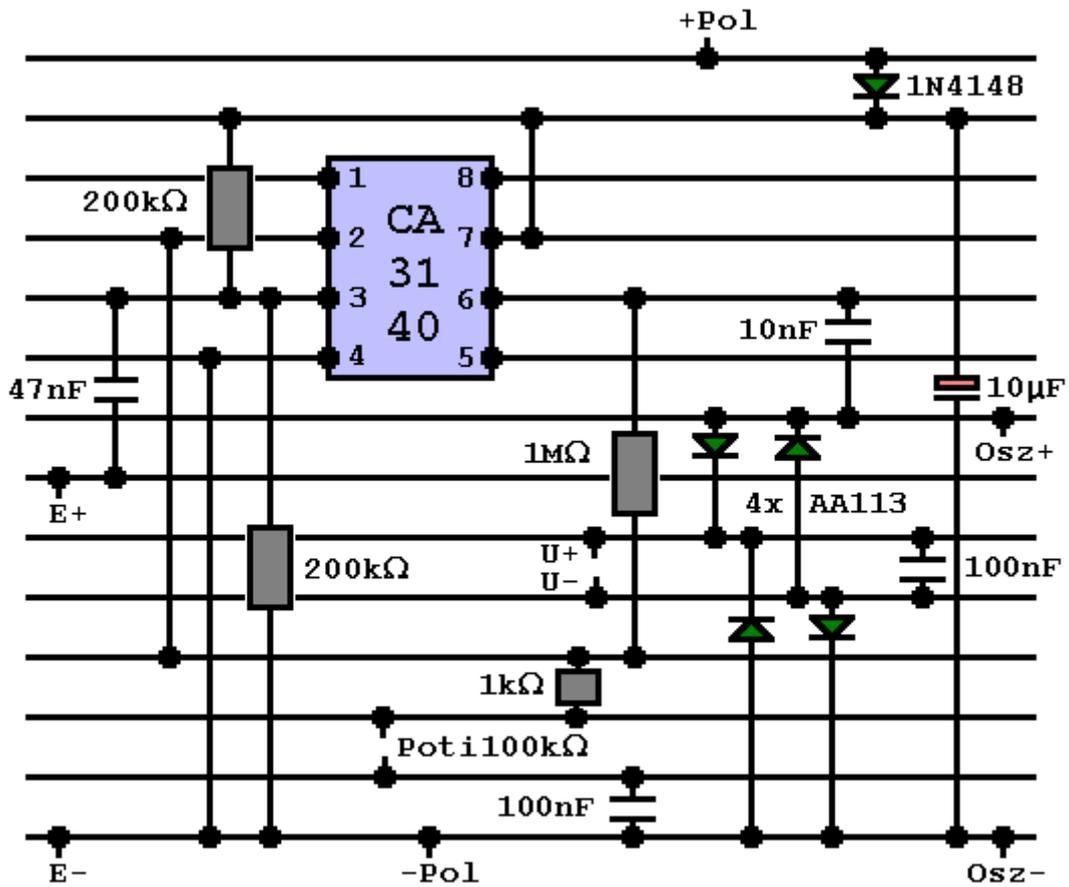


Abb.6: Verschaltung auf einer Platine



Abb.7: Empfangsschaltung

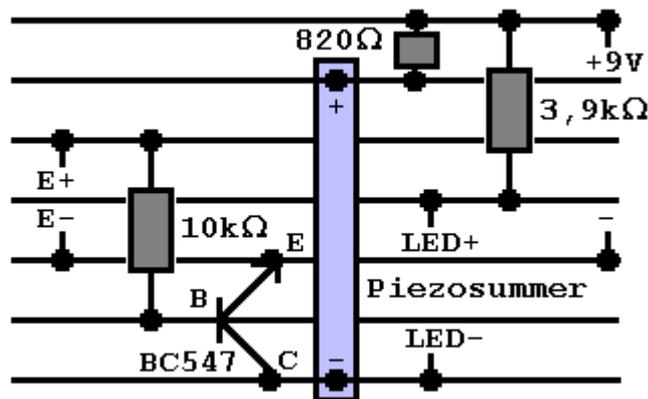


Abb.8: Verschaltung auf einer Platine

Abb. 8 zeigt die Verschaltung der Audio- und Optikeinheit auf einer Lochrasterplatine. Dabei muss man beachten, dass man den Piezosignalgeber auf die nicht beschichtete, also normalerweise verwendete Seite der Platine einsetzt, während man die restlichen Bauteile auf die mit Kupfer beschichtete Oberfläche verlötet. So kann man die Platine gleichzeitig als Halterung für den Signalgeber benutzen. Den Vorwiderstand für den Signalgeber kann man je nach gewünschter Lautstärke entsprechend anpassen. Im Prinzip kann man ihn auch ganz weglassen. Dann ist der Ton jedoch sehr laut und durchdringend. Für die Eingänge E+ und E-, den Plus- und den Minuspol der Stromversorgung und die LED-Anschlüsse lötet man in die Platine je ein Stück Schaltlitze von ca. 5 cm Länge. Einen möglichen Einbau der einzelnen Teile ins Gehäuse entnehmen Sie der Abb. 9.

Man bohrt für die Buchsen 8 mm-Löcher in den Gehäusedeckel, ebenso für die LED-Fassung. Für den Ein-Aus-Schalter benötigt man ein 6 mm-Loch. Den Durchbruch für den Signalgeber bohrt man mit einem 8 mm-Bohrer an mehreren Stellen vor und feilt ihn dann auf die passende Größe aus. In die Platine bohrt man mit einem Holzbohrer an zwei gegenüberliegenden Ecken 3 mm-Löcher. Sie dienen dazu, die Platine am Gehäusedeckel mit zwei Schrauben und vier Muttern zu befestigen, wie in Kapitel 4.3.2 bereits beschrieben. Man setzt die Buchsen, den Schalter und die LED mit Fassung in den Gehäusedeckel ein. Dann verbindet man die Buchsen E+ und E- über Lötösen mit den entsprechenden Litzen auf der Platine, ebenso die Anschlüsse der LED mit den Litzen LED+ und LED-. Dabei muss man beachten, dass der Plusanschluss der LED das lange Beinchen ist. Die rote Buchse für die Stromversorgung lötet man über ein Stück Schaltlitze an den Mittenanschluss des Schalters. Den rechten bzw. linken Ausgang des Schalters verbindet man mit der Litze, die auf der Platine mit +9 V gekennzeichnet ist. Zum Schluss verlötet man die Litze – auf der Platine mit der schwarzen Buchse der Stromversorgung.



Abb.9:
Audio- und Optikeinheit

5 Versuche

5.1 Schallgeschwindigkeit

Versuch 1:

Aufbau:

Versuch:

Aufbau und Durchführung:

Man stellt beide Relais in verschiedenen Abständen auf. Als Schallquelle dienen zwei Holzklötze, die man vor dem Startrelais gegeneinander schlägt. Aber auch ein kräftiges Händeklatschen reicht aus. Den genauen Versuchsaufbau entnehmen Sie Abb. 1. Auf zwei mögliche Fehlerquellen möchte ich hinweisen. Ist das erzeugte Signal nicht laut genug, so wird die gemessene Zeit entweder zu groß oder zu klein. Dann wird das Stoppsignal nicht mehr vom Schall des erzeugten Knalls ausgelöst, sondern durch eine Störquelle aus der Umgebung. Außerdem sollte man darauf achten, dass der Knall auf einer Linie erzeugt wird, die durch die beiden Relais gebildet wird und zwar vor dem Startrelais. Anderenfalls entspricht die Entfernung der beiden Mikrofone nicht unbedingt der Laufstrecke des Schalls vom ersten zum zweiten Mikrofon. Würde man z.B. den Knall genau zwischen den beiden Mikrofonen erzeugen, so würden beide gleichzeitig auslösen, da der Schall das Start- und Stopprelais zur gleichen Zeit erreichen würde.

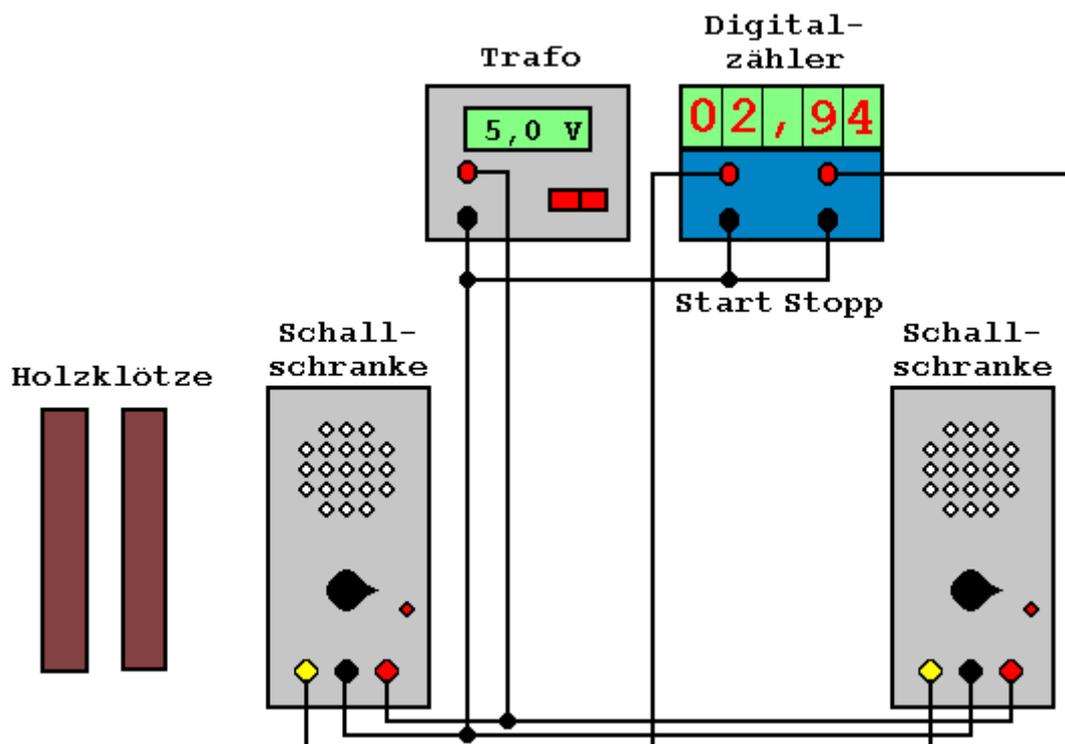


Abb.1: Versuchsaufbau

Ergebnisse:

Bei einer Versuchsreihe mit verschiedenen Abständen s erhält man als Mittelwert für die Zeit t aus jeweils fünf Messungen folgende Messtabelle:

s[m]	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
t[ms]	0,56	0,89	1,13	1,51	1,74	2,01	2,38	2,61	2,92

Tabelle 1: Messtabelle

Auswertung:

Die Tabelle wertet man am besten mit Excel aus. Dabei erhält man das Diagramm in Abb. 2. Aus der Kurve liest man ab, dass die Schallgeschwindigkeit c

$$c = 0,3404m/ms = 340,4m/s$$

beträgt, in guter Übereinstimmung mit dem Wert in der Tabelle in Kapitel 2.1.

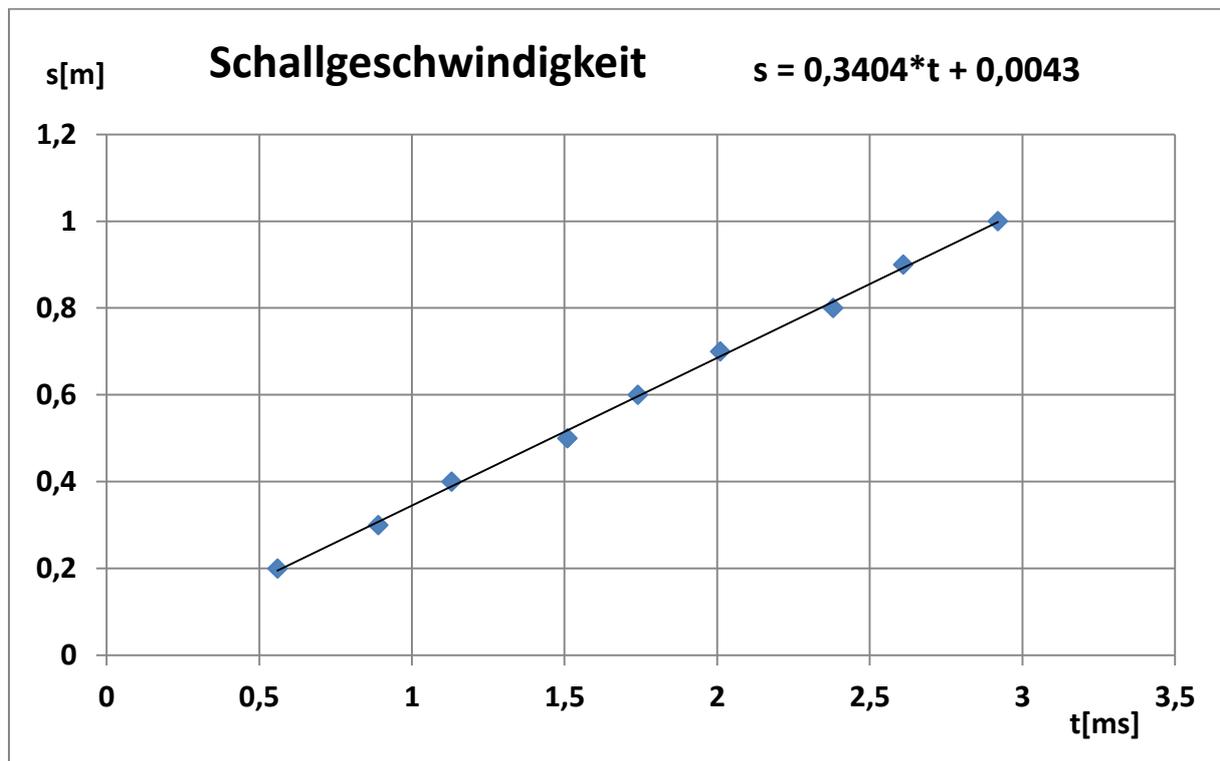


Abb.2: Messkurve

Versuch 2:

Aufbau:

Man benötigt einen Ultraschallsender und einen Ultraschallempfänger jeweils mit Betriebsgerät, zwei Klemmen, zwei Tonnenfüße, einen Oszillographen und ein Lineal. Man spannt den US-Sender und den US-Empfänger in je eine der beiden Klemmen und steckt diese anschließend in die Tonnenfüße. Man verbindet sie mit den Eingängen ihrer Betriebsgeräte und schließt den Oszillographenausgang des Senders an den 1. Kanal des Oszillographen und den des Empfängers an den 2. Kanal an. Am Oszillographen wählt man als Triggerung Kanal 1. Dann stellt man Sender und Empfänger in einem Abstand von ca. 0,5 m auf und verbindet sie über die Trafos mit dem Stromnetz.

Durchführung:

Man entfernt den Empfänger langsam vom Sender und notiert sich seine Stellung auf dem Tisch, wenn die Sinusempfangsline jeweils um eine Periodendauer auf dem Oszillographen weitergewandert ist.

Beobachtung:

Bewegt man den Empfänger vom Sender weg oder auf ihn zu, so läuft die Sinuslinie auf dem Oszillographen die Zeitachse entlang. Um sie um vier Perioden zu verschieben, muss man ihn um $s = 3,4 \text{ cm}$ vom Sender entfernen.

Auswertung:

Da der Oszillograph mit dem Sendesignal getriggert wird, startet der Kurvendurchlauf auf dem Oszillographen stets mit der gleichen Phase des Senders. Vergrößert man den Abstand zwischen Sender und Empfänger, so erreicht das Signal erst später den Empfänger und damit in einer anderen Phase. Die Sinuslinie wandert auf der Zeitachse weiter. Nach einer Strecke, die einer vollen Wellenlänge entspricht, trifft die Welle wieder mit der gleichen Phase den Empfänger wie zu Beginn. Die Linie ist auf der Zeitachse um eine Periodendauer $T = 25 \mu\text{s}$ weitergewandert. Damit erhält man für die Schallgeschwindigkeit c

$$c = \frac{0,034 \text{ m}}{4 * 25 \mu\text{s}} = 340 \text{ m/s.}$$

Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem Ergebnis aus Versuch 1 und den theoretischen Überlegungen aus Kapitel 2.1 überein. Es zeigt außerdem, dass die Schallgeschwindigkeit nicht von der Frequenz abhängt. Ultraschall, Infraschall und Hörschall haben die gleiche Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Versuch 3:**Aufbau:**

Man benötigt zwei wasserdichte Ultraschallsender, ein Betriebsgerät, einen wasserdichten Ultraschallempfänger mit Betriebsgerät, eine Audioeinheit, drei Klemmen, drei Tonnenfüße, ein Lineal und eine mit destilliertem Wasser gefüllte Plastikwanne circa der Größe $30 \times 15 \times 5 \text{ cm}^3$. Man spannt die US-Sender und den US-Empfänger in je eine der drei Klemmen und steckt diese anschließend in die Tonnenfüße. Man verbindet sie mit den Eingängen ihrer Betriebsgeräte und schließt an den Oszillographenausgang des Empfängers den Eingang der Audioeinheit an. Dann verbindet man sie über die Trafos mit dem Stromnetz.

Durchführung:

Man taucht die Sender jeweils an einer Kopfseite in die Wasserwanne etwa 2 cm tief ein und zwar so, dass sie sich gegenseitig anstrahlen. Den Empfänger stellt man ebenfalls etwa 2 cm tief im Wasserbecken in der Mitte einer Längsseite auf, so dass seine Empfangsrichtung senkrecht zur Senderichtung der Sender zeigt. Sender und Empfänger bilden so einen Winkel von ca. 20° . Man bewegt den Empfänger entlang der Längsseite des Gefäßes hin und her. Dabei muss man darauf achten, dass man ihn nicht verdreht. Man markiert sich auf dem Tisch die Stellen der Maxima und Minima. Man misst den Abstand der Minima bzw. Maxima mit dem Lineal auf dem Tisch aus.

Beobachtung:

An der Luft hört man kein Signal. Taucht man den Sender und den Empfänger ins Wasser, so zeigt die Audioeinheit Empfang an. Verschiebt man den Empfänger, so beobachtet man Stellen mit minimaler bzw. maximaler Intensität. Der Abstand von einem Minimum oder Maximum zum übernächsten beträgt im Schnitt $d = 3,7 \text{ cm}$.

Auswertung:

Ultraschallsignale werden auch in Wasser übertragen, wobei man einen speziellen Sender benötigt, der das Wasser in Schwingungen versetzt. Im Wasserbecken bauen sich stehende

Wellen auf, da die von beiden Sendern abgestrahlten Wellen phasengleich sind und aufeinander zulaufen. Aus den Messdaten erhält man für die Wellenlänge λ :

$$\lambda = d = 3,7 \text{ cm.}$$

Mit Hilfe der Frequenz des Ultraschallsenders ergibt sich damit für die Schallgeschwindigkeit:

$$c = \lambda * f = 0,037 \text{ m} * 40000 \text{ Hz} = 1480 \text{ m/s.}$$

Dieser Wert stimmt gut mit den theoretischen Überlegungen aus Kapitel 2.1 überein.

Versuch 4:

Aufbau:

Man benötigt eine Stahlstange der Länge $l = 1 \text{ m}$, z.B. eine Stativstange, einen Hammer, ein Mikrofon mit Verstärker, ein Frequenzmessgerät, eine Klemme, eine Tischklemme und eine kurze Stativstange etwa der Länge $l = 30 \text{ cm}$.

Durchführung:

Man schließt das Mikrofon an das Frequenzmessgerät an und schaltet beide ein. Man spannt die lange Stange in der Mitte fest in die Klemme ein. Man verschraubt sie an der kurzen Stativstange, die man mit der Tischklemme am Tisch befestigt. Man stellt das Mikrofon so auf, dass sein Eingang in kurzem Abstand vor einer Stirnseite der Stange steht. Man schlägt mit dem Hammer auf die andere Stirnseite der Stange.

Beobachtung:

Das Frequenzmessgerät zeigt eine Frequenz $f = 2597 \text{ Hz}$ an.

Auswertung:

In der Stange baut sich eine stehende Welle auf mit zwei Bäuchen an den Enden. Damit gilt für die Wellenlänge λ

$$\lambda = 2 * l = 2 \text{ m.}$$

Somit erhält man mit der gemessenen Frequenz f für die Schallgeschwindigkeit c in Stahl

$$c = \lambda * f = 2 \text{ m} * 2597 \text{ Hz} = 5194 \text{ m/s.}$$

Dieser Wert stimmt gut mit dem Wert aus der Tabelle in Kapitel 2.1 überein.

5.2 Reflexionsgesetz

Versuch 1:

Aufbau:

Man benötigt einen Tonfrequenzgenerator, einen Lautsprecher und ein beidseitig offenes Glasrohr der Länge $l = 0,45 \text{ m}$.

Durchführung:

Man schließt den Lautsprecher an den Tonfrequenzgenerator an. Den Generator stellt man auf eine Frequenz $f = 380 \text{ Hz}$ und eine geringe Lautstärke ein. Dann hält man vor den Lautsprecher die beidseitig offene Glasröhre.

Beobachtung:

Mit Glasröhre klingt der Ton wesentlich lauter als ohne Glasröhre.

Erklärung:

In der Glasröhre baut sich durch wiederholte Reflexion der Schallwelle an den Enden der Glasröhre eine stehende Welle auf, die den abgestrahlten Ton durch Resonanz verstärkt. Damit sie sich bilden kann, muss die Länge l der Röhre gleich der halben Wellenlänge λ sein. Somit gilt:

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2 * f}$$

Setzt man $c = 340 \text{ m/s}$ und $f = 380 \text{ Hz}$ ein, so erhält man für die erforderliche Länge

$$l = \frac{340 \text{ m/s}}{2 * 380 \text{ Hz}} = 0,447 \text{ m} = 44,7 \text{ cm.}$$

Der vom Lautsprecher abgestrahlte Ton regt die Luftsäule in der Röhre zu Resonanzschwingungen an.

Versuch 2:**Aufbau:**

s. Versuch 1

Durchführung:

Man verstellt den Tonfrequenzgenerator aus Versuch 1 etwas, etwa auf die Frequenz $f_1 = 450 \text{ Hz}$ bzw. $f_2 = 300 \text{ Hz}$.

Beobachtung:

Die verstärkende Wirkung der Glasröhre ist verschwunden.

Erklärung:

In der Glasröhre kann sich keine stehende Welle mehr ausbilden, da die Grundbedingung zwischen Wellenlänge und Länge der Röhre nicht mehr erfüllt ist.

Versuch 3:**Aufbau:**

Man benutzt die Geräte aus Versuch 1, ersetzt aber das beidseitig offene Glasrohr durch ein halb so langes, einseitig geschlossenes. Alternativ kann man die Glasröhre aus Versuch 1 mit einer Glasplatte an einer Seite verschließen. Dann muss man die Frequenz auf $f = 190 \text{ Hz}$ reduzieren.

Durchführung:

Man hält das Glasrohr vor den Lautsprecher.

Beobachtung:

Auch in diesem Falle erhöht die Glasröhre die Lautstärke des abgestrahlten Tones.

Erklärung:

In der Glasröhre kann sich ebenfalls eine stehende Welle ausbilden, wobei jetzt die Resonanzbedingung $l = \lambda/4$ lautet. Am geschlossenen Enden haben sich die Reflexionsbedingungen für die Schallwellen geändert.

Versuch 4:**Aufbau:**

s. Versuch 1

Durchführung:

Man hält nach Versuch 1 die Glasröhre nicht an den Lautsprecher, sondern in die Nähe eines Ohres.

Beobachtung:

Die Glasröhre lässt den Ton auch dieses Mal lauter erklingen.

Erklärung:

Die in das Glasrohr eindringenden Schallwellen erzeugen in der Luft der Röhre eine stehende Welle, die den Ton durch Resonanz verstärkt. Der Abstand zur Schallquelle spielt dabei keine Rolle.

Versuch 5:**Aufbau:**

Man benötigt einen Ultraschallsender mit Sendeeinheit, einen Ultraschallempfänger mit Empfangseinheit, eine Metallwand, einen größeren Winkelmesser oder ein Geodreieck aus dem Geometrieunterricht, ein Voltmeter oder einen Oszillographen. Man schließt den Sender an die Betriebseinheit an, ebenso den Empfänger. Außerdem verbindet man die Empfangseinheit mit dem Oszillographen bzw. dem Voltmeter. Man legt den Winkelmesser oder das Geodreieck mit der langen Seite an die Metallwand an.

Durchführung:

Man richtet den Sender unter einem Winkel von 30° zur Mitte des Geodreiecks auf die Metallwand. Man fährt mit dem Empfänger den anderen 90° -Bogen des Winkelmessers ab und sucht die Stelle, an der der Empfang maximal ist. Dann wiederholt man den Vorgang für 45° und 60° .

Beobachtung:

In allen drei Fällen ist der Empfang maximal, wenn gilt: Einfallswinkel gleich Reflexionswinkel.

Folgerung:

Auch für Schallwellen gilt das aus der Mittelstufenoptik bekannte Reflexionsgesetz.

5.3 Interferenz

5.3.1 Linearwellen

Versuch:**Aufbau:**

Man benötigt zwei Ultraschallsender, ein Sendebetriebsgerät mit fester oder variabler Frequenz, einen Empfänger mit Betriebsgerät, drei Tonnenfüße, drei Klemmen, einen Oszillographen, eventuell eine Audioeinheit oder ein Voltmeter, ein Lineal und diverse Kabel. Man spannt die Sender und den Empfänger in die Klemmen ein und steckt diese in die Tonnenfüße. Dann stellt man die Sender nebeneinander auf und verbindet sie mit dem Betriebsgerät. Das Sendegerät schließt man an den 1. Kanal des Oszillographen an, um ihn mit diesem Signal zu triggern. Den Empfänger platziert man ca. 50 cm vor die Sender und verbindet ihn mit dem Empfangsgerät. Daran schließt man den 2. Kanal des Oszillographen, die Audioeinheit oder das Voltmeter an.

Durchführung:

Man verschiebt den einen Sender langsam in Richtung Empfänger. Bei einem Extremum verdeckt man den einen Sender und dann den anderen. Man markiert sich auf dem Tisch die Position des verschobenen Senders für mehrere Extrema des Empfangssignals. Man misst

den Abstand Δs zwischen einem Maximum und einem Minimum bzw. zwischen zwei gleichen Extrema.

Beobachtung:

Auf dem Oszillographen beobachtet man Maxima und Minima des Empfangssignals. Verdeckt man in einem Maximum einen der beiden Sender, so beobachtet man auf dem Oszillographen jeweils das halbe Empfangssignal, wobei die Teilsignale beider Sender in Phase sind. In einem Minimum sieht man auf dem Oszillographen zwei gleich große Teilsignale, die um 180° phasenverschoben sind, obwohl das Gesamtsignal null ist. Der Abstand zwischen einem Maximum und einem Minimum beträgt ca. 4,3 mm.

Erklärung:

Beide Sender schwingen im Gleichtakt mit gleicher Phase. Verschiebt man den einen in Richtung Empfänger, so wird die Laufzeit seines Signals kürzer. Es erreicht den Empfänger in einer anderen Phase. Sind beide Signale um $\lambda/2$ oder ein ungeradzahliges Vielfaches davon phasenverschoben, was z.B. bei $\Delta s = 4,25$ mm der Fall ist, so löschen sich die Signale aus. Es tritt destruktive Interferenz auf. Unterscheiden sich die Wege der beiden Signale um eine oder mehrere Wellenlängen λ , so verstärken sie sich gegenseitig. Es tritt konstruktive Interferenz auf.

5.3.2 Kreiswellen

Versuch:

Aufbau:

Man benötigt zwei Ultraschallsender, ein Sendebetriebsgerät mit fester oder variabler Frequenz, einen Empfänger mit Betriebsgerät, drei Tonnenfüße, drei Klemmen, einen Oszillographen, eine Audioeinheit, eventuell ein Voltmeter, ein Lineal von ca. 1 m Länge und diverse Kabel. Man spannt die Sender und den Empfänger in die Klemmen ein und steckt diese in die Tonnenfüße. Dann stellt man die Sender in einem Abstand g von 5 – 10 cm nebeneinander auf und verbindet beide mit dem Betriebsgerät. Das Sendegerät schließt man an den 1. Kanal des Oszillographen an, um ihn mit diesem Signal zu triggern. Den Empfänger platziert man einer Entfernung von ca. $l = 60 - 70$ cm vorm Sender und verbindet ihn mit dem Empfangsgerät. Daran schließt man den 2. Kanal des Oszillographen, die Audioeinheit oder ein Voltmeter an.

Durchführung:

Man zieht mit einem Lineal parallel zur Verbindungslinie der beiden Sender in der Entfernung des Empfängers eine Linie auf dem Experimentiertisch oder legt das Lineal entlang der gedachten Linie auf den Tisch. Man fährt entlang des Lineals bzw. der Linie mit dem Empfänger durch das Schallfeld der beiden Sender. Man markiert die Position des Empfängers für verschiedene Maxima und Minima.

Beobachtung:

Man beobachtet Maxima und Minima. Man erhält z.B. folgende Messwerte:

Geometrische Abstände:

$$g = 7 \text{ cm}; l = 66 \text{ cm}$$

Abstände Minima vom Hauptmaximum:

$$z_1 = 4 \text{ cm}; z_2 = 12,5 \text{ cm}; z_3 = 21 \text{ cm}$$

Abstände der Nebenmaxima vom Hauptmaximum:

$$z_1 = 8,2 \text{ cm}; z_2 = 16,7 \text{ cm}; z_3 = 25,5 \text{ cm}.$$

Auswertung:

Wendet man die Formeln aus Kapitel 2.3.2 an, so erhält man für das 1. Minimum mit $k = 1$ und $\lambda = 0,85 \text{ cm}$:

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{(2k - 1) * \lambda}{2 * g}\right) = \arcsin\left(\frac{(2 * 1 - 1) * 0,85 \text{ cm}}{2 * 7 \text{ cm}}\right) = 3,48^\circ$$

und damit

$$z_1 = l * \tan\alpha_1 = 66 \text{ cm} * \tan(3,38^\circ) = 4,01 \text{ cm}.$$

Für die anderen Minima ergibt sich analog:

$$z_2 = 12,2 \text{ cm}; z_3 = 21,0 \text{ cm}.$$

Für die Maxima errechnet man mit der Formel aus Kapitel 2.3.2 in gleicher Weise z.B. für $k = 1$:

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{k * \lambda}{g}\right) = \arcsin\left(\frac{1 * 0,85 \text{ cm}}{7 \text{ cm}}\right) = 6,97^\circ$$

$$z_1 = l * \tan\alpha_1 = 66 \text{ cm} * \tan(6,97^\circ) = 8,07 \text{ cm}.$$

Für die anderen Maxima erhält man entsprechend:

$$z_2 = 16,5 \text{ cm}; z_3 = 25,8 \text{ cm}.$$

Gemessene und berechnete Werte stimmen sehr gut überein.

5.3.3 Stehende Wellen

Versuch 1:

Aufbau:

Man benötigt zwei Lautsprecher, einen Tonfrequenzgenerator, ein Mikrofon mit Verstärker und ein empfindliches Voltmeter oder einen Oszillographen. Außerdem braucht man einen Filzstift und ein Lineal. Man stellt die Lautsprecher in einem Abstand von etwa 1,5 m auf und zwar so, dass sie sich gegenseitig anstrahlen. Man verbindet sie mit dem Tonfrequenzgenerator. Das Mikrofon stellt man etwas seitlich versetzt zwischen den beiden Lautsprechern auf, so dass sich die Mikrofonkapsel im Schallfeld der beiden Lautsprecher befindet. Man schließt es an den Oszillographen bzw. das Voltmeter an.

Durchführung:

Man schaltet den Tonfrequenzgenerator, das Mikrofon und den Oszillographen ein. Man wählt am Tonfrequenzgenerator $f = 2000 \text{ Hz}$ und fährt mit dem Mikrofon den Bereich zwischen den beiden Lautsprechern ab. Man markiert auf dem Tisch die Stellen der Minima oder Maxima und misst ihren Abstand aus.

Beobachtung:

Die Amplitude der Schwingung auf dem Oszillographen zeigt in regelmäßigen Abständen Minima und Maxima. Der Abstand zweier benachbarter Minima bzw. Maxima beträgt $l = 0,085 \text{ m}$.

Erklärung:

Die von den beiden Lautsprechern abgestrahlten Schallwellen interferieren zu einer stehenden Welle. Der Abstand zweier Maxima entspricht nach der Theorie in Kapitel 2.3.3 der halben Wellenlänge der stehenden Welle. Damit gilt:

$$\lambda = 2 * l = 2 * 0,085 \text{ m} = 0,17 \text{ m}$$

und damit für die Frequenz:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340 \text{ m/s}}{0,17 \text{ m}} = 2000 \text{ Hz} = 2 \text{ kHz}$$

bzw. die Periodendauer T

$$T = \frac{1}{f} = 0,5 \text{ ms.}$$

Sie entspricht der Periodendauer, die man am Oszillographen ablesen kann und der Frequenz, die man am Tonfrequenzgenerator eingestellt hat.

Versuch 2:**Aufbau:**

Man benötigt eine Schraubenfeder mit $D = 3,3 \text{ N/m}$, einen Wellenwannenerreger, ein Stroboskop veränderlicher Frequenz, ein Stativ, eine Muffe, eine kurze Stativstange und ein etwa 10 cm langes Seilstück. Man befestigt die kurze Stativstange mit der Muffe horizontal am Stativ. An sie bindet man mit dem Seilstück das eine Ende der Schraubenfeder. Das andere spannt man in den Erreger der Wasserwellenwanne.

Durchführung:

Man schaltet den Erreger ein und variiert seine Frequenz. Die schwingende Feder beleuchtet man mit dem Stroboskop.

Beobachtung:

Bei bestimmten Frequenzen beobachtet man entlang der Feder Stellen, an denen die Windungen in Ruhe sind und Stellen, an denen sie sich heftig bewegen. Alle Stellen behalten ihre Lage im Raum bei. Bei passender Frequenz des Stroboskops kann man die Bewegungen der einzelnen Schrauben der Feder sehr gut erkennen.

Erklärung:

Der Erreger erzeugt in der Feder eine Longitudinalwelle. Sie wird am festen Ende reflektiert und interferiert mit der nach oben laufenden ursprünglichen Welle. So bildet sich eine stehende Welle aus. Das gelingt nur für Wellenlängen λ , für die gilt:

$$l = \frac{k * \lambda}{2}$$

mit l als Länge der Feder und k als ganzer Zahl.

Versuch 3:

Aufbau:

Man benötigt zwei Ultraschallsender, ein Sendegerät, einen Ultraschallempfänger mit Empfangsgerät, einen Oszillographen, drei Tonnenfüße und drei Klemmen, ein Lineal, einen Filzstift sowie diverse Kabel. Man spannt die beiden Sender und den Empfänger in die Klemmen ein und steckt diese in die Tonnenfüße. Dann stellt man die Sender in einem Abstand von ca. 1 m auf, richtet sie so aus, dass sie sich gegenseitig anstrahlen und verbindet sie mit dem Betriebsgerät. Den Empfänger platziert man etwas seitlich versetzt zwischen die beiden Sender und verbindet ihn mit dem Empfangsgerät. Das Sende- und Empfangsgerät schließt man an die beiden Kanäle des Oszillographen an und zwar so, dass das Signal des Senders das Oszilloskop triggert.

Durchführung:

Man schaltet alle Geräte ein bzw. verbindet sie mit dem Netz. Dann fährt man den Bereich zwischen den beiden Sendern mit dem Empfänger ab und notiert sich auf dem Tisch die Orte der Maxima oder Minima. Befindet sich der Empfänger in einem Extremum, so hält man abwechselnd den einen oder den anderen Sender zu.

Beobachtung:

Die Amplitude der Sinusempfangsline sinkt und steigt. Man beobachtet Maxima und Minima. Der Abstand zweier Maxima bzw. Minima beträgt durchschnittlich $l = 4,25$ mm. Hält man in einem Minimum abwechselnd einen der beiden Sender zu, so beobachtet man auf dem Oszillographen zwei um 180° phasenverschobene Signale. In einem Maximum sind die beiden Signale phasengleich.

Erklärung:

Die von den beiden Ultraschallsendern abgestrahlten Schallwellen interferieren zu einer stehenden Welle. Der Abstand zweier Maxima entspricht nach der Theorie in Kapitel 2.3.3 der halben Wellenlänge der stehenden Welle. Damit gilt:

$$\lambda = 2 * l = 2 * 4,25 \text{ mm} = 8,5 \text{ mm}$$

und damit für die Frequenz

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340 \text{ m/s}}{0,0085 \text{ m}} = 40000 \text{ Hz} = 40 \text{ kHz.}$$

Sie entspricht der Frequenz der Ultraschallsender. Dieser Versuch ist dem Versuch 1 mit Hörschall vorzuziehen, da ein Ton der Frequenz 2 kHz schon recht nervig klingt. Außerdem stören die Umgebungsgeräusche, da sie vom Mikrofon ebenfalls registriert werden. Dadurch kann man die Lage der Maxima und Minima schlechter exakt ausmessen als beim Ultraschallversuch.

5.3.4 Schwebung

Versuch 1:

Aufbau:

Man benötigt zwei Lautsprecher, zwei Tonfrequenzgeneratoren, ein Mikrofon, einen Oszillographen oder ein Computerspeicheroszilloskop (z.B. ein Picoscope) und die entsprechenden Kabel. Man stellt die beiden Lautsprecher nebeneinander auf, verbindet sie mit je einem

Tonfrequenzgenerator. Das Mikrofon platziert man etwa einen halben Meter vor den beiden Lautsprechern und verbindet es mit dem Oszillographen bzw. dem Picoscope.

Durchführung:

Man stellt die Frequenz am ersten Tonfrequenzgenerator auf

$$f_1 = 440 \text{ Hz},$$

am zweiten Lautsprecher auf

$$f_2 = 400 \text{ Hz}$$

ein. Benutzt man ein Speicheroszilloskop, so zeichnet man die Kurven nacheinander auf. Dazu schaltet man zunächst nur den ersten Tonfrequenzgenerator ein, dann nur den zweiten und zum Schluss beide gleichzeitig.

Beobachtung:

Man hört einen Ton, dessen Lautstärke an- und abschwilt, vibriert. Die Frequenz, mit der sich die Lautstärke ändert, ist umso kleiner, je mehr sich die beiden Frequenzen f_1 und f_2 nähern. Mit dem Picoscope zeichnet man etwa die Kurven in Abb.1 auf. Auf einem Oszillographen beobachtet man sie nacheinander.

Auswertung:

Aus der roten rechten und blauen linken Kurve ermittelt man die Zeit für 10 Schwingungen. Man erhält:

$$t_{rot} = 22,6 \text{ ms}$$

$$t_{blau} = 25,1 \text{ ms}$$

und damit

$$f_{rot} = \frac{10}{22,6 \text{ ms}} = 442,5 \text{ Hz}$$

$$f_{blau} = \frac{10}{25,1 \text{ ms}} = 398,4 \text{ Hz}.$$

Aus der violetten mittleren Kurve bestimmt man die Schwingfrequenz f der Schwebung. Dazu ermittelt man die Zeit für 6 Schwingungen zwischen zwei Minima. Es ergibt sich:

$$t = 14,3 \text{ ms}$$

und damit

$$f = \frac{6}{14,3 \text{ ms}} = 419,6 \text{ Hz}.$$

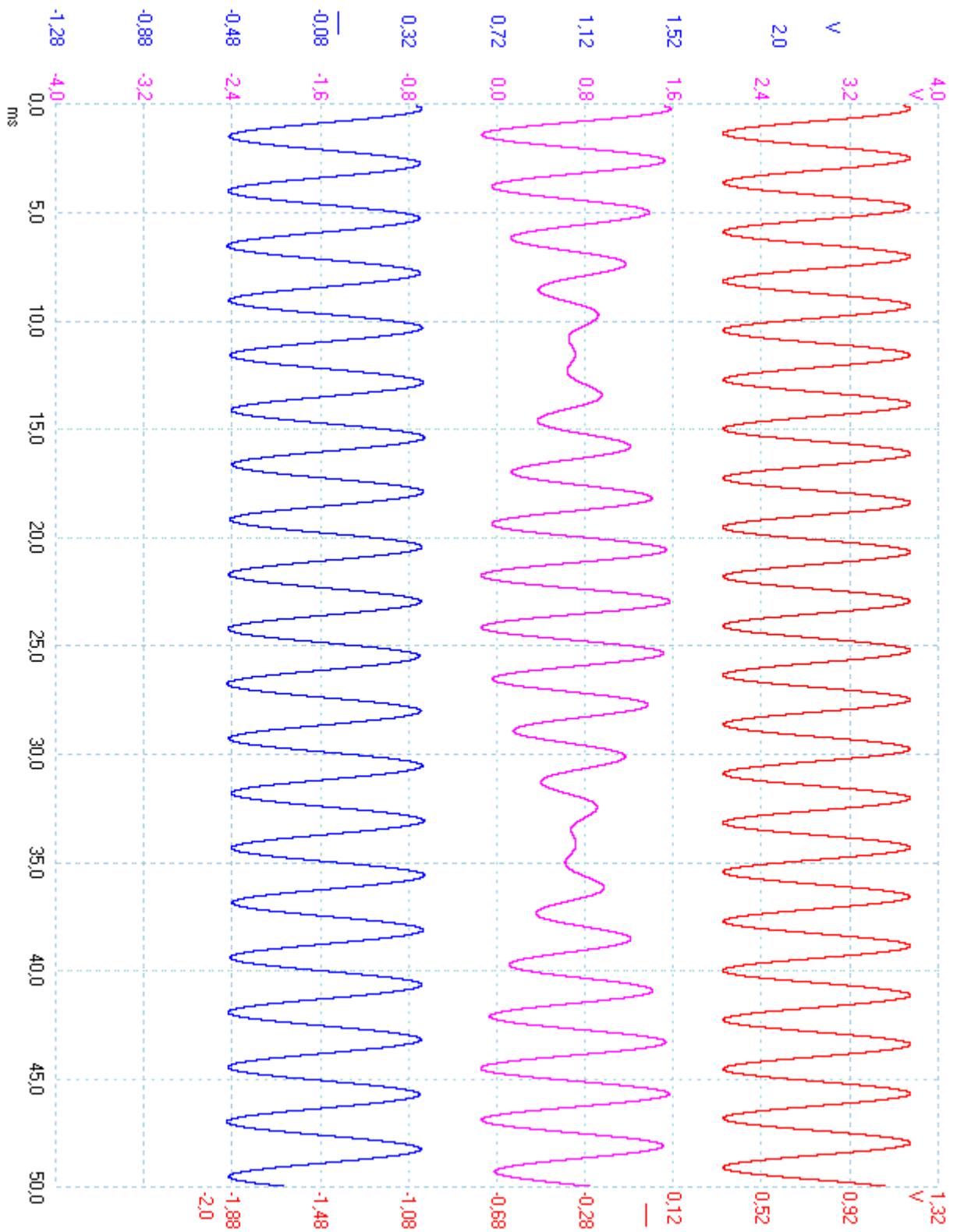


Abb.1: Schwebung

Die Zeit t_S zwischen zwei Minima beträgt bei der violetten Kurve:

$$t_S = 22,6 \text{ ms.}$$

Sie entspricht einer halben Periodendauer der Schwebungsfrequenz f_S . Es ergibt sich damit:

$$f_S = \frac{0,5}{22,6 \text{ ms}} = 22,1 \text{ Hz.}$$

Benutzt man die Formeln aus Kapitel 2.3.4, so erhält man:

$$f = \frac{(398,4 \text{ Hz} + 442,5 \text{ Hz})}{2} = 420,5 \text{ Hz}$$

und

$$f_S = \frac{(442,5 \text{ Hz} - 398,4 \text{ Hz})}{2} = 22,1 \text{ Hz.}$$

Berechnete und gemessene Werte stimmen sehr gut überein. Für die Amplituden A ergibt sich aus den Kurven:

$$A_{rot} = 0,85 \text{ V}; A_{blau} = 0,85 \text{ V}; A_{violett} = 1,7 \text{ V.}$$

Damit besitzt die Schwebung eine doppelt so hohe Amplitude wie die Ausgangsschwingungen, in Übereinstimmung mit der Theorie aus Kapitel 2.3.4.

Versuch 2:

Aufbau:

Man benötigt zwei Ultraschallsender, ein Betriebsgerät mit variabler Frequenz und eins mit fester Frequenz, einen Ultraschallempfänger mit Betriebsgerät, einen Oszillographen oder ein Picoscope, eine Audioeinheit, drei Tonnenfüße, drei Klemmen sowie diverse Kabel. Man spannt die beiden Sender und den Empfänger in die Klemmen ein und steckt diese in die Tonnenfüße. Dann stellt man die Sender nebeneinander auf und verbindet sie mit je einem Betriebsgerät. In einer Entfernung von ca. 50 cm platziert man den Empfänger vor die Sender und verbindet ihn mit dem Empfangsgerät. An das Gerät schließt man den Oszillographen, das Picoscope oder die Audioeinheit an und zwar jeweils an den Oszillographenausgang.

Durchführung:

Man stellt zunächst die Empfangsstärke beider Sender auf das gleiche Niveau ein. Dazu schaltet man das Betriebsgerät mit variabler Frequenz ein. Man liest die Empfangsstärke am Oszillographen ab. Man schaltet das Betriebsgerät mit fester Frequenz ein, das andere wieder aus. Mit Hilfe des Lautstärkereglers stellt man die gleiche Empfangsstärke am Oszillographen wie für den ersten Sender ein. Dann schaltet man beide Sender ein. Man variiert die Frequenz des variablen Senders mit Hilfe des Potentiometers.

Beobachtung:

Auf dem Oszillographen sieht man eine Kurve, die der mittleren Kurve der Abb.1 aus Versuch 1 sehr ähnlich sieht, nur bei einer 100fach höheren Frequenz. Schließt man die Audioeinheit an, so hört man einen Piepston mit ca. 3500 Hz, dessen Lautstärke zu und abnimmt. Je näher die beiden Frequenzen beieinander liegen, umso kleiner ist die Änderungsfrequenz der Lautstärke. Benutzt man das Picoscope, so kann man bei einer Zeitauflösung von $20 \mu\text{s}/\text{cm}$ die Periodendauern für die einzelnen Schwingungen und die Schwebung aus den Kurven per Mausclick direkt ablesen. Man erhält z.B. folgende Werte:

1. Schwingung:

$$T_1 = 25,01 \mu\text{s}$$

2. Schwingung:

$$T_2 = 24,18 \mu\text{s}$$

Gesamtschwingung:

$$T = 24,6 \mu\text{s}$$

Schwebung

$$T_S = 1,474 \text{ ms}$$

Auswertung:

Die beiden Ultraschallsignale, deren Frequenz leicht voneinander abweicht, ergeben nach den Überlegungen aus Kapitel 2.3.4 eine Schwebung. Mit der Schwebungsfrequenz wird der Piezopiepser der Audioeinheit moduliert. Wertet man die Periodendauern aus, so ergeben sich folgende Frequenzen:

1. Schwingung:

$$f_1 = 39984 \text{ Hz}$$

2. Schwingung:

$$f_2 = 41356 \text{ Hz}$$

Gesamtschwingung:

$$f = 40650 \text{ Hz}$$

Schwebung:

$$f_S = 678 \text{ Hz.}$$

Nach der Theorie aus Kapitel 2.3.4 gilt:

Gesamtschwingung:

$$f = \frac{f_1 + f_2}{2} = \frac{39984 \text{ Hz} + 41356 \text{ Hz}}{2} = 40670 \text{ Hz}$$

Schwebung:

$$f = \frac{f_2 - f_1}{2} = \frac{41356 \text{ Hz} - 39984 \text{ Hz}}{2} = 686 \text{ Hz.}$$

Theoretische und experimentelle Werte stimmen gut überein.

Anmerkung:

Da der Ton des Piepsers recht unangenehm ist, lassen sich Schwebungen besser mit Hörschall akustisch darstellen, wie in Versuch 1 erläutert. Allerdings stören Nebengeräusche die Aufnahme der Kurven mit dem Picoscope. Außerdem hat man nicht immer zwei Tonfrequenzgeneratoren zur Verfügung, da sie recht teuer sind. In diesem Fall ist Versuch 2 eine preiswerte Alternative.

5.4 Dopplereffekt

Versuch:

Aufbau:

Man benötigt einen Frequenzzähler, einen Ultraschallsender mit fester Frequenz, ein Betriebsgerät, einen kleinen Elektrowagen etwa der Firma Phywe, einen Ultraschallempfänger mit Betriebsgerät, ein Lineal und eine Stoppuhr, 2 Klemmen und 2 Tonnenfüße sowie diverse Kabel. Eventuell benötigt man noch zwei Lichtschranken.

Durchführung:

Man befestigt den Sender und den Empfänger an je einer Klemme und steckt sie in je einen kleinen Tonnenfuß. Den Sender stellt man auf den Elektrowagen und verbindet ihn mit zwei langen Kabeln mit der Sendeschaltung. Der Empfänger wird mit seinem Betriebsgerät verkabelt. Seinen Oszilloskopausgang schließt man an den Frequenzzähler an. Man schaltet alle Geräte ein. Zunächst ermittelt man die Frequenz f_0 des Senders bei ruhendem Wagen, in dem man den Zähler startet. Dann lässt man den Wagen mit dem Sender auf den Empfänger zu oder von ihm weg fahren, startet den Zähler und liest am Digitalzähler die Frequenz f_{zu} bzw. f_{weg} ab. Um die Geschwindigkeit des Wagens zu bestimmen, lässt man ihn eine Strecke von $l = 2 \text{ m}$ fahren und stoppt die Zeit t . Alternativ kann man die Geschwindigkeit auch mit zwei Lichtschranken und dem Digitalzähler bestimmen.

Beobachtung:

Man erhält folgende Messwerte:

1. Messbeispiel:

$$f_0 = 40018 \text{ Hz}$$

$$f_{zu} = 40072 \text{ Hz}$$

$$f_{weg} = 39964 \text{ Hz}$$

$$l = 2 \text{ m}$$

$$t = 4,2 \text{ s}$$

2. Messbeispiel:

$$f_0 = 40018 \text{ Hz}$$

$$f_{zu} = 40053 \text{ Hz}$$

$$f_{weg} = 39983 \text{ Hz}$$

$$l = 2 \text{ m}$$

$$t = 6,6 \text{ s.}$$

Auswertung:

Zunächst errechnet man die Geschwindigkeit des Wagens. Es gilt:

$$v_1 = \frac{2 \text{ m}}{4,2 \text{ s}} = 0,476 \text{ m/s}$$

$$v_2 = \frac{2 \text{ m}}{6,6 \text{ s}} = 0,303 \text{ m/s.}$$

Mit Hilfe der in Kapitel 2.4 abgeleiteten Formel bei bewegtem Sender errechnet man für diese Geschwindigkeit die Frequenzen f_{zu} und f_{weg} bei Fahrt eines Wagens auf den Empfänger zu und von ihm weg. Dabei ist $c = 340 \text{ m/s}$. Man erhält:

1. Messbeispiel:

$$f_{zu} = \frac{f}{1 - \frac{v}{c}} = \frac{40018 \text{ Hz}}{1 - \frac{0,476 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}}} = 40074 \text{ Hz}$$

und

$$f_{weg} = \frac{f}{1 + \frac{v}{c}} = \frac{40018 \text{ Hz}}{1 + \frac{0,476 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}}} = 39962 \text{ Hz.}$$

2. Messbeispiel:

$$f_{zu} = \frac{f}{1 - \frac{v}{c}} = \frac{40018 \text{ Hz}}{1 - \frac{0,303 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}}} = 40054 \text{ Hz}$$

und

$$f_{weg} = \frac{f}{1 + \frac{v}{c}} = \frac{40018 \text{ Hz}}{1 + \frac{0,303 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}}} = 39982 \text{ Hz} .$$

Gemessene und berechnete Werte stimmen im Rahmen der Messgenauigkeit sehr gut überein. Die Hauptfehlerquelle ist vor allem in der Bewegung des Wagens zu suchen ist. Das Auto fuhr zwischendurch häufig leicht ruckartig, so dass die Geschwindigkeit allenfalls näherungsweise als konstant angesehen werden kann.

6. Literaturverzeichnis

- 1) Kuchling, Taschenbuch der Physik, Thun und Frankfurt am Main, 1986
- 2) Alonso Finn, Fundamental University Physics, II Fields and Waves, Reading Massachusetts 1975
- 3) Bernhard Ehret, Demonstrations- und Praktikumsversuche zum Ultraschall mit einem Eigenbaugerät (Teil 1), Praxis der Naturwissenschaften Physik, Ausgabe 1/38, Köln 1989
- 4) Bernhard Ehret, Demonstrations- und Praktikumsversuche zum Ultraschall mit einem Eigenbaugerät (Teil 2), Praxis der Naturwissenschaften Physik, Ausgabe 2/38, Köln 1989
- 5) Ulrich E. Stempel, Ultraschallanwendungen, Herausgeber Conrad-Electronic, Hirschau 2012