
NACHWEIS VON
ULTRASCHALL-STRAHLUNGSKRAFT
INDUZIERTEN GEWEBEBEWEGUNGEN
MITTELS PHASENANALYSE EINES
MESSSTRAHLS

von

Stephan Westerhausen

Bachelorarbeit in Physik

angefertigt am

Helmholtz - Institut für Strahlen- und Kernphysik

vorgelegt der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Dezember 2011

1. Gutachter: Professor Doktor Karl Maier
2. Gutachter: Professor Doktor Reiner Vianden

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Vorbereitende Theorie	3
2.1. Ultraschall	3
2.1.1. Grundlagen des Ultraschalls	3
2.1.2. Unterscheidung zwischen Nah- und Fernfeld sowie Frei- und Dif- fusfeld	6
2.1.3. Piezoelektrische Ultraschallschwinger	6
2.2. Der Dopplereffekt	8
2.3. Hooke'sches Gesetz	9
3. Lagemessung des Schallfoki der Schwinger	11
3.1. Aufbau und Einstellung der Messanlage	11
3.1.1. Verwendete Akustikbauteile	11
3.1.2. Aufbau des Messgehäuses sowie Montage von Ultraschallemitter und Reflektor	12
3.1.3. Einrichten eines geeigneten Koordinatensystems	13
3.1.4. Aufbau und Einstellung der Elektronik des Experiments	14
3.1.5. Auskopplung über ein $\lambda/4$ -Kabel	15
3.2. Durchführung der Messungen	16
3.3. Ergebnisse der Fokussmessungen	18
3.4. Betrachtung der Messfehler und Bewertung bezüglich der gesetzten Ziele .	20
4. Kreuzung der Schallstrahlen innerhalb eines elastischen Festkörpers	23
4.1. Aufbau der Messanlage	23
4.1.1. Aufbau und Ausrichtung der Messapparatur	23
4.1.2. Aufbau der Elektronik und Justierung des Experiments	24
4.2. Durchführung der Messung	28
5. Betrachtung und Bewertung der Ergebnisse	31
A. Anhang	33
Danksagung	39

1. Einleitung

1842 sagte der Mathematiker und Physiker Christian Doppler voraus, dass eine Relativbewegung zwischen Sender und Empfänger einer Welle zu einer Änderung der gemessenen Frequenz führen würde. Drei Jahre später wurde dieser Effekt erstmals nachgewiesen und als Dopplereffekt bekannt. Er ist seitdem einer der bekanntesten Effekte der Akustik. Die Superposition von Wellen ist ein ebenso bekanntes Prinzip. Kombiniert man jedoch diese beiden Aussagen unter den richtigen Bedingungen, sollte es dennoch möglich sein, eine Schallwelle mit Hilfe einer zweiten Schallwelle (indirekt) zu beeinflussen und diesen Effekt außerhalb des direkten Interferenzbereichs der Wellen zu messen. Um diese Beeinflussung zwischen Wellen herbeizuführen, kann man sich zu nutze machen, dass Schallwellen sich ausschließlich innerhalb eines Mediums fortbewegen.

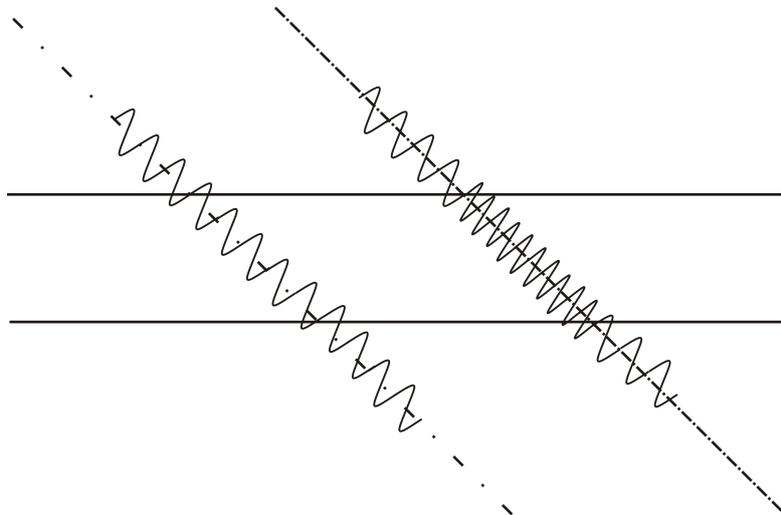


Abbildung 1.1.: Schallpuls bei Durchquerung eines ruhenden Mediums (links) bzw. eines bewegten Mediums (rechts). Nach dem Austritt aus dem Medium befindet sich die linke Welle am Anfang ihrer steigenden Flanke, die rechte ist schon über ihren Nulldurchlauf hinaus.

Wandert eine Schallwelle durch ein Medium, so interagiert sie mit diesem Medium. Eine zweite Schallwelle ändert innerhalb dieses geänderten Mediums im Allgemeinen ihre Eigenschaften.

Durchquert ein Schallpuls einen elastischen Festkörper, wird er teilweise absorbiert und der Festkörper kann durch die resultierende Schallstrahlungskraft elastisch verformt werden. Zu Beginn des Pulses entsteht dadurch innerhalb des Festkörpers eine Bewegung

in Ausbreitungsrichtung des Schalls. Diese Bewegung dauert an, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Schallstrahlungskraft und der entstehenden Rückstellkraft, die vom Elastizitätsmodul des Festkörpers abhängt, eingestellt hat. Nach Ende des Schallpulses entsteht ebenso eine Bewegung entgegen der ursprünglichen Bewegungsrichtung bis zurück zum Ausgangszustand. Kreuzt nun ein zweiter Schallstrahl die Ausbreitungsrichtung des ersten nicht rechtwinklig, ändert sich die Schallfrequenz durch den Dopplereffekt (Details hierzu folgen im Kapitel Vorbereitende Theorie). Verlässt die Schallwelle den Bereich des bewegten Mediums, entspricht die Frequenz wieder der ursprünglichen. Da allerdings eine Teilstrecke des Schallwegs bei geänderter Frequenz zurückgelegt wurde, besteht ein Gangunterschied zwischen dieser Welle und einer Welle, die die gleiche Strecke im ruhenden Medium zurückgelegt hat (siehe Abbildung 1.1). Dieser Gangunterschied entspricht einen Phasenwinkel zwischen beiden Wellen.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Dokumentation der Problemstellungen, die beim Nachweis dieses Phasenwinkels auftreten. Die Arbeit selbst ist in zwei Experimente gegliedert. Zunächst werden die Schallfelder der zur Verfügung gestellten Ultraschallschwinger vermessen. In einem zweiten Experiment werden dann die Schallstrahlen innerhalb eines Probekörpers gekreuzt.

Als Beispiel einer späteren Anwendungsmöglichkeit sei hier die zerstörungsfreie dreidimensionale Messung von Elastizitätsmodulen in PVA-Gewebephantomen genannt. Diese werden innerhalb der Arbeitsgruppe von Professor Maier genutzt, um menschliches Gewebe hinsichtlich der elastischen Eigenschaften zu imitieren. Im Anschluss kann die Methode dann auf weitere Materialien, wie zum Beispiel reales menschliches Gewebe, übertragen werden.

2. Vorbereitende Theorie

2.1. Ultraschall

Als Ultraschall bezeichnet man Schall in einem Frequenzbereich zwischen 20 kHz (obere Grenze des hörbaren Schall) und 1GHz (untere Grenze des Hyperschalls).

2.1.1. Grundlagen des Ultraschalls

Ultraschall besteht aus sich periodisch ausbreitenden Dichte-/Druckschwankungen. Man unterscheidet zwei verschiedene Arten von Schallwellen (siehe Abbildung 2.1):

Longitudinale Wellen: Hierbei finden die Schwingungen in Ausbreitungsrichtung der Schallwellen selbst statt.

Transversale Wellen: Hierbei stehen die Schwingungen senkrecht zu der Ausbreitungsrichtung der Wellen.

Schallwellen breiten sich nur innerhalb eines Mediums aus, hierbei überträgt sich die Schwingung eines Atoms/Moleküls an seine Nachbarn. Die Art der Bindung zwischen benachbarten Atomen/Molekülen beeinflusst hierbei die Geschwindigkeit der Wellenausbreitung und führt zu verschiedenen Schallgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien. Ebenso begrenzt die Wahl des Mediums die möglichen Wellenarten. Longitudinalwellen bestehen aus Dichteschwankungen und können sich so in flüssigen, festen und gasförmigen Medien fortsetzen. Transversalwellen können sich nur in Festkörpern fortsetzen, da nur dort Scherkräfte auftreten können. Da im späteren Verlauf nur mit Longitudinalwellen gearbeitet wird, wird im Weiteren nur auf diese und ihre Kenngrößen Bezug genommen.

Schallgeschwindigkeit: Die Schallgeschwindigkeit c ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle innerhalb eines Mediums. Sie ist eine Materialkonstante des jeweiligen Mediums. Sie ist in Flüssigkeiten gegeben durch das Kompressionsmodul K und die Dichte ρ des Mediums in folgender Form

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

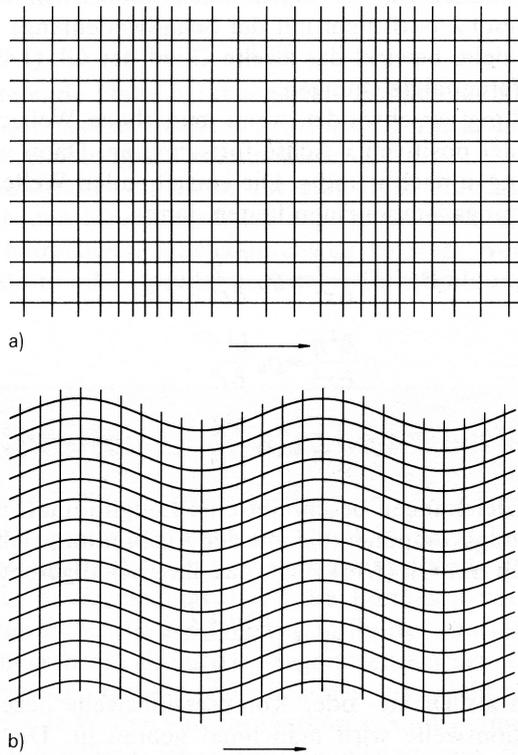


Abbildung 2.1.: **Longitudinalwellen** (oben) verformen die Struktur eines homogenen Festkörpers in Bewegungsrichtung, **Transversalwellen** (unten) verformen die Struktur senkrecht zur Bewegungsrichtung [Kut88].

Schallwechseldruck: Longitudinale Wellen entsprechen periodischen Druckschwankungen innerhalb des Mediums. Diese Druckschwankungen werden Schallwechseldruck genannt. Betrachtet man den Druck an einem festen Ort x innerhalb des Mediums, so ergibt sich die zeitliche Druckänderung $p(t)$ an diesem Ort gemäß

$$p(x, t) = p_0 \cdot e^{i \cdot \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)} ,$$

wobei ω die Kreisfrequenz der Schwingung ist und sich aus der Frequenz f des Schalls ergibt ($\omega = 2\pi f$). p_0 ist der maximale Druck am Ort x und c ist erneut die Schallgeschwindigkeit.

Schallschnelle: Die Schallschnelle u beschreibt die Geschwindigkeit, mit der sich die einzelnen Moleküle/Atome des Mediums als Reaktion auf die Druckänderung bewegen. Benennt man die maximale Geschwindigkeit u_0 , so ergibt sich ihr zeitlicher

Verlauf durch

$$u(x, t) = u_0 \cdot e^{i \cdot \omega(t - \frac{x}{c})}$$

Schallintensität: Die Schallintensität I wird durch die Schallschnelle u und Schallwechseldruck p sowie die Periode der Schwingung T zu

$$I(x, t) = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(x, t) \cdot p(x, t)$$

gegeben.

Schalleistung: Die Schalleistung P ergibt sich nun aus der Schallintensität I und beschreibt die durch eine Fläche A fließende Schallintensität.

$$P = \int_A I dA$$

Schallkennimpedanz: Die Schallkennimpedanz Z ist der Wellenwiderstand des schalldurchflossenen Mediums und kann für Flüssigkeiten aus den Effektivwerten von Schallwechseldruck p und Schallschnelle u oder alternativ aus der Schallgeschwindigkeit c und Dichte ρ des Medium berechnet werden

$$Z = \frac{\hat{p}}{\hat{u}} = \rho \cdot c \quad .$$

Schalldämpfung: Schalldämpfung beschreibt die Intensitätsabnahme innerhalb eines Mediums. Hierbei wird nicht im Einzelnen berücksichtigt, welche Anteile der Intensitätsabnahmen durch Reflexion, Absorption, oder Streuung verursacht werden. In den hier benutzten Phantomen, die menschlichem weichen Gewebe nachempfunden sind, wird die Dämpfung durch Absorption dominiert. Daher kann die Dämpfung nach einer Strecke x im Medium mit dem Absorptionskoeffizienten α durch das Absorptionsgesetz angenähert werden und die Intensität I berechnet sich zu

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-2\alpha x} \quad .$$

Schallstrahlungskraft: Durchquert eine Ultraschallwelle ein Medium, so nimmt ihre Intensität mit zurückgelegter Strecke, ab. Dieser Energieverlust resultiert in einer Kraft, die auf alle schallabschwächenden Elemente innerhalb des Mediums wirkt. Diese Kraft wird Schallstrahlungskraft genannt. Da der Schall selbst das Medium durchdringt, tritt sie innerhalb des Medium auf, es handelt sich um eine Volumenkraft. Geht man weiter davon aus, dass der Beitrag zu dieser Kraft symmetrisch um die Ausbreitungsrichtung des Schalls verteilt ist, dann wirkt die Schallstrahlungskraft in Ausbreitungsrichtung des Schalls. Die Kraft auf ein Volumenelement wird mit den schon bekannten Größen durch

$$F = \frac{2\alpha I}{c}$$

gegeben. (Siehe [Nyb65])

2.1.2. Unterscheidung zwischen Nah- und Fernfeld sowie Frei- und Diffusfeld

Bei der Charakterisierung eines Schallfeldes werden eine Reihe von Begriffen verwendet, die im Folgenden erläutert werden. Betrachten wir zunächst Nah- und Fernfeld. Ein realer Schallemitter verfügt über eine endliche Ausdehnung. Im Betrieb entstehen Schallwellen auf jedem Punkt der Oberfläche und breiten sich in alle Richtungen des Mediums aus. An jedem Punkt des Raums entsteht nun ein Interferenzbild aus den Wellen aller punktförmiger Schallquellen. Der Bereich, in dem diese Interferenzen das Schallfeld dominieren, wird Nahfeld genannt. Die genaue Gestalt dieses Nahfeldes ist von der Form des Schwingers, sowie dem verwendeten Medium abhängig. Das Fernfeld beschreibt hingegen einen Bereich in größerer Entfernung zur Schallquelle. Die Schallwellen bilden eine einheitliche Wellenfront und die Interferenzen spielen nur noch untergeordnete Rollen. Abbildung 2.2 stellt das Nahfeld, für einen kreisrunden Schwinger in einem Beispielmedium, entlang seiner Schallachse, dar. Interferenzmuster entwickeln sich entlang aller Raumrichtungen. Das beginnende Fernfeld ist ebenfalls für Abstände größer des 200-fachen der Wellenlänge zu betrachten. Für eine detailliertere Beschreibung des Nahfeld empfiehlt sich [Kut88] Kapitel II.4.

Der Begriff Freifeld (auch Direktfeld genannt) beschreibt das reine Schallfeld einer Schallquelle, ohne Interferenzen durch Echos an Oberflächen sowie andere Störungen innerhalb des Schallfeldes zu berücksichtigen. Es beschreibt also den Fall eines homogenen Mediums in einem unendlich ausgedehnten Raum. Im Gegensatz dazu entspricht das diffuse reale Schallfeld dem Schallfeld inklusive aller Reflexionen und Störungen durch einen realen Raum. Die Messung eines Schallfeldes liefert also immer nur ein Bild des Diffusionsraumes, auch wenn man durch eine entsprechende Gestaltung des Raumes (reflexionsarme Oberflächen, möglichst homogenes Medium usw.) eine starke Annäherung an das Freifeld erreichen kann.

2.1.3. Piezoelektrische Ultraschallschwinger

Die hier verwendeten Ultraschallerzeuger sind Piezokristalle. Zur Erzeugung des Ultraschalls wird die Umkehrung des Piezoelektrischen Effektes genutzt.

Piezoelektrischer Effekt

Der Piezoelektrische Effekt (kurz Piezo-Effekt) basiert auf einer Asymmetrie innerhalb der Piezokristalle. Innerhalb dieser Art von Kristallen existiert eine polare Achse, was bedeutet, dass eine 180° Drehung um eine beliebige, zur polaren Achse senkrechte Achse

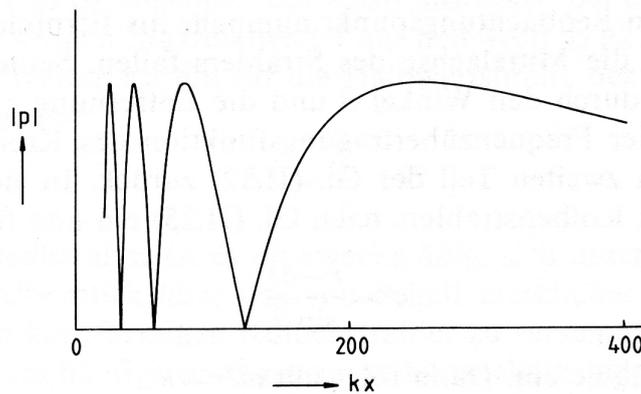


Abbildung 2.2.: **Nah-** und **Fernfeld** entlang der Schallfokusachse eines kreisrunden Schwingers: Betrag des Schalldrucks $\|p\|$, Wellenzahl k und Entfernung zum Schwinger x . In diesem Beispiel verlässt man ab einer Entfernung von etwa 200 Wellenlängen das Nahfeld [Kut88]

das Kristallgitter nicht identisch reproduziert. Eine Verformung des Gitters führt nun dazu, dass sich die Ladungsschwerpunkte innerhalb des Gitters gegeneinander verschieben und ein Dipolmoment ausbilden (siehe hierzu auch Abbildung 2.3). Hierdurch tritt an der Oberfläche eine messbare Spannung auf. Eine mechanische Verformung des Kristalls resultiert also in einer elektrischen Spannung. Beim inversen Piezoeffekt legt man von außen eine elektrische Spannung an den Kristall an (in unserem Fall ein hochfrequentes Sinus-Signal) um dadurch eine mechanische Verformung zu verursachen. Zuerst entdeckt wurde dieser Effekt bei Turmalinkristallen ([www.Piezoeffekt.de]).

Elektrische Eigenschaften von piezoelektrischen Schwinger

Durch die Tatsache, dass der Piezoeffekt in beide Richtungen (elektrisch zu mechanisch, und entgegengesetzt) funktioniert, können die entsprechenden Eigenschaften eines piezoelektrischen Schwinger (Piezos) nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. Ein mechanisch schwingender Piezo verfügt natürlich über durch die Bauform, Abmessung und das Material vorgegebene Resonanzen. Betrachtet man nun die elektrisch messbaren Auswirkungen dieser Resonanzen, so erkennt man, dass sich der Piezo wie ein elektrischer Serienschwingkreis verhält. Betrachtet man hingegen die elektrischen Eigenschaften eines realen Piezos, so kann sein elektrisches Verhalten durch einen Parallelschwingkreis beschrieben werden. Eine realistische Beschreibung des gesamten Piezos ergibt sich nun, wie in Abbildung 2.4 zu sehen ist, durch die Kombination dieser beiden Schwingkreise, wobei eine elektrisches Ersatzschaltbild den mechanischen Teil der Systems ersetzt. Der Widerstand R fasst darin sowohl elektrische Verluste als auch Verluste der mechanischen Schwingung zusammen. Liegt der Resonanzbereich eines Piezo-Schwingers in den Grenzen der Ultraschallfrequenzen, können die Kristalle zur Ultraschallerzeugung

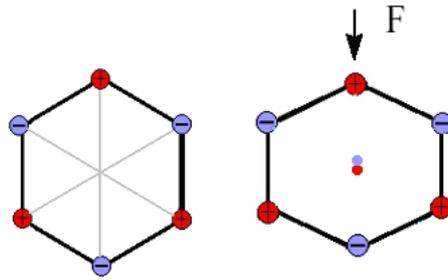


Abbildung 2.3.: **Piezoeffekt:** Die mechanische Verformung der Kristallstruktur führt zur Ausbildung eines Dipolmoments. Durch die Verformung der Kristallstruktur (links) sind die Ladungsschwerpunkte für positive und negative Ladungen räumlich getrennt ([www.Piezoeffekt.de])

genutzt werden. Da Piezoschwinger die beiden Schwingungsarten (elektrisch \Leftrightarrow mechanisch) ineinander umsetzen können, spricht man bei ihnen von Ultraschallwandlern (kurz US-Wandler oder nur Wandler).

2.2. Der Dopplereffekt

Der Dopplereffekt beschreibt die Frequenzänderung einer Welle durch eine Relativbewegung zwischen Sender und Empfänger. In beiden Fällen ändert sich die Wellenfrequenz f abhängig von der Geschwindigkeit v_0 mit der sich Sender bzw. Empfänger bewegen. Da sich der Schall in einem Medium ausbreitet, ist diese Frequenzveränderung bei einem sich bewegenden Sender oder Empfänger nicht identisch. Bewegt sich der Empfänger mit einer Geschwindigkeit von v_0 , so wird die empfangene Frequenz f_1 durch:

$$f_1 = f_0 \cdot \left(1 + \frac{v_0}{c}\right)$$

gegeben. Mit der Schallgeschwindigkeit c im Medium. Bewegt sich hingegen der Sender mit v_0 so ergibt sich f_2 mit:

$$f_2 = \frac{f_0}{1 - \frac{v_0}{c}} \quad .$$

Hierbei entsprechen positive Geschwindigkeiten jeweils einer Bewegung von Sender und Empfänger aufeinander zu. Findet die Bewegung nicht in Wellenausbreitungsrichtung statt, sondern steht zu dieser im Winkel ϑ , so wird nur die Geschwindigkeitskomponente in Wellenrichtung $v_0 \cdot \cos(\vartheta)$ betrachtet. Bewegt sich das Medium mit der Geschwindigkeit \vec{v} und sowohl Sender als auch Empfänger befinden sich in Ruhe, so betrachtet man zunächst nur Medium und Sender. Dieser Fall entspricht dann einem ruhenden Medium und einem Sender, der sich mit $-\vec{v}$ bewegt. Wie oben beschrieben ergibt sich daraus eine Änderung der Schallfrequenz von f_0 zu f_1 . Im Anschluss betrachtet man nun Medium und Empfänger. Wenn wir das Medium als ruhend betrachten, bewegt sich auch hier

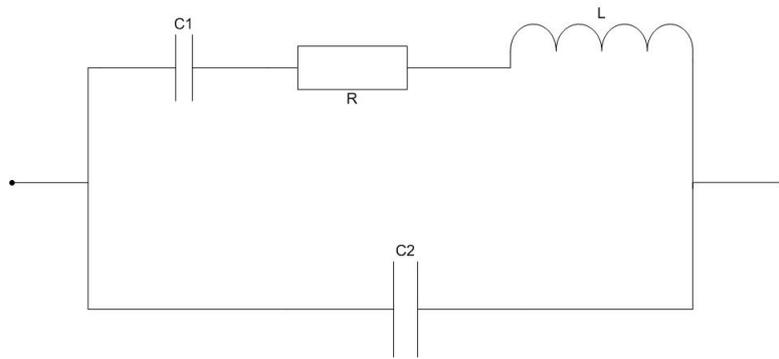


Abbildung 2.4.: **Ersatzschaltbild eines Piezoschwingers:** Parallelschwingkreis aus einer Spule L und einem Kondensator C_1 als Ersatzschaltbild für elektrische Eigenschaften und Serienschwingkreis aus der selben Spule L und einem weiteren Kondensator C_2 ist das Ersatzschaltbild für das mechanische Verhalten. Leitungsverluste und mechanische Reibung aus R .

der Empfänger mit \vec{v} . Dies führt zu einer erneuten Änderung der Frequenz von f_1 zu f_2 . Setzt man nun beide Fälle ineinander ein, so ergibt sich sofort $f_2 = f_0$.

2.3. Hooke'sches Gesetz

Hookes Gesetz beschreibt die Verformung eines Körpers unter einer einwirkenden Kraft, jedoch nur, wenn diese Verformung linear und reversibel ist. In diesem Fall wird die Spannung σ , die nötig ist, um eine relative Dehnung $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ zu verursachen, durch den Elastizitätsmodul (kurz E-Modul) E gegeben

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad .$$

Hierbei ist l_0 die Länge des Körpers ohne Verformung und Δl die Längenänderung. Das Elastizitätsmodul ist eine Materialkonstante. Drückt man die Spannung σ durch die verformende Kraft F und die Querschnittsfläche A des Körpers aus, erhält man in gängiger Darstellung

$$F = \frac{E \cdot A}{l_0} \cdot \Delta l \quad .$$

3. Lagemessung des Schallfoki der Schwinger

Für die spätere Verwendung der Wandler innerhalb des Hauptexperiments mussten zunächst einige ihrer Eigenschaften vermessen werden. Da die späteren Messungen einen gerichteten Schallstrahl benötigten, musste bekannt sein, ab welchem Abstand vom Schwinger man sich sicher im Fernfeld befindet. Für das spätere Kreuzen der Schallstrahlen war es nötig die Schallachsen zu ermitteln. Ist die Schallfeldbreite bekannt, ergibt sich ein Anhaltspunkt für das betrachtete Volumen und für die nötige Genauigkeit des Hauptexperiments. Es wurde ein Messaufbau konstruiert und die Schwinger vermessen.

3.1. Aufbau und Einstellung der Messanlage

3.1.1. Verwendete Akustikbauteile

Die verwendeten Akustikbauteile sind innerhalb des Instituts als Eigenbau entstanden und können daher nicht durch einfache Typ-Angaben charakterisiert werden. Das in den Versuchen verwendete Hydrophon ist ein Eigenbau. Sein Kernstück besteht aus einer dünnen Piezo-Keramik von etwa 1 mm^2 Fläche, an die entsprechende Kontaktierungen für Messanschlüsse und eine Außenhalterung angebracht wurden, diese Halterung ermöglicht es, das Hydrophon im Aufbau zu montieren. Da das Hydrophon bis auf das wasserdichte Gehäuse schon fertig gebaut war, sind genauere Angaben zum Innenleben leider nicht möglich. Über die Signalaufnahmefähigkeit bei verschiedenen ankommenden Frequenzen liegen keine Daten vor. Bei Absorptionsmessungen konnten mit dem Hydrophon allerdings nicht nur die angeregten 2,531 MHz, sondern auch die ersten acht Oberwellen nachgewiesen werden. In dieser Größenordnung liegt also mindestens die Empfindlichkeit. Wie stark die Empfindlichkeit innerhalb dieses Bereichs frequenzabhängig ist, ist nicht bekannt. Da bei allen späteren Messungen nur die Grundwelle mit 2,531 MHz betrachtet werden soll, stellen die fehlenden Daten kein wirkliches Problem dar.

Der Schallsumpf, ein selbstgebauter Ultraschall-Absorber, wurde aus zerschnittenen O-Ringen und anderem Vollgummi-Rundmaterial mit einem Durchmesser zwischen 1 und 5 mm angefertigt. Hierzu wurde das Material in etwa 5 cm lange Stücke zerschnitten, dabei sollten die Schnittflächen schräg sein (mindestens 5 mm der Länge der Schnittstücke). Diese Stücke werden nun neben und aufeinander geklebt, bis daraus ein Block der gewünschten Größe entstanden ist, dabei sollte die Schräge der Schnittflächen und die Dicke der benachbarten Stücke möglichst unregelmäßig sein. Abschließend wurden die

hinteren 2 cm des Absorberblocks in Latexmilch eingegossen und ausgehärtet. Die Wandler, die in den späteren Versuchen als Schallquellen genutzt wurden, waren ebenfalls schon vorhandene Eigenbauten innerhalb der Arbeitsgruppe. Vorversuche mit dem schon beschriebenen Hydrophon zeigten die stärkste Amplitude vom Hydrophon bei einer Anregungsfrequenz am Wandler von 2,531 MHz. Hier liegt also zumindest das Optimum zwischen Hydrophon- und Wandlercharakteristik, was für die späteren Versuche als Information ausreicht, da ja nur mit diesen Bauteilen bei dieser Frequenz gemessen wurde. Alle Messungen waren später entweder Relativmessungen oder unabhängig von der genauen Signalstärke. Durch auf die Schwinger geklebte Fokussierungslinsen aus Plexiglass wurde die Fokuslänge der Schwinger grob auf 25 cm eingestellt. In wasserfesten Gehäusen montiert, hatten die Wandler nur an der Seite, an der die Linse aufgeklebt war, Wasserkontakt. Da Luft ein schlechter Schalleiter ist, wurde so gesichert, dass der Überwiegende Teil der abgestrahlten Schalleistung über die Linse geschieht und für die Versuche zur Verfügung stand.

3.1.2. Aufbau des Messgehäuses sowie Montage von Ultraschallemitter und Reflektor

Die Wandler wurden in wasserdichten Aluminiumgehäusen montiert und ein Plexiglasrohr wurde mit einer Plexiglasplatte einseitig verschlossen. In dieser Platte befand sich mittig eine runde Öffnung von 50 mm Durchmesser. Darin konnten das Schwingergehäuse wasserdicht montiert werden, so dass die Abstrahlfläche des Schwingers parallel zur Bodenplatte lag. Nun wurde das (300mm hohe) Rohr vollständig mit Wasser gefüllt. Das Wasser wurde entgast, da sich während der Messungen sonst immer wieder Gasblasen im Aufbau bilden würden und diese eine erhebliche Störung der Messreihe bewirkt hätten. Das Rohr stand mit vier quadratisch angebrachten Stiffüssen auf einer 1 cm dicken Aluminium-Bodenplatte, in die vier Vertiefungen eingefräßt waren. Die Stiffüße konnten passgenau in diese Vertiefungen gesteckt werden und den Aufbau so seitlich fixieren. Diese Bodenplatte selbst wurde mit Hilfe von Klammern fest auf dem Maschinentisch einer Fräse montiert, die über eine Koordinatenanzeige für die Position ihrer Fräskopfhaltung verfügte. Anstelle des Fräskopfes wurden später verschiedene Ultraschallreflektoren montiert. Mit Hilfe eines äußeren Anschlags wurde gesichert, dass die Platte, und damit der gesamte Aufbau, entlang der Bewegungsachsen des Fräskopfes ausgerichtet waren.

Bei den Reflektoren handelte es sich um \varnothing 9,5 mm Messingrundstangen verschiedener Längen. Um als Reflektor geeignet zu sein, war jeweils ein Ende jeder Stange konisch auf einen Durchmesser von etwa 1,3 bis 1,7 mm verjüngt worden. Diese Spitze wurde sehr glatt poliert um ein möglichst unverzerrtes, starkes Schallecho zu erhalten, wenn der Reflektor später senkrecht in den Wassertank ragte. Der Konus selbst hatte einen Winkel von etwa 60° und sorgte dafür, dass die Anteile des Schallstrahls, die nicht die Spitze trafen, seitlich aus der Schallachse ausgelenkt wurden und die Messung nicht weiter beeinflussten. Anzahl und Länge der Reflektoren hingen davon ab, in welchem Umfang der vertikale Fokusbereich des jeweiligen Schwingers vermessen werden sollte. Zudem hingen sie vom noch freien Hub der Fräse ab, nachdem der Aufbau montiert war, da diese Faktoren den jeweiligen Messbereich jedes Reflektors begrenzten. Innerhalb der Messun-

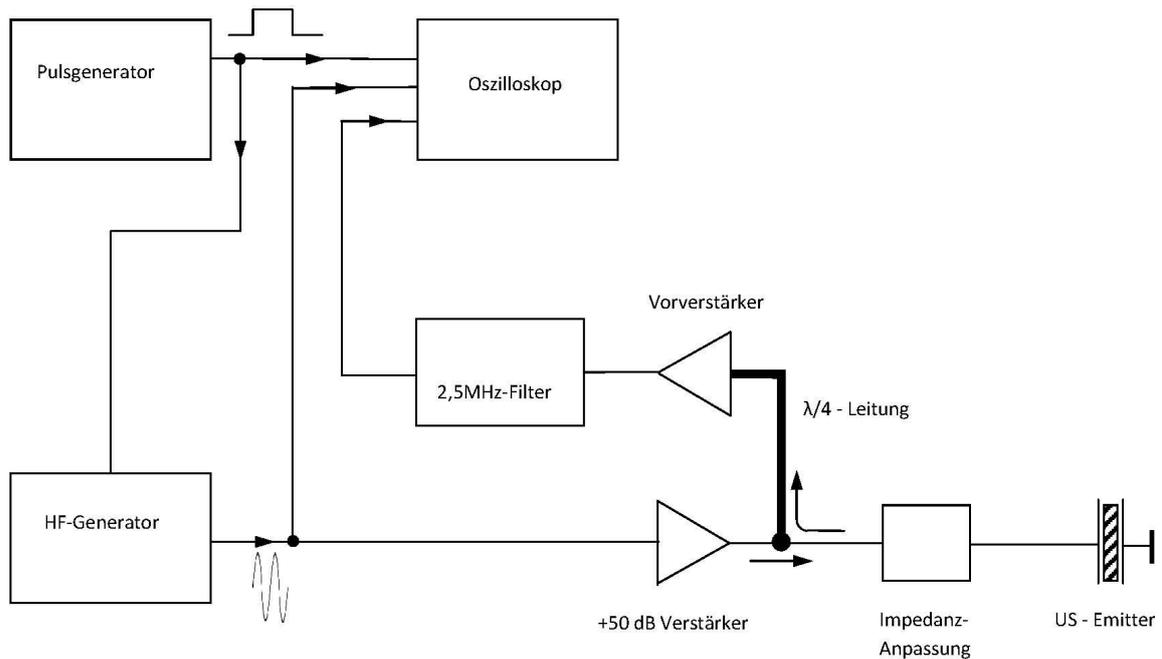


Abbildung 3.1.: Schaltbild zur Vermessung der Schallfoki der Piezoschwinger

gen wurden die Schallintensitäten innerhalb horizontaler Messebenen verglichen, nicht allerdings zwischen den einzelnen Messebenen. Daher war es weder nötig, verschiedene Reflektoren mit genau gleichem Durchmesser der Reflexionsfläche zu verwenden, noch bestand überhaupt die Notwendigkeit, die genaue Größe der Reflexionsfläche zu kennen. Der Wandler diente in diesem Aufbau sowohl als Schallquelle, als auch als Empfänger. Da die verwendeten Wandler einen sehr engen Resonanzbereich besitzen, ist im späteren Messbetrieb nicht der Anteil der Oberwellen innerhalb des Schallechos aufgenommen worden. Nun konnte das Koordinatensystem von Fräse und Messaufbau abgeglichen und die Messelektronik angeschlossen werden. Der Schaltplan zum Messaufbau ist auf Abbildung 3.1 abgebildet.

3.1.3. Einrichten eines geeigneten Koordinatensystems

Um die Position des Reflektors innerhalb des Schallfelds eindeutig zu bestimmen, wurde das Koordinatensystem der Fräse auf einen Referenzpunkt im Messaufbau eingestellt. Die vier Vertiefungen in der Aluminium-Bodenplatte des Aufbaus, die später die Stiftfüße des Plexiglasrohrs aufnahmen, lagen auf einem Kreis um den Mittelpunkt des Rohrbo-dens, der ebenfalls der Mittelpunkt des Wandlers war. Der Radius dieses Kreises war 85 mm und die Positionen der Löcher ergaben sich daraus relativ zu diesem Zentrum ($\pm 60,1$ mm / $\pm 60,1$ mm). Die genauen Vorzeichen dieser Koordinaten waren von der verwendeten Fräse und der Ausrichtung der Aluminium-Platte bei ihrer Montage abhängig und mussten jeweils während jedes Aufbaus passend bestimmt werden. Die Löcher selbst

hatten einen Durchmesser von 8 mm. Indem man nun eines dieser Löcher mit einem in der Fräse eingespannten Stahldorn anfuhr, konnte man die horizontalen Koordinatensysteme von Fräse und Aufbau in Deckung bringen. Die Höhe des Reflektors über dem Schwinger wurde später über die vermessene Zeitdifferenz zwischen Schallpuls und Echo genau ermittelt. Die vertikale Achse musste also nicht kalibriert werden.

3.1.4. Aufbau und Einstellung der Elektronik des Experiments

Zunächst wurde ein Pulser (Typ PM5715 der Firma Philips) mit einem Hochfrequenz-Sinusgenerator verbunden. Der Pulser lieferte 5 Volt Rechteckpulse einstellbarer Länge und Wiederholzeit. Da dieses Rechtecksignal später als Steuersignal für die Ultraschallpulse diente, wurde der zeitliche Abstand zwischen 2 Pulsen auf etwa 1,5 Sekunden eingestellt. Auf diese Weise war sicher, dass nach einem Schallpuls genügend Zeit vergeht, sodass sämtliche Schallechos innerhalb des Aufbaus abgeklungen waren und folgende Messungen nicht beeinflusst wurden. Die Dauer der Pulse hingegen konnte nicht generell voreingestellt werden, da eine gewisse Pulsdauer nötig war, damit alle später verbauten Verstärker ihre volle Leistung bei jedem Puls erreichten. Auch der Wandler selbst benötigte sowohl als Sender als auch als Empfänger eine gewisse Zeit, um zu der vollen Amplitude auf zu schwingen. Je nach Abstand zwischen Reflektor und der Wasseroberfläche hatten sich allerdings, bei zu langen Pulsen, die Echos von Reflektor und Wasseroberfläche überlagert und die Messung verfälscht. Daher wurde die Pulsdauer im Laufe der Messreihen an die Gegebenheiten angepasst. Das Signal des Pulsers wurde an einen Oszillographen weitergeleitet. Der Trigger des Oszillographen wurde auf die steigende Flanke des Pulssignals bei einer Triggerschwelle von etwa 3 Volt eingestellt. Der Hochfrequenzgenerator wurde im Pulsmodus mit externem Steuersignal betrieben, als Steuersignal wurde das Pulser-Signal verwendet. Die Ausgabefrequenz des Generators wurde auf eine für den Wandler günstige Anregungsfrequenz eingestellt (2,531 MHz für die hier verwendeten Wandler). Das Hochfrequenz-Signal wurde an den Oszillographen, zur Kontrolle, und an einen 50dB-Verstärker (Typ 150C der Firma Kalmus) angeschlossen. Das Signal wurde nach dem Verstärker an den Wandler weitergegeben und über ein $\lambda/4$ -Kabel (Details siehe 3.1.5) wurde das eigentliche Messsignal, also das vom Wandler kommende Signal des Schallechos, ausgekoppelt. Das Messsignal nach dem $\lambda/4$ -Kabel wurde über einen Vorverstärker und einen 2,5 MHz-Tiefpass als Filter in den Oszillographen eingespeist. Das Anregungssignal nach dem 50dB-Verstärker konnte über 125 V Peak-Peak erreichen, der Verstärker verfügte über eine maximale Leistung von 50 Watt, und durfte daher nicht in den Oszillographen geleitet werden. Unmittelbar vor den Wandler wurde noch eine Impedanzanpassung geschaltet. Diese war nötig, da der elektrische Widerstand der Wandler bei 2,531 MHz eine Größe von etwa 200 m Ω und der Verstärker einen Ausgangswiderstand von 50 Ω hatte. So würde der überwiegende Teil des Hochfrequenz-Signals vom Wandler reflektiert, statt aufgenommen zu werden. Die Impedanzanpassung glich diesen Unterschied aus. Sie bestand aus einem elektrischen Schwingkreis, dessen Schaltbild in Abbildung 3.2 dargestellt ist. Ein weiterer an der Anpassung angebrachter Eingang (im Schaltbild über dem Widerstand R_3 zu sehen) diente zur Vorspannung des Wandlers über eine positive Gleichspannung. Dies schützte

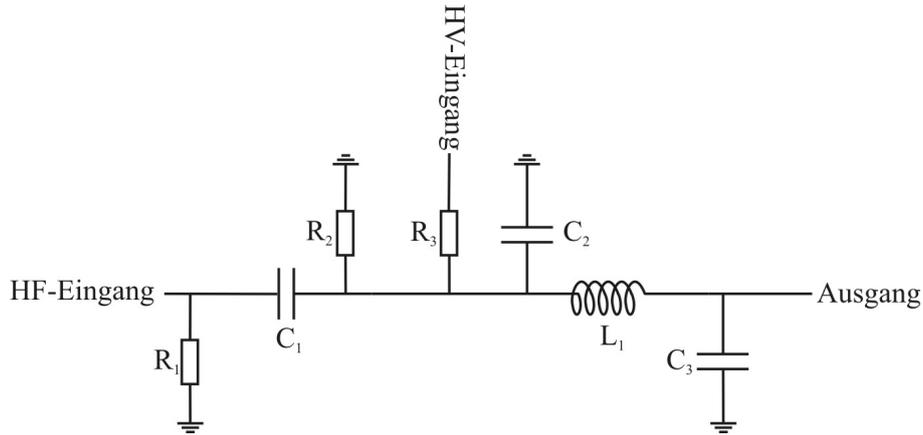


Abbildung 3.2.: **Schaltbild der Impedanzanpassung:** Das Hochfrequenzsignal wird über C_1 eingekoppelt (Schaltbild entnommen aus [Radicke], Kenndaten der verwendeten Bauteile Siehe Anhang A.1).

den Schwinger bei sehr hoher negativer Anregungsspannung vor Schäden. Das anregende HF-Signal schwingt also um den Pegel der Positiven Gleichspannung, die entsprechend hoch gewählt wird, so dass die resultierende Spannung am Wandler zu keiner Zeit negativ wird. Bei den hier verwendeten Spannungen war dies allerdings nicht nötig. Zur Sicherheit sollte dennoch immer vor Zuschalten des 50dB-Verstärkers die Ausgangsleistung des Hochfrequenzgenerators niedrig eingestellt werden (-30dB oder darunter auf der Anzeige der Generators). Der Verstärker selbst darf nicht ohne Last arbeiten.

3.1.5. Auskopplung über ein $\lambda/4$ -Kabel

In dem beschriebenen Aufbau war der jeweilige Wandler sowohl als Sender als auch als Empfänger eingesetzt. Hieraus ergab sich ein Problem: Auf einem Kabel wurde sowohl das sehr starke Anregungssignal aus dem 50dB-Verstärker als auch das wesentlich schwächere rücklaufende Messsignal, hervorgerufen durch das Echo des Messingreflektors, übertragen. Das Anregungssignal war nun im Messbetrieb stark genug um den Oszillographen zu beschädigen. Es wurde also nötig, die beiden Signale zu trennen bzw. das Anregungssignal vor dem Oszillographen stark abzuschwächen, ohne das Messsignal zu schwächen. Elektrische Schaltelemente zur Begrenzung der Signalstärke zeigten im Einsatz das Problem, dass ihre Bauteile meist elektrisch nachschwingen, dies war noch eine Weile nach Ende des Anregungssignals messbar und überlagerte sich mit dem Echosignal. Teilweise überstieg die Signalstärke dieses elektrischen Echos das eigentliche Messsignal um ein Vielfaches. Daher müssten nach solchen Schaltungen diese Störsignale wieder entfernt werden, indem man einen entsprechenden Bandpass einsetzt (die Frequenzen dieser Störungen liegen im Kilohertz-Bereich und sind somit gut vom Messsignal zu trennen). Insgesamt nimmt dadurch die Menge der Bearbeitungsvorgänge auf dem Messsignal vor der Darstellung weiter zu und Signalverzerrungen aller Art durch diese Bauteile könnten problematisch werden. Daher wurde hier ein anderes Verfahren

zur Signaltrennung gewählt, welches die direkte Betrachtung des Signals ermöglichte. Die Schwinger wurden im Versuch bei ihrer Resonanzfrequenz von 2,531 MHz angeregt. Legte man für die Signalgeschwindigkeit in den verwendeten BNC-Kabeln einen Wert von $2 \cdot 10^8$ m/s zu Grunde, so ergab sich hieraus eine Signalwellenlänge λ von etwas mehr als 80 m, bzw. eine Periode von ca. 400 ns. Indem nun das Anschlusskabel zwischen 50 dB-Verstärker und Vorverstärker auf ein Viertel dieser Wellenlänge bemessen wurde und an beiden Enden dieses Kabels jeweils ein aus 2 gegenläufige Dioden bestehendes Bauteil angebracht wurde, nahm der Vorverstärker nun das Signal des 50dB-Verstärkers nur noch sehr stark abgeschwächt wahr (bei optimaler Anpassung der Kabellänge gar nicht). Der Schaltplan für das Kabel ist in Abbildung 3.3 zu sehen. Als Dioden wurden Schottky-Dioden verwendet. Traf nun das Signal der Verstärkers auf das erste seriell geschaltete Diodenpaar, überstieg dessen Signalstärke die Durchschlagsspannung dieser Dioden und passierte diese unbeeinflusst. Erreicht dieses Signal nun nach dem $\lambda/4$ -Kabel den Vorverstärker, lag es dort ebenfalls über der Durchschlagsspannung der dortigen Dioden. Hinter den Dioden war das Kabel kurzgeschlossen und reflektierte damit das einkommende Signal. Die reflektierte Welle erreichte also den 50 dB-Verstärker nach $\lambda/2$ und trat dort mit sich selbst in destruktive Interferenz. Der 50 dB-Verstärker nahm also sein eigenes Echo vom Vorverstärker nicht wahr. Das Signal des akustischen Echos von der Impedanzanpassung nahm die Schottky Diodenschaltungen beide jeweils als reine Kapazitäten wahr, da seine Stärke unter der Durchschlagsspannung lag. Damit war sowohl der Kurzschluß als auch der 50 dB-Verstärker durch hohe Wechselstromwiderstände, $\frac{1}{2\pi f \cdot C}$ für die Frequenz f von 2,531 MHz und die gemeinsame Kapazität C der Schottky-Dioden, deren Kapazität im Bereich einiger pF lag, getrennt. So wurde dieses Signal nur im Vorverstärker wahrgenommen. Da der Ausgang des 50 dB-Verstärkers bereits mit einer solchen Schaltung versehen war, musste nur noch der Vorverstärker entsprechend beschaltet werden.

3.2. Durchführung der Messungen

Zur Vermessung des Schallfokus wurde in einer Reihe von Ebenen senkrecht zur optischen Achse des Wandlers jeweils die Lage der maximalen Signalamplitude, sowie der Bereich über dem die Signalamplitude um 50% ihre Maximalstärke abfällt, ermittelt. Das Spannungssignal des Wandlers (als Empfänger) war proportional zur Schallintensität am Wandler und konnte als Messgröße für das Schallfeld genutzt werden. Die Größe des Bereichs, in dem die Signalstärke über 50% ihres Maximums war, konnte als Maß für die Fokussierung des Schallfeldes betrachtet werden und wurde im Weiteren als Schallfeldbreite bezeichnet. Unter der Annahme, dass das Schallfeld symmetrisch zu seiner Ausbreitungsachse war, konnte dieser Bereich durch Messungen entlang zweier Achsen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung bestimmt werden (da die Messachse nicht zwingend mit der Ausbreitungsrichtung übereinstimmte, war eine einzelne Messachse nicht ausreichend). Aus der Veränderung der Schallfeldbreite entlang der vertikalen Achse wurde dann die Lage des Schallfokuspunktes in 3 Dimensionen ermittelt. Ebenso konnte anhand der Verbindungslinie der Ebenenmaxima erkannt werden, ob die akustische Achse des Schwingers

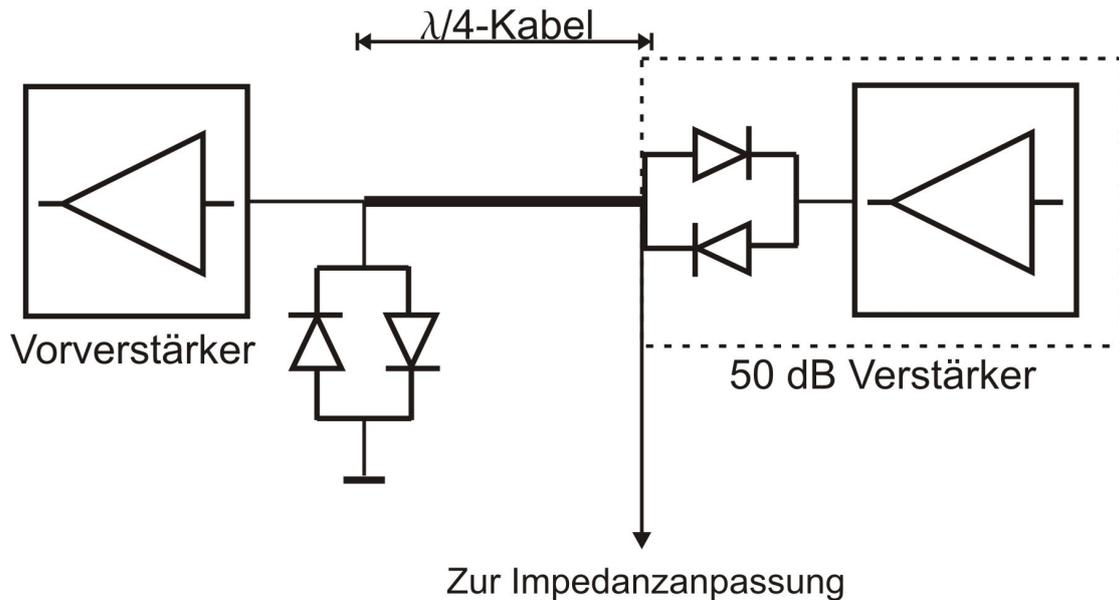


Abbildung 3.3.: Detailbild zur Beschaltung des $\lambda/4$ -Kabels mit den entsprechenden Diodelementen zur Signaltrennung

(und damit die Schallausbreitungsrichtung) von der Mittelsenkrechten auf der Schwingeroberfläche abweicht und diese Abweichung konnte bestimmt werden. Die Vermessungen der einzelnen Ebenen geschah in mehreren Schritten:

Vormessung: Zunächst wurde in jeder Ebene der Bereich der höchsten Signalintensität gesucht. Dieser Bereich war recht groß, da das Schallfeld in der nahen Umgebung um seinen Fokus nur wenig an Intensität nachließ und die Größe der Reflektorfläche eine genauere Auflösung des Fokus verhinderte. Die Position des Reflektors sowie die Stärke des Echosignals wurden notiert. An dieser Stelle sollte die Stärke des Anregersignals eingestellt werden. War das Signal zu stark, befand sich der Vorverstärker des Hydrophonsignals in Sättigung und liefert keinen Zusammenhang zwischen Schallintensität am Ort des Reflektors und der Signalstärke im Oszilloskop. War das Anregungssignal zu gering, hob sich das Messsignal schlecht vom Rauschuntergrund ab. Ein Peak-Peak Wert von 1300 bis 1400 mV hat sich als guter Kompromiss erwiesen.

- 1. Messung:** Nun wurde die Position des Reflektors entlang einer der Messachsen verändert und die beiden Koordinatenpunkte, bei denen die Signalintensität des Echos um 6 dB (-50%) abgenommen hat, ermittelt. Dieser Abfall lag in einem Bereich des Schallfeldes, indem die Schallintensität wesentlich stärker von der Position des Reflektors abhing und konnte somit wesentlich genauer als der Fokus selbst vermessen werden. Der Mittelpunkt zwischen diesen beiden Punkten war eine bessere Näherung für den Fokus. Anschließend wurde die Intensität des Echosignals an diesem neuen Fokus ermittelt.

- 2. Messung:** Nun wurde die Position des Reflektors entlang der 2. horizontalen Achse der Fräse verändert und erneut die Punkte, an denen das Echosignal um 6 dB abgenommen hatte, ermittelt. Der Mittelpunkt zwischen diesen beiden Punkten war erneut eine bessere Näherung für den Fokus und die Intensität in diesem Fokus wurde notiert.
- 3. Messung:** Erneut wurde die Position des Reflektors entlang der ersten horizontalen Achse geändert und über die -6 dB-Punkte der Fokuspunkt ermittelt, wie in den letzten beiden Messungen. Der nun erhaltene Punkt war erneut eine verbesserte Näherung des Fokuspunktes der Ebene.
- 4. Messung:** Erneut wurde die Position des Reflektors entlang der zweiten horizontalen Achse der Fräse geändert und die Punkte, an denen das Echo um 6 dB abgenommen hatte, ermittelt. Den Mittelpunkt zwischen diesen beiden Punkten war erneut eine bessere Näherung des Fokus und die Intensität in diesem Fokus wurde notiert.

Siehe hierzu auch Abbildung 3.4. Weitere Messungen entlang der Messachsen waren möglich, allerdings änderte sich die Lage der Fokus nicht weiter. Ebenso war in jeder Ebene einmal die grobe Intensitätsverteilung außerhalb der Schallfeldbreite durchfahren worden. Dies diente dazu, sicherzustellen, dass nicht ein Nebenmaximum der Intensität vermessen wurde. Vor allem im Nahfeld waren schon sehr nah beim eigentlichen Hauptmaximum Nebenmaxima zu erkennen. Ansonsten bestand die Gefahr, dass man an einem solchen Nebenmaximum „hängen bleibt“. Lag eine Messebene im Einflussbereich des Nahfeldes, so konnte es zu überraschenden Sprüngen in der Lage der Ebenenfoki kommen. Ebenso war ein plötzliches Abfallen der Stärke des Messsignals (in einer Größenordnung von 8 dB und mehr innerhalb von nur 10mm Annäherung von Reflektor und Schwinger) ein guter Hinweis auf Nahfeldeffekte, da im Fernfeld eine Zunahme der Intensität bei Annäherung an den Schwinger erwartet wurde (beachte Abbildung 2.2). Beginnt man die Messreihe bei möglichst großer Entfernung zwischen Wandler und Reflektor und verringert diesen Abstand mit jeder Messebene kann bei Erreichen des Nahfeldes die Messreihe abgeschlossen werden.

3.3. Ergebnisse der Fokussmessungen

Die beschriebenen Messungen wurden mit 2 Wandlern durchgeführt (ab jetzt Schwinger1 und Schwinger2 genannt). Mit Schwinger1 wurden zunächst eine Reihe von Testmessungen durchgeführt und Fehler in Aufbau und Betrieb der Messapparatur ermittelt. Ebenso konnten so die Grenzen der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse ermittelt werden. Hierauf wird später in der Fehlerbetrachtung noch genauer eingegangen. Im Anschluss wurden beide Schwinger, von einem Bereich oberhalb des vermuteten Fokus nahe der Wasseroberfläche bis zum beginnenden Nahfeld, vermessen. Die für den Fokus der Schwinger entscheidenden Daten wurden in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

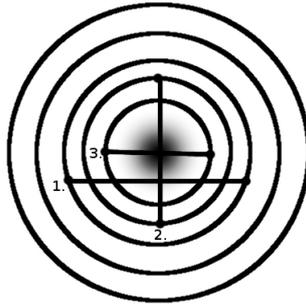


Abbildung 3.4.: Schaubild der verwendeten Messmethode. Die Kreise entsprechen Gebieten gleicher Schallintensität, die Geraden entsprechen den durchfahrenen Reflektorpositionen

Schwinger1

Abstand Schwinger-Reflektor [mm]	181,152	220,82	229,4	239,76	250,12	261,66
Lage der Fokuspunkte der einzelnen Messebenen						
Errechnete Fokuspunkte in X-Achse [mm]	0,335	0,175	0	0,105	0,09	0,14
Errechnete Fokuspunkte in Y-Achse [mm]	-1,70	-1,95	-2,12	-2,14	-2,23	-2,31
Breite des Schallfeldes zwischen den -6 dB Grenzen						
X-Achse [mm]	3,94	2,92	3,42	3,39	3,26	3,06
Y-Achse [mm]	2,19	3,19	3,69	3,84	4,31	4,01

Schwinger2

Abstand Schwinger-Reflektor [mm]:	246,27	254,56	266,99	235,32
Lage der Fokuspunkte der einzelnen Messebenen				
Errechneter Fokuspunkt in X-Achse [mm]	-0,96	-1,04	-1,03	-1,9
Errechneter Fokuspunkt in Y-Achse [mm]	3,8	3,52	3,38	0,14
Breite des Schallfeldes zwischen den -6 dB Grenzen				
X-Achse [mm]	5,99	6	6,34	5,71
Y-Achse [mm]	4,57	4,97	5,15	4,6

Die vollständige Messreihe wurde in den Tabellen A.2 und A.4 dargestellt. Im Falle von Schwinger2 konnte man für den Fokus der 235 mm Ebene die Verzerrung durch die beginnenden Interferenzen des Nahfeldes erkennen, da das erste von der Mitte aus ermittelte Maximum wesentlich aus der Achse der anderen ausgelenkt wurde. Betrachtete man nun die Auslenkung des Schallfokus von der optischen Achse nach Verlassen des Nahfeldes für Schwinger1, so entfernen sich die Fokuspunkte von der X-Achse um ca 0,1 bis 0,15 mm pro Zentimeter Abstand vom Schwinger. Dies entspricht einer Abweichung von der optischen Achse von etwa $0,5^\circ$ bis $0,86^\circ$. Für die Y-Achse entspricht die Auslenkung etwa $1,25^\circ$ von der optischen Achse. Gleiche Betrachtungen für Schwinger2 liefern einen Winkel zur X-Achse von $-0,19^\circ$ bzw. $-1,17^\circ$ zur Y-Achse. Außerdem ist zu erkennen, dass die Fokusachsen ebenso aus der optischen Achse um einen Fixwert verschoben sind. Da die vermessenen Schallstrahlen nach Verlassen des Nahfeldes über einen verhältnismäßig langen Bereich ihre Schallfeldbreite nur sehr gering ändern, können sie über den gesamten Bereich zwischen 270 und 300 mm als stark fokussiert betrachtet werden.

3.4. Betrachtung der Messfehler und Bewertung bezüglich der gesetzten Ziele

Die ermittelten Ergebnisse mussten nun noch hinsichtlich der möglichen Fehler bewertet werden.

Schalllaufzeit: Bei der Bestimmung der Schalllaufzeit mit Hilfe des Oszilloskops ist eine Ablesegenauigkeit von $1 \mu s$ zwischen Anregungspuls und Echopuls erreichbar gewesen. Daraus ergab sich ein Fehler der Laufzeit Schwinger zu Reflektor von $0,5 \mu s$.

Abstand Schwinger zu Reflektor: Der Abstand Schwinger-Reflektor ergab sich aus der gemessenen Laufzeit und der Schallgeschwindigkeit in Wasser, diese ergibt sich in $\frac{m}{s}$ nach der Formel (siehe [Ber54] S.372ff)

$$v(T) = 1557 - 0,0245 \cdot (74 - T)^2$$

,wobei die Temperatur T in Celsius gemessen wurde. Die Wassertemperatur konnte über die Dauer einer Messung nicht konstant gehalten werden. Aus Temperaturmessungen an einer Vergleichsmenge Wasser ergab sich die Wassertemperatur und ihre Schwankung zu $20 \pm 1^\circ C$. Daraus ergibt sich ein Fehler für die Schallgeschwindigkeit von $\pm 0,00265 \frac{mm}{\mu s}$. Laufzeitfehler und Schallgeschwindigkeitsfehler ergeben nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung einen Abstandsfehler von $\pm 1,2 mm$.

Fehler der Schallfeldbreite aus dem Abstandsfehler: Aus dem Fehler des Abstands Schwinger zu Reflektor ergibt sich ein Fehler für die Breite des Schallfelds innerhalb der -6 dB-Grenzen. Zur Abschätzung dieses Fehler errechnet man den Öffnungswinkel α der -6 dB-Linie zur Schallfeldachse nach [Kra98] über die Formel

$$\alpha_{-6dB} = \arcsin \left(0,51 \cdot \frac{\lambda}{D} \right)$$

,wobei D der Durchmesser der verwendeten Piezo-Keramik (in unserem Fall 50 mm) war und λ die Wellenlänge des Ultraschalls. Daraus ergibt sich ein Fehler in der Schallfeldbreite von $7 \cdot 10^{-3} mm$.

Schallintensität Die gemessenen Schallfeldintensitäten waren mit einem Signalrauschen von etwa 20 mV unterlegt. Dieses Rauschen konnte zum Teil durch sorgfältiges Beobachten der Signalstärke im Oszillographen kompensiert werden. Da hierbei nun nicht einfach der Punkt der höchsten Signalstärke abgelesen werden konnte, nahm der eigene Ablesefehler zu. Insgesamt liegt der geschätzte Fehler der Signalintensitätsmessung bei etwa $\pm 6 mV$.

Fehler der Schallfeldbreite durch Intensitätsfehler Der Fehler der gemessenen Schallintensität wirkt sich in einem Fehler der gemessenen Schallfeldbreite aus. Um diesen abzuschätzen, wurde zunächst die Ortsabhängigkeit der Schallintensität im Bereich des -6 dB-Abfalls betrachtet. Die Schallintensität reagiert auf sehr kleine Änderungen des Abstands von der Schallachse mit großen Intensitätsschwankungen. Im Umkehrschluß wirkte sich nun ein verhältnismäßig kleiner Fehler der gemessenen Intensität nur sehr gering auf die ermittelte Ortsposition aus. Variierte man die Reflektorposition im Be-

reich des -6 dB-Abfalls, entsprach eine ± 6 mV Schwankung etwa einer Änderung der Reflektorposition von 0,02 mm. Dieser Fehler entsprach in etwa dem Fehler der Reflektorposition durch Einstellungsungenauigkeiten der Fräse.

Aus den genannten Fehlerquellen ergibt sich nun ein Gesamtfehler von $\pm 0,08$ mm für die Schallfeldbreite und $\pm 0,06$ mm für die Position des Schallachse.

Bei der Betrachtung der vermessenen Schallachsen und Schallfeldbreiten lagen die Schwankungen der Messwerte über diesen Fehlergrenzen. Das Auflösungsvermögen der verwendeten Messapparatur wurde also noch durch weitere Faktoren beeinflusst, deren genaue Ursache nicht ermittelt werden konnten. Vermutliche weitere Fehlerquellen sind eine nicht völlig plane Reflexionsfläche der verwendeten Reflektoren sowie der Unterschied zwischen Freifeld und Diffusfeld infolge von Reflexionen. Als Hydrophon reagierten die verwendeten Ultraschallwandler hauptsächlich nur auf ein sehr schmales Frequenzband um ihre Anregungsfrequenz herum. Daher konnte der Anteil der im Wasser entstehenden Oberwellen, die in der eigentlichen Schallintensität enthalten waren, zu großen Teilen nicht entsprechend mit vermessen werden. Dieser Effekt wurde noch verstärkt, da das Echosignal noch über einen 2,5MHz Tiefpass gefiltert wurde. Die Verzerrung des Echosignals durch den Oberwellenanteil hätte die reinen Ablesefehler ansteigen lassen. Ebenso kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich wieder Gasse im Wasser angesammelt haben und sich daraus Störungen ergaben. Das abgeschätzte Auflösungsvermögen der verwendeten Messapparatur lag nach Betrachtung der gewonnenen Messwerte in einem Bereich von ca. 0,2 mm.

Die Daten waren innerhalb dieser Größenordnung bei verschiedenen Messungen reproduzierbar, allerdings musste beachtet werden, dass es durch Ungenauigkeiten bei der Montage des gesamten Messaufbaus zwischen einzelnen Messreihen zu einer Abweichung von bis zu 0,6 mm gekommen war. Das scheint die Fehlergrenze zu sein, innerhalb der die Koordinatensysteme von Aufbau und Fräse in Deckung gebracht werden können und die Gehäuse der Ultraschallschwinger innerhalb der Plexiglassröhre reproduzierbar fixiert werden konnten. Da dieser Offset auf allen Messwerten einer Messreihe in gleichen Größe und Richtung lag, konnte er sehr einfach zum Vergleich zweier Messreihen herausgerechnet werden. Die Schallfeldbreite war hiervon komplett unabhängig.

Allerdings ergibt sich daraus, dass 0,6 mm die kleinste Unsicherheit ist, mit der die absolute Lage der Schallfeldachse zum Schwinger bestimmen werden konnte, da diese Aufbauungenauigkeit nicht umgangen werden konnte. Leider stand uns nicht für die komplette Dauer aller Messungen eine geeignete Fräse dauerhaft zur Verfügung, um diese Abweichungen genauer zu untersuchen.

Mit Hinblick auf die spätere Verwendung der Schwinger im 2. Teil dieser Arbeit waren die Messungen ein voller Erfolg, da die erreichten Genauigkeiten für den Zweck der Kreuzung zweier Schallstrahlen, innerhalb eines Bereichs in dem beide stark fokussiert waren, völlig ausreichend waren.

4. Kreuzung der Schallstrahlen innerhalb eines elastischen Festkörpers

4.1. Aufbau der Messanlage

4.1.1. Aufbau und Ausrichtung der Messapparatur

Ultraschall bei einem Frequenzbereich um 2,5 MHz hat in Wasser bei Raumtemperatur eine Wellenlänge von etwa 0,6 mm. Um die Phasenänderung einer solchen Welle nachzuweisen, musste der Messaufbau in sich steif sein. Änderungen im Abstand Sender Empfänger durch Vibrationen des Messaufbaus im Zehntel-Millimeter Bereich hätten ansonsten ebenso zu Phasenänderungen geführt und keine eindeutige Zuordnung der gemachten Beobachtungen erlaubt.

Abbildung 4.1 skizziert den verwendeten Messaufbau. Die Messstrecke verlief vom Messschwinger zum Hydrophon, während der Kraftschwinger im veränderbaren Winkel α zur Messstrecke stand. Als Messschwinger wurde der aus Kapitel 3 bekannte Schwinger1 verwendet, als Kraftschwinger wurde Schwinger2 verwendet. Beide Schwinger und das Hydrophon waren in wasserdichten Aluminiumkästen montiert (siehe A.1). Diese Kästen wurden fest mit einer Drehscheibe aus Aluminium verschraubt. Als Verbindungsstück zwischen diesen Aluminiumgehäusen wurden zwei Aluminiumprofile als Traversen genutzt. Je ein Messingzapfen wurde mit jeder Drehscheibe verschraubt und durch die Traverse geführt. Über ein Innengewinde im Zapfen wurde dieser gegen eine Aluminiumhülse gezogen, die auf der Traverse auflag und die Gehäuse wurden somit fest aufgehängt. Durch einen einige Millimeter breiten Luftspalt zwischen der Hülse und dem Zapfen konnten die Kästen, auch leicht zur Senkrechten geneigt, fest gezogen werden. Die Bohrungen durch die Traverse waren entsprechend länglich gearbeitet um etwa $\pm 3^\circ$ Neigung zu erlauben. Hiermit konnte später die akustische Achse des jeweiligen Schwingers innerhalb des Aufbaus justiert werden. Drei Schrauben drückten durch die Traverse auf die Drehscheibe und legten die Neigung der Drehscheibe fest. An der Drehscheibe selbst konnten die Gehäuse dann horizontal gedreht werden. Abbildung A.2 zeigt die fertige Montage an der Traverse. Aluminiumblöcke, die an den Innendurchmesser der Traverse angepasst und um die Zapfen platziert wurden, verhinderten dass sich die Traverse durch das Anziehen der Schrauben verzieht

Beide Aluminiumprofile wurden nun mit einer Gewindestange aufeinander geschraubt, sodass die Gewindestange die Drehachse der beiden Traversen gegen einander war. Die Achse lag genau über dem späteren Kreuzungspunkt der Schallstrahlen. Da diese Kreuzung im Fokusbereich beider Schallstrahlen liegen sollte, mussten die Wandler 250 mm von dieser Drehachse entfernt montiert werden.

Der gesamte Aufbau wurde nun in ein Wasserbecken gehangen. Ein seitlich an der Traverse des Messstrahls angebrachter Metallarm diente für die PVA-Phantome als Probenhalter. Hierbei handelte es sich um ein Gemisch aus Polyvinylalkohol, Wasser und Zellulose. Diese Phantome wurden innerhalb der Arbeitsgruppe von Professor Maier zur Simulation von menschlichem Gewebe genutzt. Ihr Elastizitätsmodul schwankt je nach Herstellungsart im Bereich von 30 bis 70 kPa. Die Details ihrer Herstellung und Eigenschaften wurden in der Diplomarbeit von Stefanie Blum „Schallstrahlungscontrast in MR-Phasenbildern - Materialeigenschaften von Gewebephantomen aus Polyvinylalkohol“ Juni 2011 Universität Bonn, beschrieben. Außerdem wendet sich die noch nicht abgeschlossene Masterarbeit von Saskia Paul dieser Thematik zu.

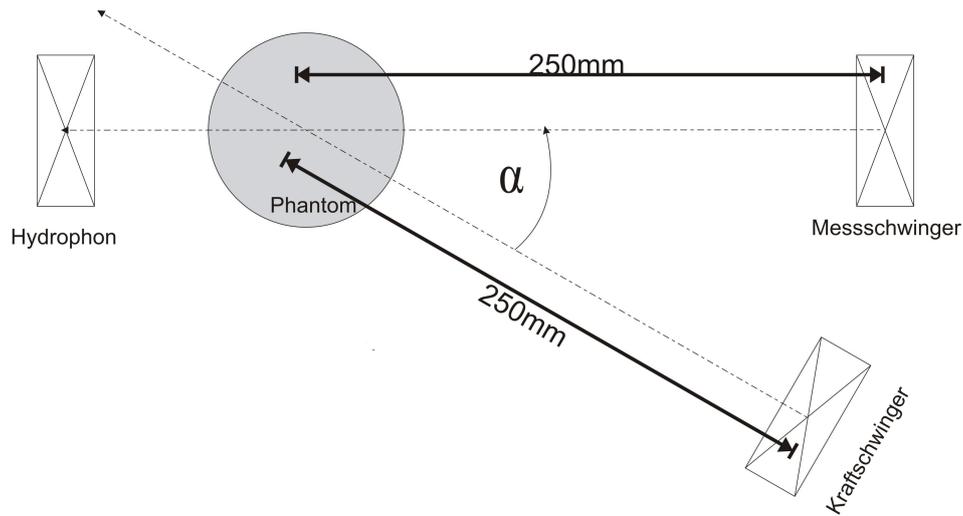


Abbildung 4.1.: Lageskizze zwischen Messarm (horizontal) und dem dazu geneigten Kraftarm. Im Kreuzungspunkt wurde das PVA-Phantom platziert.

4.1.2. Aufbau der Elektronik und Justierung des Experiments

Der Aufbau ließ sich thematisch in zwei Abschnitte aufteilen, den Kraftarm, mit dem später die Bewegung innerhalb des PVA-Phantoms erzeugt wurde, und den Messarm, in dem später der geänderte Phasenwinkel nachgewiesen werden soll.

Zunächst musste gewährleistet werden, dass die Schallachse des Kraftarms entlang der gewünschten Schallstrecke verlief. Aus Kapitel 3 ergab sich eine im Verhältnis zur Schallstrahlbreite geringe Ablenkung aus der optischen Achse. Stellte man den Schallstrahl nun parallel mit der Orientierung der Traverse des Kraftarms, führten die nötigen Änderungen an der Wandlerposition nicht dazu, dass die Wandler die gemeinsame horizontale Messebene verlassen hatten. Um die Ausrichtung des Wandlers zu kontrollieren, wurde ein Reflektor senkrecht zur Messachse in den Schallstrahl gehangen. Abbildung 4.2 zeigt die nötige Beschaltung des Wandlers. Um den Signaleingang am Oszilloskop nicht zu überlasten, wurde der Ausgang des HF-Generators direkt mit der Impedanzan-

passung verbunden und an dieser Stelle eine Abzweigung zum Oszilloskop gelegt. Das TTL-Steuersignal des Pulsers wurde auf ca. $60 \mu\text{s}$ eingestellt und man betrachtete das Echo der angeregten Signale. Befand sich der US-Wandler in der gewünschten Position, trafen seine Schallpulse senkrecht auf den Reflektor und wurden vom Wandler selbst wieder als Spannungssignal an das Oszilloskop gesendet. Der Wandler wurde so justiert, dass die Signalamplitude im Oszilloskop maximal wurde. Es empfahl sich hierbei die Wiederholzeit des Pulsers auf einen Wert von 10 ms zu stellen, sodass die Anzeige schneller auf geänderte Einstellungen reagierte. Das Echo sollte etwa $400 \mu\text{s}$ nach Beginn des Anregungssignals folgen.

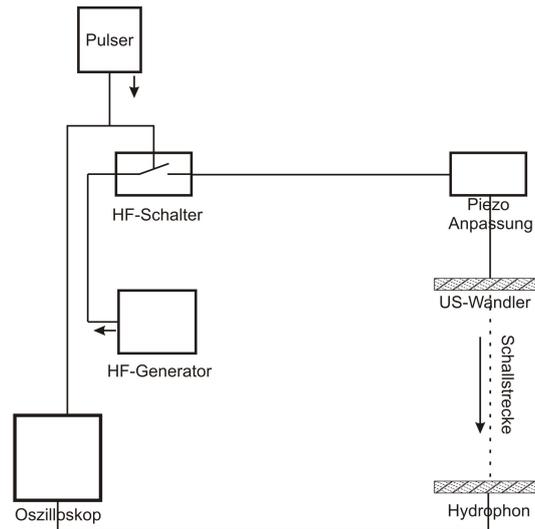


Abbildung 4.2.: Schaltplan zur Kontrolle der Ausrichtung des US-Wandlers im Kraftarm

Nun wurde, mit dem Kraftarm beginnend, die Elektronik für den Messbetrieb umgebaut. Der Schaltplan für den Messbetrieb kann in Abbildung 4.3 betrachtet werden. Ein Hochfrequenz-Sinusgenerator wurde im Dauerbetrieb auf die Anregungsfrequenz des Kraftschwingers eingestellt ($2,531 \text{ MHz}$). Das Signal wurde in einen HF-Schalter geleitet (Typ Mini-Circuit ZAS-3). Das Ausgangssignal des HF-Schalters wurde in einen 50dB -Verstärker mit einer maximalen Ausgangsleistung von 50 W geleitet. Das verstärkte Signal wurde in einen zweiten variablen Verstärker (Typ OM2500 HF der Firma OM Power) und nach diesem über eine Impedanzanpassung an den US-Wandler geleitet. Der Schalteingang des HF-Schalters wurde über das TTL-Signal eines Pulsers gesteuert. Dieses TTL-Signal wurde außerdem an ein Oszilloskop weitergeleitet. Hinter dem Kreuzungsbereich zwischen Messstrahl und Kraftstrahl wird im Kraftstrahl noch ein Ultraschallabsorber (Schallsumpf) angebracht.

Für den Messarm wurde zunächst ebenfalls eine Hilfsschaltung erstellt, um die Ausrichtung zwischen Hydrophon und US-Wandler zu optimieren. Hierzu wurde die gleiche Schaltung wie für die Einstellung des Kraftarms genutzt. Anstelle des Reflektors wurde das Hydrophon genutzt. Das Hydrophonsignal wurde auf dem Oszilloskop betrachtet

und die Position von Hydrophon und US-Wandler abwechselnd verändert, bis die aufgenommene Signalstärke maximal wurde. Nach Entfernen der Hilfsschaltung wurde die Messschaltung aufgebaut. Zunächst wurde ein HF-Sinusgenerator auf 2,531 MHz eingestellt. Das Ausgangssignal des Generators wurde zum einen direkt in ein Oszilloskop geleitet und zum anderen an einen weiteren HF-Schalter (Typ Mini-Circuit ZAS-1) geleitet. Das Signal nach dem Schalter wurde über ein einstellbares Dämpfungsglied an einen weiteren 50dB-Verstärker (Typ 121CR der Firma Kalmus), mit einer maximalen Ausgangsleistung von 200 W, geleitet. Das verstärkte Signal wurde über eine Impedanzanpassung an den US-Wandler geleitet. Nach Durchlauf der Schallstrecke des Messarms wird das Signal über ein Hydrophon wieder aufgenommen. Dieses Signal wurde nun über einen Filter (2,5 MHz-Tiefpass) und einen weiteren Signalverstärker ein das Oszilloskop geleitet. Zur Steuerung des HF-Schalters wurde das TTL-Steuersignal des Kraftarms in eine Logikeinheit geleitet und deren Ausgangssignal an den Steuereingang des HF-Schalters angeschlossen und ebenfalls an das Oszilloskop weitergeleitet. Es sollte nicht der gleiche HF-Generator für Mess- und Kraftarm verwendet werden, da die HF-Schalter einkommende Signale nicht komplett blockten, sondern nur sehr stark dämpften. Ansonsten bestand die Möglichkeit, dass Schaltereignisse auf dem einen Arm den anderen Arm beeinflussten. Auf diese Weise wurden beide Versuchsarme elektrisch soweit wie möglich getrennt (nur das Zeitsignal war gekoppelt).

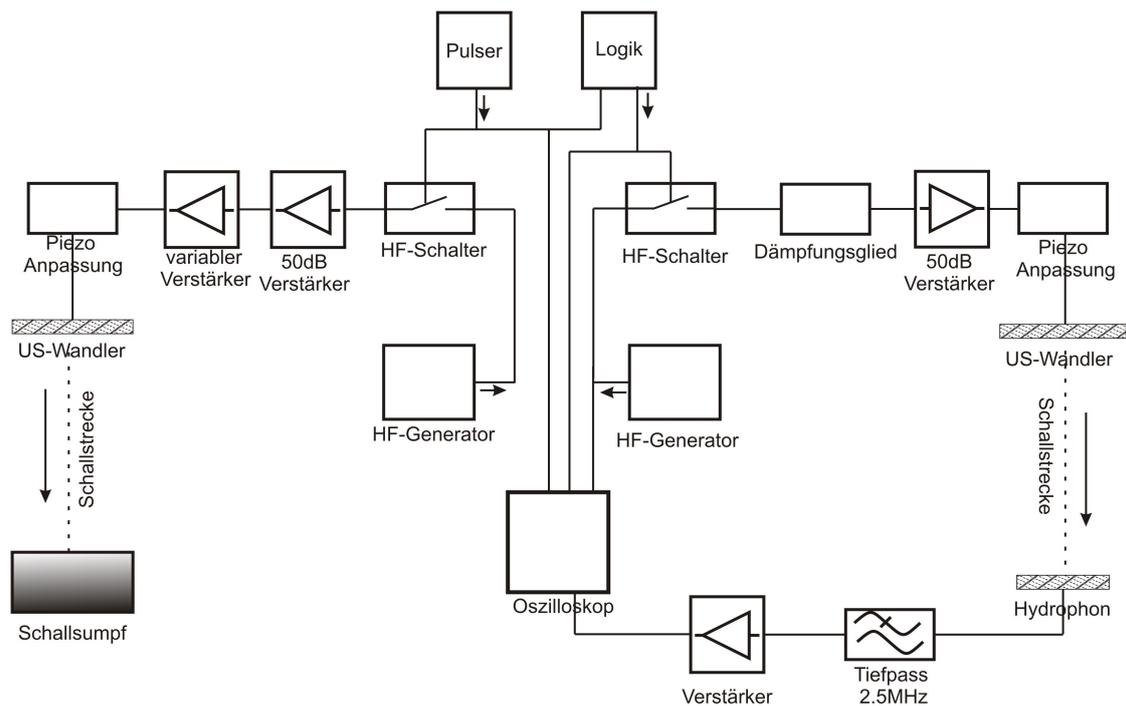


Abbildung 4.3.: Schaltplan zur Phasenwinkelmessung im Festkörper. Schaltung des Kraftarms links, Schaltung des Messarms rechts

Bei dieser Schaltung bestand nun zwischen dem HF-Generatorsignal des Messarms und

dem Signal des Hydrophons ein fester Phasenzusammenhang, auch wenn der Gangunterschied durch die Teilstrecke, die das Signal als Schallimpuls im Messarm zubrachte, etliche Perioden betrug. Vor der Justage des Aufbaus musste der zu betrachtende Messbereich festgelegt werden. Während der Versuche hatte sich herausgestellt, dass das Hydrophon von beiden Wandlern direkt über elektrisches Übersprechen beeinflusst wurde. Da das Übersprechen zwar in seiner Frequenz dem Schallsignal entsprach, aber natürlich nicht mit diesem in Phase war, beeinflusste es natürlich die Phase des gemessenen Schallsignals am Hydrophon. Eine Messung der Phase zwischen Hydrophonsignal und dem Anregungssignal des HF-Generators konnte also nur erfolgen, wenn beide Wandler zu dieser Zeit nicht aktiv waren. Der Schall des Messwandlers erreichte den Kreuzungspunkt nach $166 \mu\text{s}$ und das Hydrophon nach insgesamt $222 \mu\text{s}$. Der Schall des Kraftwandlers erreichte den Kreuzungspunkt ebenfalls nach $166 \mu\text{s}$. Außerdem musste beachtet werden, dass der variable Verstärker im Kraftarm nur auf Signale ab einer Länge von 5 ms reagierte. Es war also nicht möglich, die Auslenkung des Phantoms aus seiner Ruhelage selbst messtechnisch zu betrachten. Nachdem der Kraftarm abgeschaltet wurde, kehrte das elastische Phantom in seinen unausgelenkten Zustand zurück, diese Bewegung sollte genutzt werden, um die Phase des Messstrahls zu beeinflussen. Um das Elastizitätsmodul verschiedener Phantome zu bestimmen, wurde innerhalb der Gruppe von Professor Maier bei mehreren Phantomen die mechanische Eigenschwingung gemessen. Für das hier verwendete Phantom kann man daraus abschätzen, dass seine Eigenfrequenz bei ca. 11 Hz liegt, also eine Periode von etwa 90 ms hatte. Ging man davon aus, dass die Auslenkbewegung durch den Kraftarm abgeschlossen und das Phantom in einem stabilen Zustand war, war der Bereich der größten Geschwindigkeit im Phantom $22,5 \text{ ms}$ nach Ausschalten des Kraftarms zu erwarten. In diesem Bereich sollte die größte Änderung des Phasenwinkels messbar sein.

Zunächst wurde der Kraftarm justiert. Der variable Verstärker reagierte nicht auf Signale, die kürzer als 5 ms waren. Bei MRT-Messungen der Verformung der Phantome unter Ultraschall hatte sich gezeigt, dass nach 10 ms der Auslenkvorgang im Phantom abgeschlossen ist und sich das Phantom wieder in Ruhe befindet. Die Länge der Kraftpulse wurde über die Länge der TTL-Steuersignale am Pulser auf 10 ms eingestellt. Die Ausgangsleistung des Verstärkers wurde auf 400 W eingestellt. Die Wiederholfrequenz der Kraftpulse durfte nicht zu hoch eingestellt werden, da zum einen das Phantom nach einem Messzyklus wieder in seine Ruhelage zurückkehren und die Eigenschwingung abklingen musste. Zum anderen erwärmte sich bei hoher Leistung der US-Wandler sehr schnell und musste sich zwischen den Messzyklen abkühlen. Die Keramik des Wandlers selbst verkräftete zwar recht hohe Temperaturen, allerdings ist die Klebeschicht, mit der die akustische Fokussierungslinse auf den Wandler geklebt wurde, temperaturempfindlicher. Da der Wandler im Wasser betrieben wurde, ist die Kühlung zwischen den Messzyklen allerdings kein Problem. Bei einer Pause von etwa 250 ms zwischen den Messzyklen bestand für den Schwinger kein Risiko.

Nun wird der Messarm justiert. Der Steuerpuls des Kraftarms steuerte ebenfalls eine Logikeinheit. Diese erzeugte ein zweites TTL Signal mit einstellbarer Verzögerung zum eingehenden Steuersignal. Die Länge des Ausgangssignals konnte ebenfalls frei gewählt werden. Betrachtete man das direkte Ausgangssignal des HF-Schalters im Oszilloskop,

so unterlagen die ersten $35 \mu\text{s}$ nach Einschalten des Signals starken Schwankungen der Signalamplitude. Hierbei handelte es sich um die Überlagerung zweier Effekte, zum einen änderte sich die Belastung des Signalgenerators durch zuschalten des Signalarms zu den Verstärkern, zum anderen schien beim Schaltvorgang selbst ein Störsignal auf dem Signalausgang zu entstehen. Dies konnte gut beobachtet werden, wenn man den zeitlichen Bereich des Schaltvorgangs bei ausgeschaltetem Tongenerator auf dem Oszilloskop betrachtete. Die Messungen wurden später immer mindestens $40 \mu\text{s}$ nach Einschalten des Messsignals durchgeführt. Die Pulslänge der Logikeinheit wurde auf $80 \mu\text{s}$ eingestellt. Bei einer Schalllaufzeit von $222 \mu\text{s}$ vom Wandler zum Hydrophon war das elektrische Übersprechen so für die Phasenwinkelmessungen keine Fehlerquelle. Aufgrund der vermuteten Resonanzfrequenz des Phantoms wurde vorläufig die Verzögerung der Logikeinheit auf $32,3 \text{ ms}$ nach dem Zeittaktsignal des Kraftarms eingestellt. Dies konnte während der späteren Messungen, um andere Zeitbereiche betrachten zu können schnell, verändert werden.

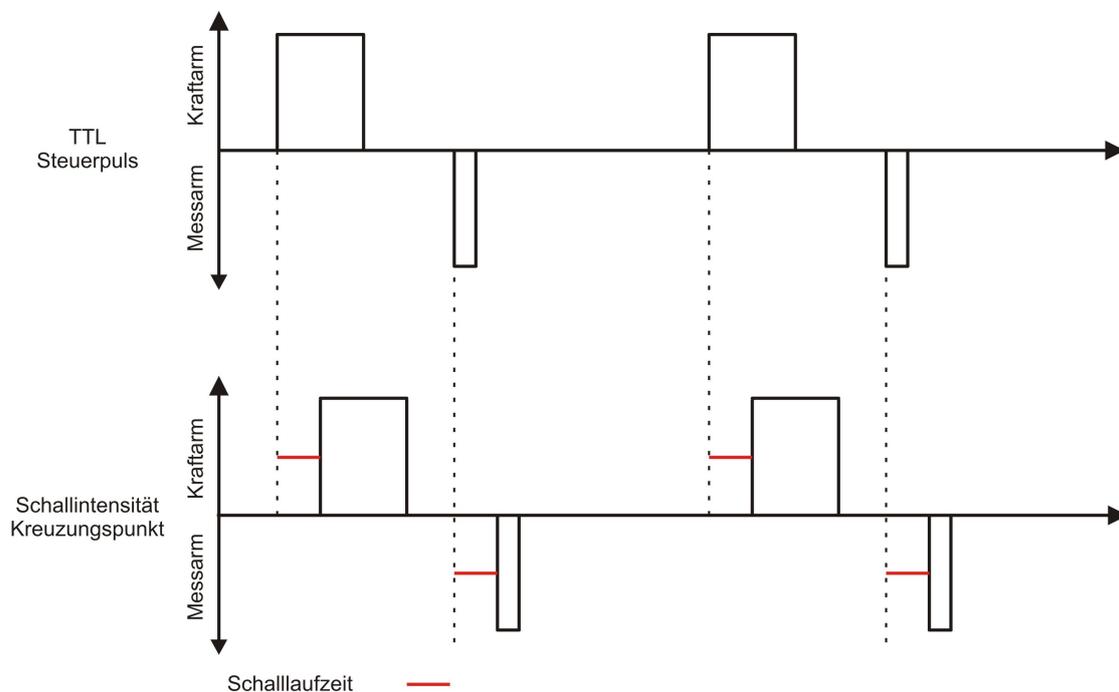


Abbildung 4.4.: zeitliches Taktschema zwischen Kraft- und Messarm über 2zwei Messzyklen

4.2. Durchführung der Messung

In Abbildung 4.4 ist eine Darstellung von zwei Messzyklen zu sehen. An dieser Stelle waren die beiden Signale, vom Hydrophon und dem HF-Generator des Messkreises, im Oszilloskop bereits phasensynchron. Da die Messperiode (zeitl. Abstand zwischen

dem Einsetzen 2er Kraftpulse) kein ganzes Vielfaches der Periode des HF-Signals war, erhielt man, indem man die Triggerfunktion des Oszilloskops auf das TTL-Signal des Pulsers oder der Logikeinheit einstellte, kein stabiles Bild. Das verwendete Oszilloskop der Firma Tektronix vom Typ TDS-5034 erlaubte die Verwendung einer 2-Kanal Triggersequenz. Hierfür wurden 2 Signaleingänge des Oszilloskops als Triggersignale A und B definiert. SignalA schaltete den Trigger scharf, SignalB aktiviert den Trigger. Als SignalA wurde die steigende Flanke des TTL-Steuersignals für den Messarm festgelegt. Als SignalB wurde der positive Nulldurchlauf des HF-Generators genutzt, der an den Messarm angeschlossen war. Der Nulldurchlauf bot sich an, da das Signal dort die größte Amplitudensteigung hatte und dieser Triggerpunkt damit sehr unempfindlich gegen Signalrauschen war. Zusätzlich bot das verwendete Oszilloskop die Möglichkeit eine einstellbare Verzögerung zwischen den Triggerstufen von SignalA und SignalB vorzugeben, diese Verzögerung wurde zunächst auf einen Wert von $265 \mu\text{s}$ gestellt. Auf diese Weise zeigte das Oszilloskop nun ein phasenstabiles Bild zwischen HF-Generatorsignal und Hydrophonsignal. Mit der eingestellten Verzögerung lag der Triggerzeitpunkt etwa $40 \mu\text{s}$ nach Ankunft des Messsignals am Hydrophon. Zur Messung des Phasenwinkels bot das Oszilloskop eine entsprechende Funktion, diese reagierte allerdings sehr empfindlich auf Signalrauschen. Um das Rauschen zu unterdrücken, wurden die Aufnahmen im Oszilloskop über 32 Messzyklen gemittelt. Des Weiteren hatte sich herausgestellt, dass die Phasenwinkelmessung sehr empfindlich auf verschiedene Amplitudengrößen zwischen den Signalen reagiert. Hierbei war es egal, wenn beide Signale auf verschiedenen Skalen angezeigt wurden, dies schien eine Eigenart der Software des Oszilloskops zu sein. Schon bei ca. 20% Unterschied der Signale schwankte der Phasenwinkel um $\pm 10^\circ$. Um diese Effekte zu unterdrücken konnte das Amplitudenverhältnis zwischen dem Referenzsignal der HF-Generators und dem Hydrophonsignal über das eingesetzte Dämpfungsglied nachgeregelt werden. Der Betrachtungsbereich für die Phasenwinkelmessung wurde am Oszilloskop eingestellt, in den Versuchen waren keine Unterschiede in den Schwankungen der Messdaten zwischen der Betrachtung eines Zeitbereichs von etwa $4 \mu\text{s}$ und $10 \mu\text{s}$ zu erkennen.

Nach Aufbau und Justage sollte ein phasenstabiles Signal auf dem Oszilloskop zu betrachten sein, sofern nur der Messarm betrieben wurde. In der Praxis hatte sich hierbei gezeigt, dass an einigen Versuchstagen ein Störsignal auf dem Messarm zu betrachten war. Da es auch bei abgeschaltetem HF-Generator und Verstärkern messbar war und auch bei Mittelung über große Zeiten nicht verschwand, schien es nicht innerhalb des Versuchs zu entstehen. Nachdem es gelang, das Signal stabil im Oszilloskop zu betrachten, fiel auf, dass die Form der Störpulse fest war. Das Signal hatte eine Frequenz von etwa 3,5 MHz und eine Länge von ca. 4 Perioden. 3,5 MHz entspricht dem 80 Meter Band, einem Frequenzband der Hobby-Funker. Durch einen 50Ω Abschlußwiderstand, der parallel zum Hydrophon an das BNC-Kabel zum Tiefpass geschaltet wurde, konnte das Signal auf eine Restamplitude nach Verstärker von 4-5 mV Peak-Peak abgeschwächt werden.

Bei der Betrachtung des Phasenwinkels zwischen dem Signal des HF-Generators und dem Hydrophonsignal (ohne Kraftarm) hat sich herausgestellt, dass die Phasendifferenz in einer Größenordnung von $0,1 \frac{\circ}{\text{s}}$ driftete. Dies könnte mehrere Ursachen haben: Zum

einen könnte dies die Folge einer Frequenzänderung der Ultraschallwelle im Medium gewesen sein, welche aus einer Strömung im Wasser, da der Schallstrahl selbst eine Kraft auf das Wasser ausübte und damit eine Strömung verursachte, resultierte. Zum anderen könnten Temperaturänderungen im Wasser, z.B. durch eine Änderung der Raumtemperatur, Strömungen verursacht haben. Schaltete man den Kraftarm bei voller Leistung zu, so konnte man nach einer gewissen Anlaufphase (20-30 sek) einen ähnlichen Effekt wesentlich stärker beobachten. Die Drift betrug dann etwa $1.5 \frac{\circ}{s}$. Um den gesuchten Effekt vermessen zu können, war es nötig, zunächst den Phasenwinkel im ruhenden Phantom zu vermessen und dann den Betrachtungszeitraum in den Bereich zu verfahren, indem eine möglichst hohe Geschwindigkeit innerhalb des Phantoms vorhanden, und damit der Phasensprung groß, war. Um die Messbedingungen zwischen diesen beiden Zuständen gleich zu halten, wurde der Kraftarm nicht ausgeschaltet, sondern die zeitliche Verzögerung zwischen Kraftpuls und Messpuls über die Logikeinheit verändert. Für ein ruhendes Phantom wurde eine Verzögerung wesentlich größer als 100 ms genutzt. Da keine Angaben zu Verfügung standen, auf welchen Zeitskalen die rückführende Bewegung innerhalb des Phantoms ablief, sind eine Reihe verschiedener Bereiche zur Sondierung betrachtet worden. Messungen wurden unmittelbar nach Ende des Kraftpulses im Phantom durchgeführt (Messbereich des Messpulses erreicht den Kreuzungspunkt 166 μs nach Abschalten des Kraftwandlers). Außerdem wurden Messbereiche bei 1 ms, 5 ms und 10 ms gelegt.

5. Betrachtung und Bewertung der Ergebnisse

In den durchgeführten Messungen war es leider nicht möglich, den gesuchten Effekt messtechnisch zu erfassen. Die Zeitverzögerung, die sich unumgänglich aus Umschaltzeit des Messbereichs und der Sammlung der Messbilder bis zum ersten rauschfreien Bild (und damit zur ersten genauen Phasenwinkelmessung) ergaben, war zu groß. Die Drift des Phasenwinkels machte eine zu große Unsicherheit aus und überdeckte den gesuchten Effekt. Das gesetzte Ziel, die Probleme für die Messung zu erkennen und soweit wie möglich auszuschalten, wurde dennoch erreicht. Der gebaute Versuch war in sich Steif genug, so dass keine Vibrationen die Messungen behindert haben. Die Probleme und Tücken der elektronischen Schaltung konnten gelöst werden. Nicht vorhergesehen wurden die Probleme, die durch Bewegungen im Transportmedium Wasser verursacht worden sind. Um diese Probleme zu lösen, sind bereits erste Lösungsansätze getestet worden. Folien, die vor das Phantom und vor das Hydrophon gesetzt werden, könnten die Störungen durch Strömungen im Wasser wesentlich verringern. Solange diese Folien nicht dicker als ein Zehntel der Wellenlänge der Schallwelle sind, sollten sie den Schall nicht beeinflussen und die Strömungen abfangen. Erste Vorversuche hiermit haben bereits vielversprechende Ergebnisse geliefert. Temperaturbedingte Strömungen könnten durch eine temperaturstabilere Umgebung reduziert werden, in der das Wasserbecken zunächst eine Weile thermisch zur Ruhe kommen kann. Hat man die Signaldrift genügend reduziert, wäre ein weiterer möglicher Fortschritt durch eine veränderte Messelektronik zu erreichen. Gelingt es zum Beispiel das Umschalten des Messbereichs zu automatisieren könnte eine große Menge Phasenwinkelmessungen mit exakten Zeitdifferenzen zwischen den Wechseln der Betrachtungszeiten gesammelt werden und mögliche konstante Beiträge der Strömung könnten als linearer Offset herausgerechnet werden. Leider waren diese Maßnahmen zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht mehr möglich und müssten zu einem späteren Zeitpunkt fortgesetzt werden.

A. Anhang

Tabelle A.1.: Kenndaten der Impedanzanpassung

R_1	$5,1M\Omega$
R_2	$18M\Omega$
R_3	$5,6M\Omega$
C_1	$0,47\mu F$
C_2	$3300pF$
C_3	$3000pF$
L_1	$0,4\mu H$

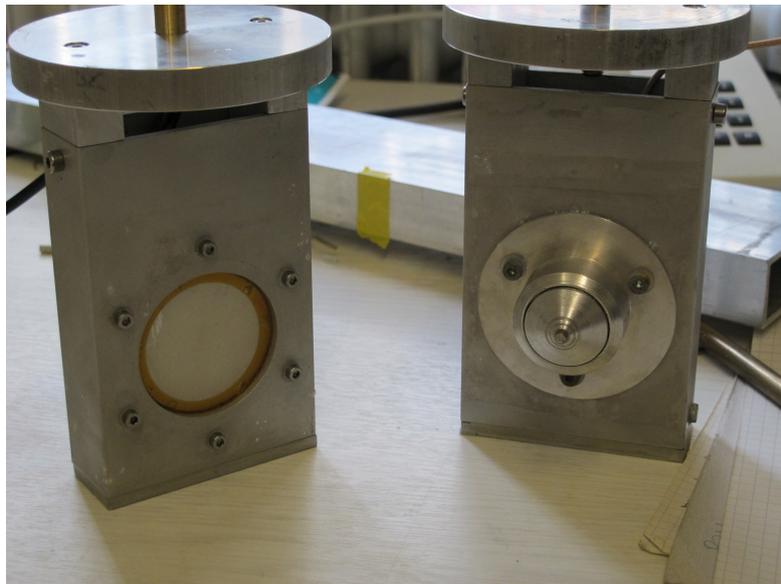


Abbildung A.1.: Ultraschallschwinger (links) und Hydrophon (rechts) im Montagegehäuse mit angesetzter Drehscheibe und Messingzapfen

Tabelle A.2.: Messreihe durchgeführt von Schwinger1

Laufzeit [μs]	244,8	298,4	310	324	338	353,6
Abstand Schwinger-Reflektor [mm]	181,152	220,82	229,4	239,76	250,12	261,66

Vormessung der Intensitätsmaxima						
Maximum X-Achse [mm]	0,67	0,495	0,085	0,105	-0,145	-0,2
Maximum Y-Achse [mm]	-1,45	-1,76	2,14	-2,3	-1,68	-1,57
Signalstärke Oszilloskop [mV] PP	1296	1348	1380	1288	1380	1424
Signalstärke V1 (obere Halbschwingung) [mV]	644	672	684	636	692	712
Signalstärke V2 (untere Halbschwingung) [mV]	-652	-676	-696	-652	-688	-712

1. Messung Y-Achse						
-6 dB-Schwelle PP [mV]	648	674	690	644	690	712
-6 dB-Schwelle V1 (obere Halbschwingung) [mV]	322	336	342	318	346	356
-6 dB-Schwelle V2 (untere Halbschwingung) [mV]	-326	-338	-348	-326	-344	-356
1. -6 dB-Durchlauf [mm]	-0,59	-0,39	-0,23	-0,15	-0,14	-0,32
2. -6 dB-Durchlauf [mm]	-2,85	-3,65	-3,9	-4,08	-4,13	-4,12
Breite des Schallfeldes zwischen den -6 dB Grenzen [mm]	2,26	3,26	3,67	3,93	3,99	3,8
Errechneter Fokuspunkt [mm]	-1,72	-2,02	-2,07	-2,11	-2,13	-2,22
Signalstärke PP im errechneten Fokuspunkt [mV]	1332	1324	1404	1328	1340	1404
Signalstärke V1 im errechneten Fokuspunkt [mV]	660	656	700	672	668	696
Signalstärke V2 im errechneten Fokuspunkt [mV]	-672	-668	-704	-656	-672	-708

1. Messung X-Achse						
-6 dB-Schwelle PP [mV]	666	662	702	664	670	702
-6 dB-Schwelle V1 (obere Halbschwingung) [mV]	330	328	350	336	334	348
-6 dB-Schwelle V2 (untere Halbschwingung) [mV]	-336	-334	-352	-328	-336	-354
1. -6 dB-Durchlauf [mm]	1,7	1,69	1,69	1,62	2,13	2,01
2. -6 dB-Durchlauf [mm]	-0,44	-1,27	-1,37	-1,5	-1,58	-1,59
Breite des Schallfeldes zwischen den -6 dB-Grenzen [mV]	2,14	2,95	3,06	3,12	3,71	3,6
Errechneter Fokuspunkt [mV]	0,63	0,21	0,16	0,07	0,28	0,21
Signalstärke PP im errechneten Fokuspunkt [mV]	1312	1372	1420	1344	1312	1420
Signalstärke V1 (obere Halbschwingung) [mV]	648	680	708	668	656	708
Signalstärke V2 (untere Halbschwingung) [mV]	-664	-692	-712	-676	-656	-712

2. Messung Y-Achse						
-6 dB-Schwelle PP [mV]	324	340	354	334	328	354
-6 dB-Schwelle V1 (obere Halbschwingung) [mV]	-332	-346	-356	-338	-328	-356
-6 dB-Schwelle V2 (untere Halbschwingung) [mV]	-332	-346	-356	-338	-328	-356
1. -6 dB-Durchlauf [mm]	-0,62	-0,36	-0,28	-0,23	-0,14	-0,31
2. -6 dB-Durchlauf [mm]	-2,8	-3,55	-3,97	-4,06	-4,45	-4,32
Breite des Schallfeldes zwischen den -6 dB-Grenzen [mm]	2,19	3,19	3,69	3,84	4,31	4,01
Errechneter Fokuspunkt [mm]	-1,70	-1,95	-2,12	-2,14	-2,23	-2,31
Signalstärke PP im errechneten Fokuspunkt [mV]	1304	1348	1412	1312	1292	1368
Signalstärke V1 im errechneten Fokuspunkt [mV]	684	668	644	652	652	704
Signalstärke V2 im errechneten Fokuspunkt [mV]	-684	-680	-660	-640	-660	-708

2. Messung X-Achse						
-6 dB-Schwelle PP [mV]	684	674	652	646	656	706
-6 dB-Schwelle V1 (obere Halbschwingung) [mV]	342	334	322	326	326	352
-6 dB-Schwelle V2 (untere Halbschwingung) [mV]	-342	-340	-330	-320	-330	-354
1. -6 dB-Durchlauf [mm]	2,305	1,635	1,71	1,8	1,72	1,67
2. -6 dB-Durchlauf [mm]	-1,635	-1,285	-1,71	-1,59	-1,54	-1,39
Breite des Schallfeldes zwischen den -6 dB Grenzen [mm]	3,94	2,92	3,42	3,39	3,26	3,06
Errechneter Fokuspunkt [mm]	0,335	0,175	0	0,105	0,09	0,14
Signalstärke PP im errechneten Fokuspunkt [mV]	1348	1380	1308	1288	1340	1420
Signalstärke V1 (obere Halbschwingung) [mV]	672	684	652	640	668	712
Signalstärke V2 (untere Halbschwingung) [mV]	-676	-696	-656	-648	-672	-708

Tabelle A.4.: Messreihe durchgeführt von Schwinger2

Laufzeit [μs]	332,8	344	360,8	318
Abstand Schwinger-Reflektor [mm]:	246,27	254,56	266,99	235,32

Vormessung der Intensitätsmaxima				
Maximum X-Achse [mm]	-1	-0,96	-1,02	-1,49
Maximum Y-Achse [mm]	4,26	3,79	3,52	0,56
Signalstärke Oszilloskop [mV] PP	1296	1324	1392	1372
Signalstärke V1 (obere Halbschwingung) [mV]	648	664	696	688
Signalstärke V2 (untere Halbschwingung) [mV]	-648	-660	-696	-684

1. Messung Y-Achse				
-6 dB-Schwelle PP [mV]	648	662	696	686
-6 dB-Schwelle V1 (obere Halbschwingung) [mV]	324	332	348	344
-6 dB-Schwelle V2 (untere halbschwingung) [mV]	-324	-330	-348	-342
1. -6 dB-Durchlauf [mm]	6,13	6	5,89	2,23
2. -6 dB-Durchlauf [mm]	1,33	1,16	0,81	-2,16
Breite des Schallfeldes zwischen den -6 dB-Grenzen [mm]	4,8	4,84	5,09	4,38
Errechneter Fokuspunkt [mm]	3,73	3,58	3,35	0,04
Signalstärke PP im errechneten Fokuspunkt [mV]	1300	1312	1404	1372
Signalstärke V1 (obere Halbschwingung) [mV]	648	656	700	684
Signalstärke V2 (untere Halbschwingung) [mV]	-652	-656	-704	-688

1. Messung X-Achse				
-6 dB-Schwelle PP [mV]	650	656	702	686
-6 dB-Schwelle V1 (obere Halbschwingung) [mV]	324	328	350	342
-6 dB-Schwelle V2 (untere halbschwingung) [mV]	-326	-328	-352	-344
1. -6 dB-Durchlauf [mm]	1,82	1,93	2,06	0,89
2. -6 dB-Durchlauf [mm]	-3,8	-4	-4,24	-4,75
Breite des Schallfeldes zwischen den -6 dB-Grenzen [mm]	5,61	5,93	6,3	5,64
Errechneter Fokuspunkt [mm]	-0,99	-1,03	-1,09	-1,93
Signalstärke PP im errechneten Fokuspunkt [mV]	1288	1316	1348	1400
Signalstärke V1 (obere Halbschwingung) [mV]	644	656	672	700
Signalstärke V2 (untere Halbschwingung) [mV]	-644	-660	-676	-700

2. Messung Y-Achse				
-6 dB-Schwelle PP [mV]	322	328	336	350
-6 dB-Schwelle V1 (obere Halbschwingung) [mV]	-322	-330	-338	-350
-6 dB-Schwelle V2 (untere halbschwingung) [mV]	0	0	0	0
1. -6 dB-Durchlauf [mm]	6,08	6,01	5,95	2,43
2. -6 dB-Durchlauf [mm]	1,51	1,04	0,8	-2,17
Breite des Schallfeldes zwischen den -6 dB-Grenzen [mm]	4,57	4,97	5,15	4,6
Errechneter Fokuspunkt [mm]	3,8	3,52	3,38	0,14
Signalstärke PP im errechneten Fokuspunkt [mV]	1324	1300	1352	1392
Signalstärke V1 (obere Halbschwingung) [mV]	660	652	676	700
Signalstärke V2 (untere Halbschwingung) [mV]	-664	-648	-676	-692

2. Messung X-Achse				
-6 dB-Schwelle PP [mV]	662	650	676	696
-6 dB-Schwelle V1 (obere Halbschwingung) [mV]	330	326	338	350
-6 dB-Schwelle V2 (untere halbschwingung) [mV]	-332	-324	-338	-346
1. -6 dB-Durchlauf [mm]	2	1,965	2,14	0,955
2. -6 dB-Durchlauf [mm]	-3,95	-4,03	-4,2	-4,75
Breite des Schallfeldes zwischen den -6 dB-Grenzen [mm]	5,99	6	6,34	5,71
Errechneter Fokuspunkt [mm]	-0,96	-1,04	-1,03	-1,9
Signalstärke PP im errechneten Fokuspunkt [mV]	1292	1380	1344	1384
Signalstärke V1 (obere Halbschwingung) [mV]	648	684	672	692
Signalstärke V2 (untere Halbschwingung) [mV]	-644	-696	-672	-692

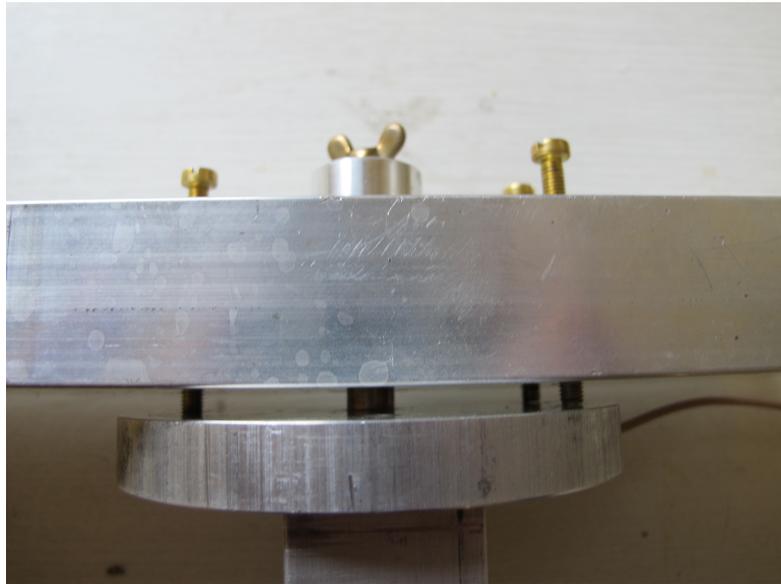


Abbildung A.2.: Aufhängung der Aluminiumgehäuse mit Zapfen und Stellschrauben zur Neigung

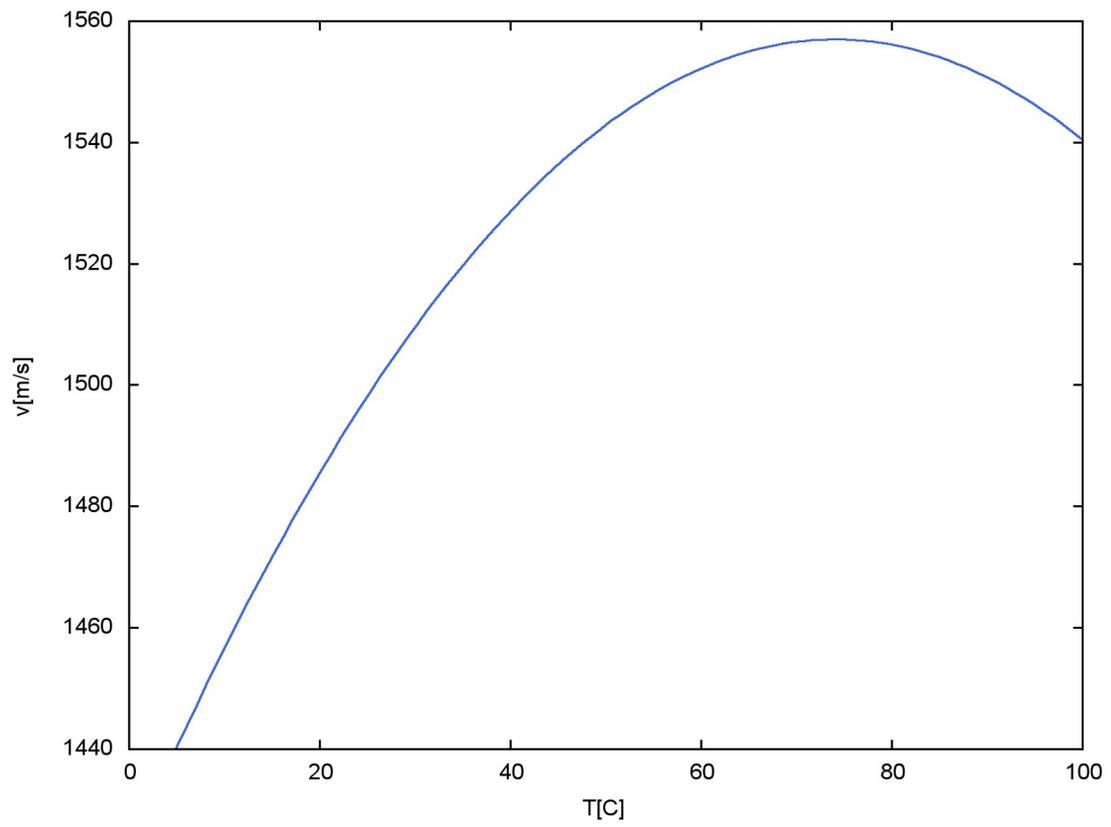


Abbildung A.3.: temperaturabhängige Schallgeschwindigkeit in Wasser

Literaturverzeichnis

- [Kut88] H.Kuttruff *Physik und Technik des Ultraschalls* erschienen im S. Hirzel Verlag Stuttgart, 1988
- [Ulucay] D. Ulucay *3D Darstellung von Verschiebungsfelder - Schallstrahlungskraft in der MRT* Diplomarbeit Universität Bonn, 2010
- [Nyb65] W.Nyborg; W. Mason (Hrsg.): *Physical Acoustic* BD.IIB Academic Press New York, 1965 (S. 265-331)
- [Radicke] M. Radicke *Schallstrahlungskraft in MR-Phasenbildern - Methode zur Darstellung von Elastizitäts-, Schalldämpfungs- und Schallimpedanzänderungen* Dissertation Universität Bonn, 2009
- [Kra98] Krautkrämer GmbH & Co. *Das Krautkrämer Ultraschall-Taschenebuch* 4. deutsche Auflage,1998
- [Ber54] L.Bergmann *Der Ultraschall* 6. Auflage S.Hirzel Verlag Stuttgart, 1954
- [www.Piezoeffekt.de] www.Piezoeffekt.de Stand 12.2011

Danksagung

Zu Beginn möchte ich mich an dieser Stelle bei jemandem bedanken, der all zu oft leer ausgeht, dem Vergessenen. Ich bin sicher, Du hast mir oft geholfen und diese Arbeit hätte so nicht geschrieben werden können. Es ist an dieser Stelle nicht Boshaft gemeint und es ist sicher keine Geringschätzung für die zahlreichen Hilfen. Dein Name steht nur nicht hier, weil der Schreiber an einer Stelle vergesslich war.

Lang ist der Weg durch Lehren, kurz und wirksam durch Beispiele.

Marcus Lucius Annaeus Seneca

Wenn es aber nun darum geht, Namen zu nennen, so muss ich an erster Stelle Herrn Professor Maier danken. Nachdem er mir die Idee zu diesem Thema gezeigt hatte, gelang es ihm sofort, mich dafür zu begeistern. Überhaupt sind Begeisterung und Elan die treibenden Kräfte in der Atmosphäre, die Herr Maier innerhalb der Gruppe geschaffen hat. Wann immer ich ein Problem hatte, gab es einen hilfreichen Rat oder eine aufgezeigte Alternative, ohne dass ich mich auf einen bestimmten Weg festgeschrieben fühlte. So manches mal wurde eine allzu umständliche Problemlösung mit einer anderen Sichtweise durch etwas ganz einfaches ersetzt. Selten blieb es dabei bei einer abstrakten Idee, sondern meist führten solche Gespräche in die verschiedenen Keller und Lager des Instituts auf der Jagd nach Verwertbarem. Bei Frau Maier möchte ich mich für eine tolles und Herzliches Sommerfest bedanken, an das ich gerne zurückdenke.

Ich möchte mich bei Herrn Professor Reiner Vianden bedanken, der sich als Zweitgutachter für meine Arbeit zur Verfügung gestellt hat.

Herrn Bernd Habenstein möchte ich ebenso meinen Dank aussprechen. Er hat mich während meiner Arbeit immer wieder mit seiner Erfahrung auf dem Gebiet der Akustik und Signalaufbereitung auf den richtigen Weg gebracht. Mit ihm habe ich manchen langen Abend zwischen viel Messelektronik gegessen und über die Tücken der Technik gegrübelt .

Ebenso danke ich der gesamten Arbeitsgruppe Maier für eine schöne Zeit und ein tolles Arbeitsklima. Deniz Ulucay, Saskia Paul, Anna-Lisa Kofahl, Sebastian Theilenberg, Judith Wild und (auch wenn wir uns nur kurz das Büro geteilt haben) Stefanie Blum. Nicht zu vergessen die ausgelagerten Gruppenmitglieder vom Büro gegenüber: Niels Räth und Johannes Goetze. Danke das ihr mir bei so manchem abwegigen Gedankenexperiment gefolgt seid und mich auch wieder zurück zum Thema gebracht habt, oder auch manchmal bei Kaffee, Tee und Kuchen noch weiter ab vom Thema begleitet habt.

Die feinmechanische Werkstatt des Instituts, namentlich Herr Klaes, Herr Eichler und Herr Lenz darf hier sicher nicht vergessen werden. Ohne viele Tipps und helfenden Hände wäre die Arbeit so nicht möglich gewesen. Ganz zu schweigen von den vielen Tagen

Gastfreundlichkeit, da nur in der Feinmechanik eine Fräse zur Verfügung stand, an der die Schallfeldmessungen überhaupt möglich waren.

Ebenso möchte ich mich bei den Herren Kerp, Wolf und Dr. D'Hein von der e-Werkstatt für viele gute Ratschläge zum Thema Elektronik und Signalbearbeitung und die Leihgabe des einen oder anderen Geräts, wenn unsere Reserven mal wieder erschöpft waren, bedanken.

Bei Herrn Birkenbach möchte ich mich für die Hilfe beim zusammensuchen aller Teile für das Endgasen der benötigten Mengen Wasser, sowie für die Materialspenden für den Ultraschallsumpf, bedanken.

Danke auch an Frau Balci und Frau Paus aus der Verwaltung für ihre Hilfe bei der Materialbeschaffung.

Zum Abschluss möchte ich mich noch bei meiner Familie bedanken, die immer zu mir gehalten hat, auch wenn es mal so richtig schlecht aussah. Sowie bei allen meinem Freunden und Kommilitonen, die mich durch meine Zeit an der Universität Bonn begleitet haben.

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die Zitate kenntlich gemacht habe.

Bonn, den.....

Unterschrift.....