

M13 ULTRASCHALL

PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

Grundbegriffe: Wellen, Phasen- und Gruppengeschwindigkeit, Doppler-Effekt, Piezoelektrischer Effekt.

Schallwellen sind mechanische Wellen, welche sich in Körpern aufgrund deren elastischer Eigenschaften ausbreiten. Von **Ultraschall** redet man im Frequenzbereich oberhalb des Hörschallbereichs, d.h. von 20 kHz bis über 10 GHz, etwa der Obergrenze für die Schallerzeugung auf technischem Wege.

Die Gleichung der ebenen harmonischen Welle, welche sich mit der Geschwindigkeit c in Richtung der positiven x -Achse ausbreitet, lautet

$$u(t, x) = u_0 \sin\left(\omega\left(t - \frac{x}{c}\right) + \varphi_0\right). \quad (1)$$

Hierbei bezeichnen $u(t, x)$ die sich periodisch ändernde Größe am Ort x zum Zeitpunkt t , u_0 die Amplitude, $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz, $f = 1/T$ die Frequenz und T die Periodendauer. Das Argument der Sinusfunktion bezeichnet man als Phase und φ_0 als Anfangsphase der Welle. Die Anfangsphase wird im Folgenden gleich Null gesetzt, da sie hier keine Rolle spielt. Den kleinsten Abstand zweier Orte gleicher Phase nennt man Wellenlänge λ und aus der Periodizität der Sinusfunktion folgt für die Ausbreitungsgeschwindigkeit, welche auch **Phasengeschwindigkeit** genannt wird,

$$c = f \cdot \lambda. \quad (2)$$

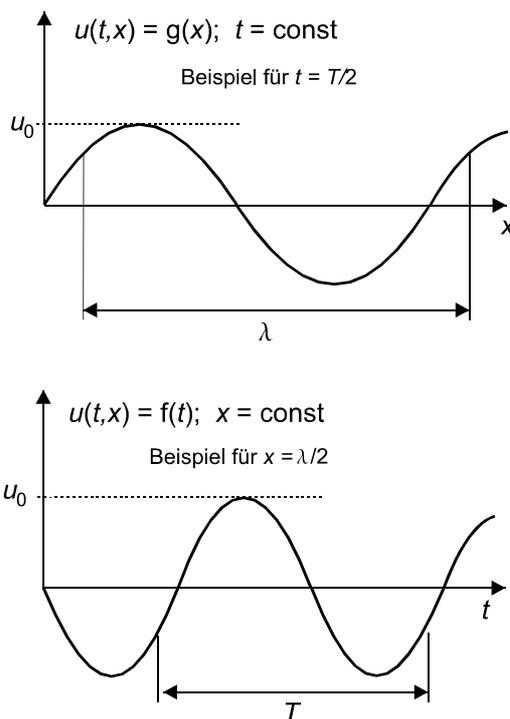


Abb.1 DARSTELLUNGSFORMEN EINER WELLE

Entsprechend der zeitlichen und räumlichen Periodizität einer Welle kann sie auf zwei verschiedene Arten dargestellt werden (Abb.1). In Flüssigkeiten und Gasen treten Schallwellen immer als **Longitudinalwellen** auf. Im Festkörper hingegen können sich auch Transversalwellen ausbilden, denn jede Dilatation ist immer mit einer mehr oder weniger großen Querkontraktion verbunden (Vgl. Versuch M3), so dass auch Scherkräfte auftreten.

Bei Tabellenwerten für die Schallgeschwindigkeiten in Festkörpern ist deshalb darauf zu achten, ob die Daten für dünne Stäbe oder ausgedehnte Körper angegeben sind.

Stehende Wellen: Lässt man zwei Wellenzüge gleicher Amplitude und Wellenlänge, aber entgegengesetzter Ausbreitungsrichtung interferieren, so führt die Addition der zugehörigen Gleichungen auf die Gleichung für die stehende Welle

$$u_0 \sin\left(\omega\left(t + \frac{x}{c}\right)\right) + u_0 \sin\left(\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right) = 2u_0 \cos\left(\omega \frac{x}{c}\right) \sin(\omega t). \quad (3)$$

Hier stellt der sin-Faktor eine im ganzen Raum phasengleiche harmonische Schwingung dar, deren Amplitude $2u_0 \cos(\omega x / c)$ eine periodische Funktion von x mit der Periodenlänge λ ist. So wie die cos-Funktion abwechselnd 0 und +/-1 wird, reihen sich abwechselnd **Schwingungsknoten** und **Schwingungsbäuche** aneinander.

Dopplereffekt: Bewegen sich Schallquelle und -empfänger mit der Relativgeschwindigkeit v , dann stellt man am Empfänger bei Annäherung eine Frequenzerhöhung und bei Entfernung eine Frequenzerniedrigung fest. Da sich die Schallwellen in einem ruhenden stofflichen Medium ausbreiten, ist die Größe der Frequenzänderung davon abhängig, ob sich die Quelle oder der Empfänger bewegt. Man erhält bei einer Quellenfrequenz f_0 für die Empfangsfrequenz bei bewegtem Empfänger

$$f = f_0 \left(1 \pm \frac{v}{c}\right) \quad \text{bzw.} \quad \Delta f = \pm f_0 \frac{v}{c} \quad (4)$$

mit dem Pluszeichen bei Annäherung und dem Minuszeichen bei Entfernung. Bei bewegter Quelle erhält man dagegen als Empfangsfrequenz des Empfängers

$$f = \frac{f_0}{\left(1 \mp \frac{v}{c}\right)} \quad \text{bzw.} \quad \Delta f = f_0 \left(\pm \frac{v}{c} + \left(\frac{v}{c}\right)^2 \pm \dots\right), \quad (5)$$

mit dem Minuszeichen bei Annäherung und dem Pluszeichen bei Entfernung.

Gruppengeschwindigkeit: Bestimmt man die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen aus der Laufzeit z.B. eines Schallimpulses, so sind Messzeit und Messstrecke begrenzt. Solche "abgeschnittenen" Wellenzüge, auch Wellenpakete oder Wellengruppen genannt, breiten sich mit ihrer Gruppengeschwindigkeit aus, welche bei Auftreten von Dispersion von der Ausbreitungsgeschwindigkeit unendlich ausgedehnter Wellenzüge und damit der Phasengeschwindigkeit verschieden ist. Im vorliegenden Experiment tritt keine Dispersion auf und es muss demzufolge hier nicht zwischen Gruppen- und Phasengeschwindigkeit unterschieden werden.

AUFGABEN

1. Bestimmung der Wellenlänge und der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in Wasser durch Vergleich der Phasenbeziehung zwischen den am Schallsender und -empfänger gemessenen Signalen.
2. Bestimmung der Wellenlänge und der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in Wasser durch Messung der stehenden Wellen zwischen zwei Reflektoren.
3. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Wasser unter Ausnutzung des Dopplereffektes.

4. Vergleich der Ergebnisse für die Wellenlänge und die Ausbreitungsgeschwindigkeit aus den Aufgaben 1. - 3.
5. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Aluminium, Kupfer und Messing durch Laufzeit-Messungen.

VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Der Ultraschallgenerator erzeugt hochfrequente sinusförmige Schwingungen, welche in einem Schallkopf mit einem piezokeramischen Wandler Ultraschallwellen erzeugen, die abgestrahlt werden. Neben der kontinuierlichen Abstrahlung im Sinusbetrieb kann wahlweise auch auf Impulsbetrieb (für Aufgabe 5) umgeschaltet werden. Der Schallkopf strahlt dann pulsartig kurze Wellenzüge mit einer Folgefrequenz von 500 Hz ab.

Die Generatorausgänge "Monitor" und "Synchr." dienen zur Darstellung der Schall- bzw. Generatorsignale auf einem Zweikanal-Oszilloskop. Die Phasenlage der zur Erregerspannung proportionalen Monitorspannung kann mit dem

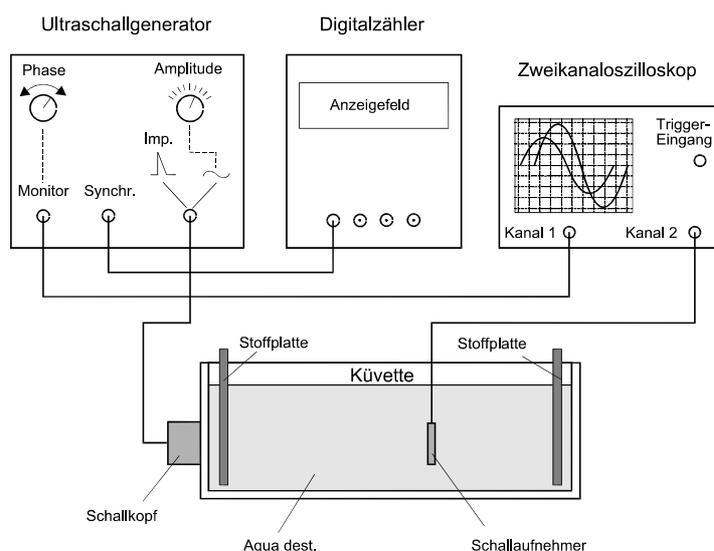


Abb. 2 VERSUCHSAUFBAU FÜR AUFGABE 1

"Synchr." entnommene Spannungsimpuls setzt ca. 10 ns vor Monitor- und Erregerimpuls ein, so dass diese bei externer Triggerung mit dem Synchr.-Signal mit Sicherheit oszillographisch erfasst werden.

Der wasserdichte, als piezoelektrischer Wandler ausgeführte Schallaufnehmer liefert dem Schallwechseldruck proportionale Spannungssignale und ermöglicht die Darstellung von Ultraschallwellen und -impulsen auf dem Oszilloskop.

Für Aufgabe 1 (Abb. 2) wird die Küvette zu 3/4 mit destilliertem Wasser gefüllt. Zur Ankopplung des Ultraschallkopfes an die Schmalseite der Küvette werden einige Tropfen Glycerin in den verbleibenden Spalt gegeben. Die Stoffplatten an den inneren Schmalseiten der Küvette sollen die Ausbildung stehender Wellen hemmen. Mittels einer motorgetriebenen Gewindespindel kann der

Stellknopf "Phase" um ca. 150° relativ zur Erregerspannung verschoben werden. Die Synchr.-Spannung von konstant 5 V ist phasenstarr zur Erregerspannung.

Im Impulsbetrieb setzt der Monitorimpuls gleichzeitig mit dem Erregerimpuls ein, so dass bei gleichzeitiger Darstellung des Monitor- und des aufgenommenen Schallimpulses auf dem Zweikanal-Oszilloskop die Laufzeit des Schallimpulses bestimmt werden kann. Der am Ausgang

Schallaufnehmer mit einstellbarer Geschwindigkeit in Richtung bzw. entgegen der Schallausbreitung bewegt werden.

Mit einem Zweikanal-Oszilloskop werden das Signal der Schallquelle und das dem Schallwechsel-

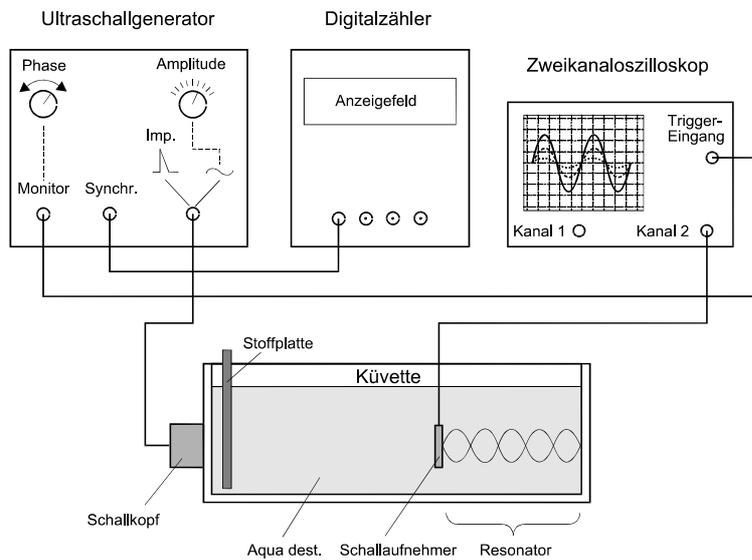


Abb. 3 VERSUCHSAUFBAU FÜR AUFGABE 2

mehreren Zentimetern. Die Wellenlänge beträgt dann $\lambda = s/N$. Zur Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit nach Gl. (2) wird die Frequenz am Synchr.-Ausgang des Generators mit einem Digitalzähler bestimmt.

Für Aufgabe 2 wird der Aufbau geringfügig geändert (Abb. 3): Das Monitorsignal des Generators wird nicht mehr Kanal 1 des Oszilloskops zugeführt, sondern zur externen Triggerung des Aufnehmersignals genutzt und an den dafür vorgesehenen Eingang des Oszilloskops angeschlossen. Außerdem wird die Stoffplatte von der dem Aufnehmer gegenüberliegenden Wand entfernt, damit die Welle reflektiert werden kann.

Bei bestimmten Abständen zwischen dem Aufnehmer und dieser Wand, die sich um jeweils $\lambda/2$ unterscheiden, bildet sich im somit geschaffenen Resonator eine stehende Welle aus.

Aus der Anzahl N der bei Verschiebung s des Aufnehmers um einige Zentimeter überstrichenen

druck proportionale Signal des Aufnehmers bezüglich ihrer Phase miteinander verglichen. Hierzu wird der Monitorausgang des Generators an Kanal 1 und der Aufnehmersignal an Kanal 2 des Oszilloskops angeschlossen. Nach Verschiebung des Aufnehmers um eine Wellenlänge ist die ursprüngliche Phasenlage wieder erreicht. Im Interesse einer hohen Messgenauigkeit empfiehlt sich die Zählung der überstrichenen Wellenlängen N über eine Strecke s von

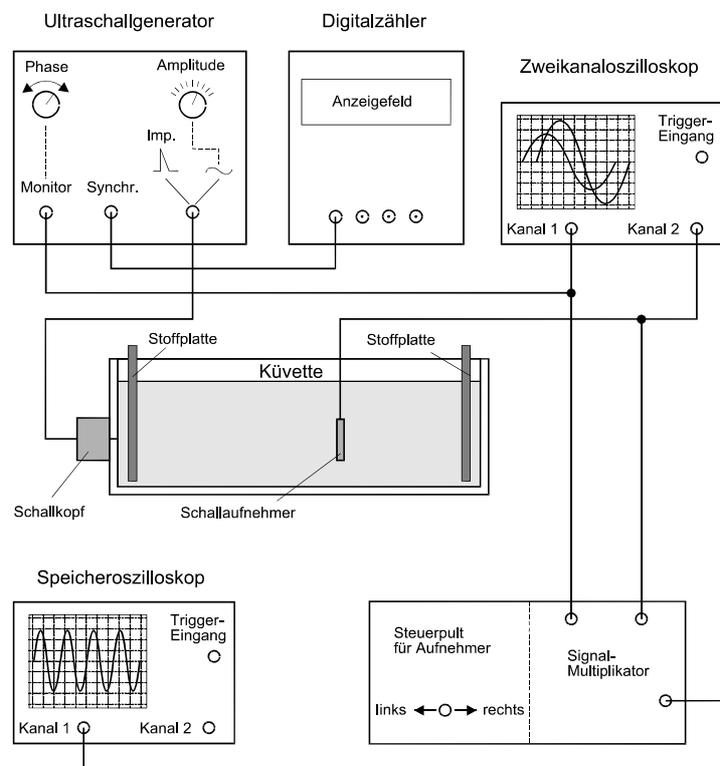


Abb. 4 VERSUCHSAUFBAU FÜR AUFGABE 3

Amplitudenmaxima (oder -minima) wird die Wellenlänge gemäß $\lambda = 2s/N$ und daraus nach Gl. (2) die Ausbreitungsgeschwindigkeit c berechnet.

Für Aufgabe 3 wird der Aufbau für Aufgabe 1 erweitert (Abb.4). Beide Stoffplatten müssen eingebaut sein, um die Ausbildung einer stehenden Welle so gut wie möglich zu dämpfen.

Die grundsätzlich mögliche Bestimmung von Δf durch getrennte Messung von f_0 und f und folgende Differenzbildung würde erfordern, dass die Frequenzdrift während der Messungen deutlich kleiner als das zu erwartende Δf bleibt, was apparativ hier nicht gesichert werden kann. Der hier beschrittene Ausweg besteht in der direkten Bestimmung von Δf auf folgende Weise: Die gleichzeitig gemessenen Sender- und Empfängersignale werden in einer speziellen elektronischen Schaltung auf gleiche Amplitude normiert und anschließend miteinander multipliziert nach dem Prinzip

$$2\cos(2\pi f_0 t)\cos(2\pi f t) = \cos[2\pi t(f_0 - f)] + \cos[2\pi t(f_0 + f)].$$

Der hochfrequente zweite Summand wird ausgesiebt und das Signal mit der Frequenz Δf wird direkt auf dem Bildschirm des Speicheroszilloskops aufgezeichnet. Aus dem Abstand mehrerer Maxima und der eingestellten Zeitbasis kann jetzt Δf berechnet werden. Zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit c nach Gl.(4) wird Δf für jeweils 5 verschiedene Empfängergeschwindigkeiten v in Hin- und Rückrichtung gemessen und c aus dem Anstieg des Graphen $\Delta f = f(v)$ berechnet. Zur Bestimmung von v kann die angezeigte Gewindespindeldrehzahl für den Empfängervortrieb genutzt werden, wenn zuvor die Ganghöhe mit einem Messschieber über ca. 5 cm Gewindelänge geteilt durch hiermit erfasste Gewindegänge bestimmt wurde. Für die Spindeldrehzahl wird ein systematischer Fehler von 0,5 % angenommen.

Für Aufgabe 5 (Abb.5) wird der jeweilige Spalt zwischen Metallprobe und Schallkopf bzw. Auf-

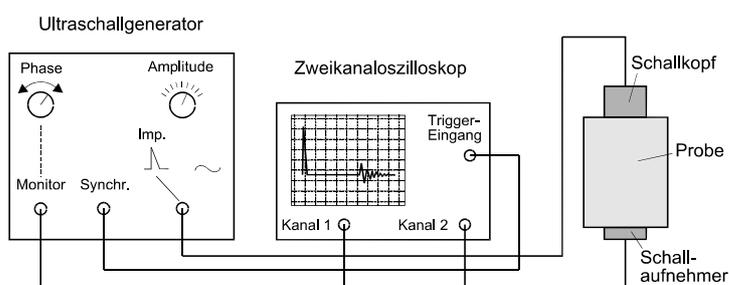


Abb. 5 VERSUCHSAUFBAU FÜR AUFGABE 5

nehmer mit einem Tropfen Glycerin zur sicheren Schallankopplung ausgefüllt. Die im Impulsbetrieb des Generators vom Schallkopf abgestrahlten Ultraschallimpulse werden auf dem Bildschirm des Oszilloskops angezeigt. Hierzu wird der Monitorausgang des Generators mit einem Kanal ver-

bunden. Das nach Durchlaufen der Metallprobe am Aufnehmer entstehende Signal wird auf den anderen Kanal gegeben. Bei der Triggerung mit dem um ca. 10 ns vorseilenden Synchr.-Signal kann bei geeigneter Einstellung der Zeitbasis ein stehendes Bild erreicht werden, welches Sende- und Empfangsimpuls gleichzeitig anzeigt. Aus der Verschiebung beider Signale auf der Zeitachse kann die Laufzeit t und hieraus die Ausbreitungsgeschwindigkeit c bestimmt werden, wenn zuvor die geometrische Ausdehnung der Probe gemessen wurde.

FRAGEN

1. Was versteht man unter dem piezoelektrischen Effekt und wie nutzt man ihn zur Aussendung und zum Empfang von Schallsignalen?
2. Worin besteht der Unterschied zwischen Phasen- und Gruppengeschwindigkeit bei der Ausbreitung von Wellen?
3. Wie leitet man die Formeln für den Dopplereffekt (Gl. (4) und Gl. (5)) her?