

Demonstrations- und Praktikumsversuche

zum Ultraschall mit einem Eigenbaugerät (Teil 1)

B. Ehret

1 Einführung

Unter Verwendung von modernen integrierten Schaltungen in CMOS-Technik ist es möglich, einen Ultraschallgenerator und einen Ultraschallverstärker mit sehr wenig Aufwand aufzubauen. In Verbindung mit preiswerten, handelsüblichen Piezo-Ultraschallwandlern können mit den Geräten Versuche mit Ultraschallwellen im Physikunterricht und im physikalischen Schülerpraktikum durchgeführt werden. Bei entsprechender Gerätezahl sind Schülerübungen in gleicher Front möglich.

Mit Hilfe einer ausführlichen Bauanleitung können die Geräte ohne große Schwierigkeiten selbst oder auch durch Schüler hergestellt werden, wenn etwas Erfahrung im Zusammenbau elektronischer Schaltungen vorhanden ist.

2 Versuchsbeispiele

2.1 Stehende Ultraschallwellen

Sender und Empfänger werden in einem Abstand von einigen Dezimetern mit den Piezo-Elementen aufeinander ausgerichtet. Zwischen S und E bildet sich eine quasistationäre Ultraschallwelle aus (s. Abb. 1), wenn der Abstand zwischen S und E ein natürliches Vielfaches von $\lambda/2$ beträgt. Bei diesen Abständen zeigt ein an den Empfänger angeschlossenes Meßinstrument maximale Intensität an [1]. Wird der Empfänger langsam in Richtung auf den Sender zubewegt, so kann z. B. der Abstand von 11 aufeinanderfolgenden Stellen max. Intensität gemessen werden. Dieser Abstand ergibt durch fünf dividiert die Wellenlänge λ der Ultraschallwelle. Mit $c = \lambda \cdot f$ kann die Schallgeschwindigkeit in Luft bestimmt werden.

2.2 Schwebungen mit Ultraschall

Zwei Ultraschallsender mit den Frequenzen $f_1 = 40\,000$ Hz und $f_2 = 40\,515$ Hz erzeugen Schwebungen mit einer Frequenz

$$f_{\text{schweb}} = f_2 - f_1 = 515 \text{ Hz.}$$

Die Schwebungen können in einem an den Ultraschallempfänger angeschlossenen Kopfhörer abgehört werden. Werden Piezo-Hochtonlautsprecher mit einem Frequenzgang bis über 40 kHz an die Sender angeschlossen, so können die Schwebungen auch direkt vernommen werden. Wird ein Schallsender abgeschaltet, so verschwinden die Schwebungen.

Die Schwebungen können auch auf dem Schirm eines an den Empfänger angeschlossenen Oszilloskopes dargestellt

werden (s. Abb. 2). Um den Empfänger nicht zu übersteuern, kann er aus dem Wellenfeld herausgedreht werden. Um die Schwebungsminima möglichst deutlich hervortreten zu lassen, kann einer der Sender vom Empfänger weggedreht werden.

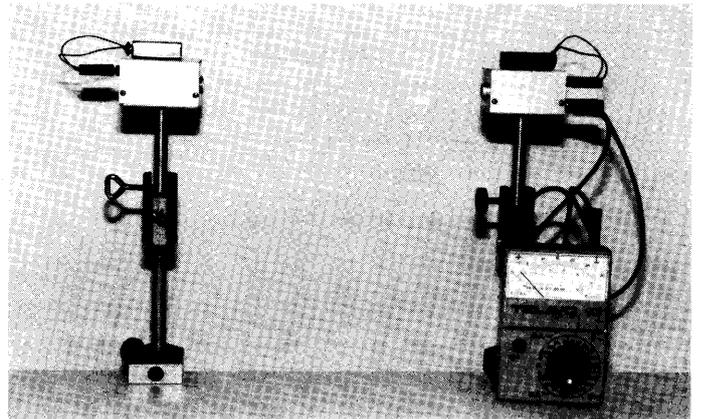


Abb. 1: Versuchsaufbau: Quasistationäre Welle, Bestimmung der Schallgeschwindigkeit

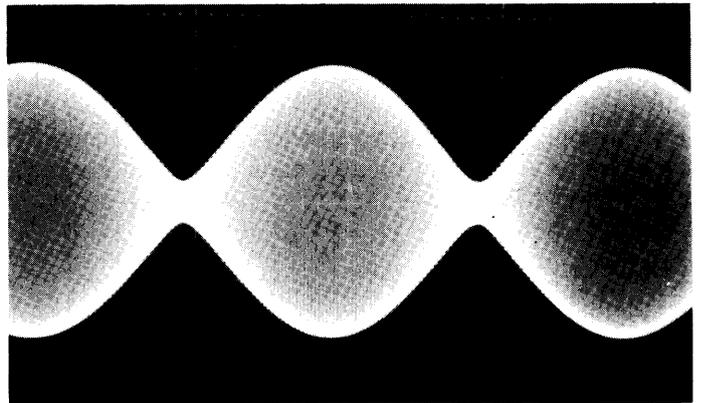


Abb. 2: Oszillogramm Schwebung (x: 1 RE = 0,5 ms, y: 1 RE = 1 V; RE = Rastereinheit)

Auswertung:
Oszillogramm:

$$T_{\text{schweb}} = 1,93 \text{ ms}; f_{\text{schweb}} = 519 \text{ Hz}$$

Ein über einen LC-Tiefpaß angeschlossener Frequenzzähler zeigt eine Schwebungsfrequenz von ca. 514 Hz. (L: Leyboldspule $n = 500$; C = 100 nF)

2.3 Interferenzen zweier Erreger in Phase

An einen Ultraschallsender werden zwei Piezo-Wandler angeschlossen, die einen Abstand von einigen Zentimetern haben. Im Abstand von ca. 50 cm bis 100 cm vom

Sender wird der Empfänger angeordnet. Wird der Empfänger parallel zur Verbindungslinie der beiden Erreger (entlang einer Tischkante) verschoben, so können mit Hilfe des angeschlossenen Meßinstrumentes die Stellen der Interferenzmaxima und Minima bestimmt und abgemessen werden. (Es ist zu beachten, daß der Empfänger nicht übersteuert werden darf, so daß die Interferenzminima deutlich hervortreten; Kontrolle mit Oszilloskop möglich. Zur Regulierung der Ultraschallintensität kann ein Potentiometer ca. 10 kΩ in Reihe mit den Piezo-Wandlern an den Ultraschallgenerator angeschlossen werden).

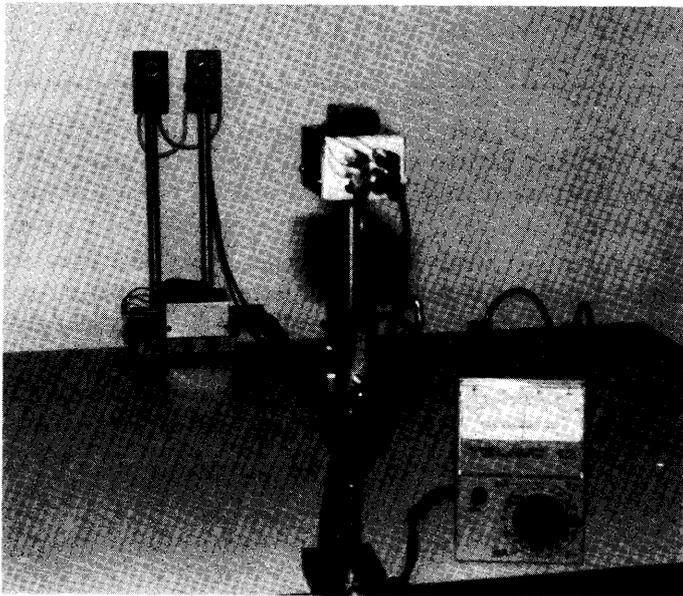


Abb. 3: Versuchsaufbau: Interferenzen zweier Erreger in Phase

Die Versuchsanordnung (s. Abb. 3) eignet sich sehr gut für Schülerübungen in gleicher Front. Dabei können an einen Sender auch zwei Piezo-Wandler-Paare angeschlossen werden. (Dabei kann die Kabellänge zwischen Sender und Wandler auch einige Meter betragen, so daß z. B. auch fest installierte Leitungen vom Lehrer-Experimentiertisch zu den Schülertischen benutzt werden können). In weiteren Versuchen kann der gegenseitige Abstand der Sender-Wandler verändert werden.

2.4 Vielfachinterferenzen

An einen Sender werden drei bzw. vier Wandler (in Phase) angeschlossen. Die Versuchsdurchführung erfolgt wie bei zwei Erregern beschrieben (s. Abb. 4).

Da man nicht erwarten kann, daß alle Wandler gleiche Intensität liefern, können die Nebenmaxima möglicherweise nicht sehr ausgeprägt sein. Eine Verbesserung ist dann meist durch Vertauschen der Wandler möglich.

2.5 Interferenzaufnahmen mit dem Schreiber

An den y-Eingang eines x-y-Schreibers wird die gleichgerichtete und geglättete Ultraschallwechselspannung angeschlossen. (Ein Brückengleichrichter bestehend aus vier Germaniumdioden und der Glättungskondensator sind im Ultraschallempfänger eingebaut. Die Gleichspannung beträgt bei max. Intensität — ohne Übersteuerung des Empfängers — einige Volt).

Mit dem Schreiberläufer bewegt sich der Empfänger in x-Richtung (s. Abb. 5). (Vor dem Zurücksetzen des Läufers

wird der Empfänger auf Tonnenfluß vom Läufer heruntergenommen).

Auswertung:

$$\lambda = \frac{334 \text{ m}}{40 \text{ kHz}} = 8,35 \text{ mm}; g = 38 \text{ mm (Wandlerabstand)}$$

Mit Hilfe der Bedingung für konstruktive Interferenz:

$$\sin \alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{g}; k \in \mathbb{N}$$

ergibt sich für den Interferenzwinkel $\alpha_1 = 12,7^\circ$

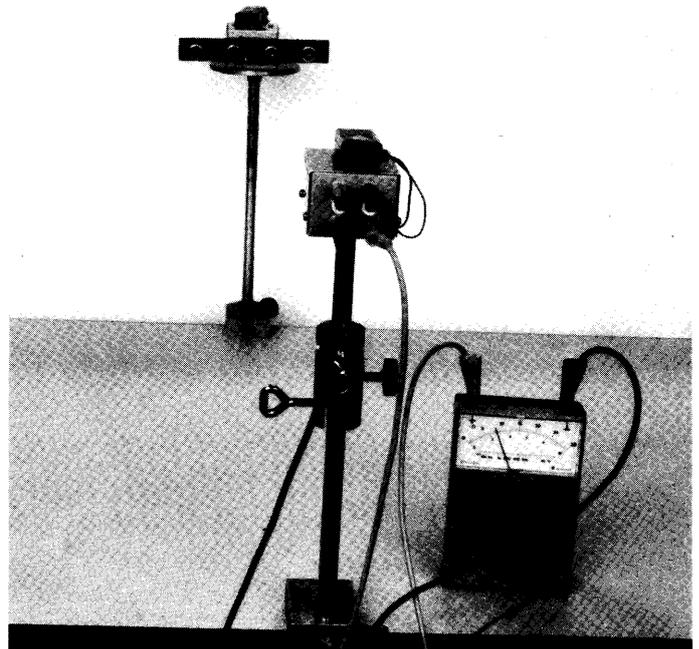


Abb. 4: Versuchsaufbau: Vier Erreger in Phase auf Lochrasterplattenstreifen

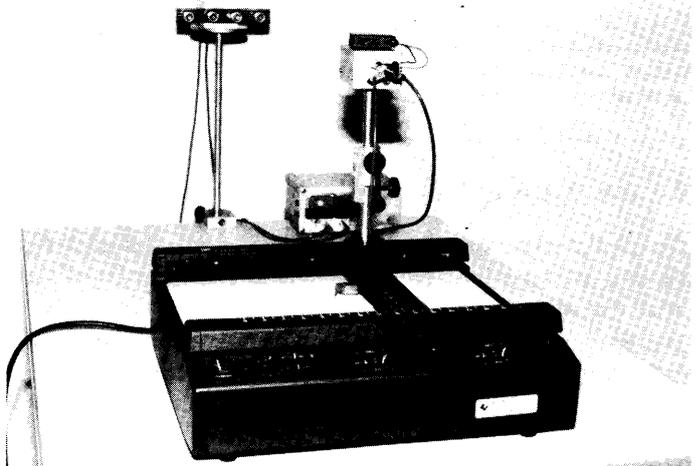


Abb. 5: Versuchsaufbau: Interferenzaufnahme mit dem Schreiber

Bei einem Abstand Sender—Empfänger $a = 60 \text{ cm}$ sind nach $d_k = a \cdot \tan \alpha_k$ das Maximum 0.-Ordnung und 1.-Ordnung $d_1 = 13,5 \text{ cm}$ voneinander entfernt, in guter Übereinstimmung mit den Schreiberaufnahmen (s. Abb. 6).

Die Schreiberaufnahmen zeigen deutlich, daß mit zunehmender Anzahl der Erreger die Interferenzmaxima schärfer werden. Die Anzahl der Nebenmaxima zwischen zwei Hauptmaxima beträgt $n - 2$, wobei n die Anzahl der Erreger ist.

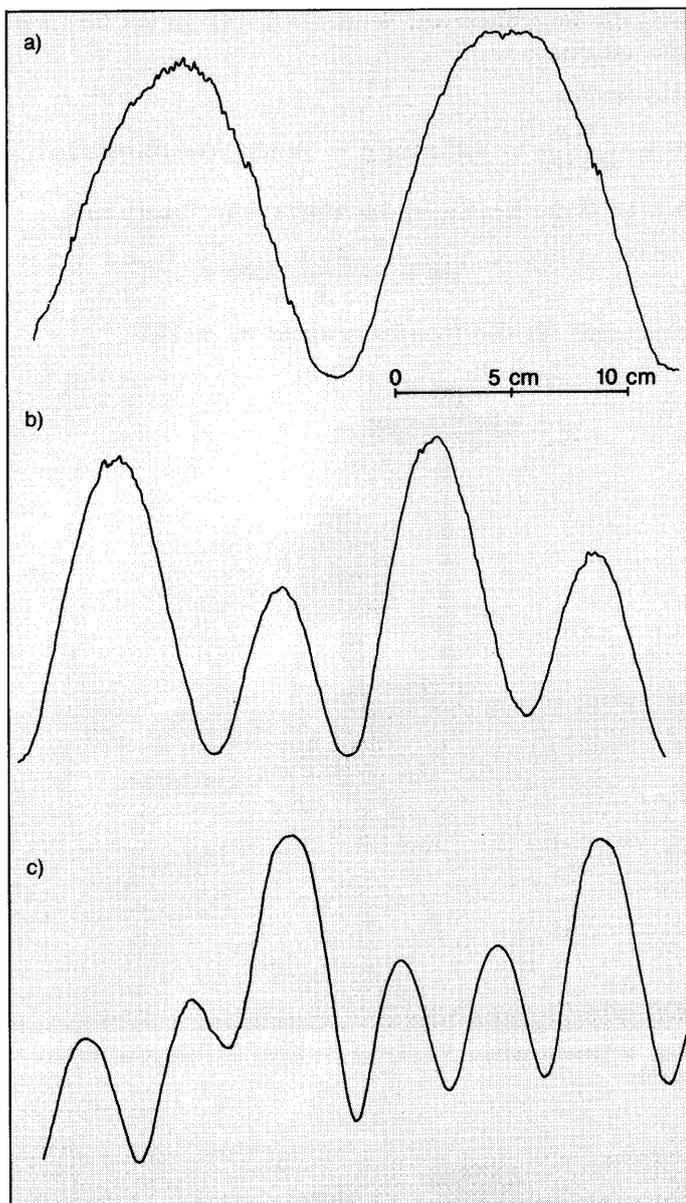


Abb. 6: Schreiberaufnahmen: $g = 38 \text{ mm}$; $a = 60 \text{ cm}$; a) Zwei Erreger in Phase; b) Drei Erreger in Phase; c) Vier Erreger in Phase

2.6 Der Doppler-Effekt [2, 4]

Da die Frequenz des Ultraschallsenders quarzstabilisiert ist, ist der Sender sehr gut für Versuche zum *Doppler*-Effekt auch bei kleinen Geschwindigkeiten geeignet.

Die Frequenzkonstanz ist bei konstanter Betriebsspannung eines Senders und bei konstanter Umgebungstemperatur (gleichbleibende Zimmertemperatur ist vollkommen ausreichend) besser als 10^{-6} (d. h. bei $40\,000 \text{ Hz}$ schwankt die Frequenz weniger als um $0,1 \text{ Hz}$ innerhalb z. B. eines Zeitraumes von einer Stunde). Nach der Gleichung

$$\Delta f = f \cdot \frac{v}{c} \quad (v \ll c)$$

können somit vernünftige Messungen zum *Doppler*-Effekt selbst bei Geschwindigkeiten kleiner als 1 cm/s durchgeführt werden. Die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges kann also einfach mit Stoppuhr und Maßstab gemessen werden.

Sender oder Empfänger werden beim Versuch auf einen Motorwagen montiert. Die *Doppler*-verschobene Frequenz wird mit einem Frequenzzähler gemessen und mit der Dop-

plerverschiebung, die sich aus der Geschwindigkeit v des Motorwagens ergibt, verglichen (s. Abb. 7).

Sender und Empfänger können auch nebeneinander fest aufgestellt werden und auf den Motorwagen, der eine reflektierende Wand trägt, ausgerichtet werden. Die Frequenzverschiebung wird dann doppelt so groß.

Meßbeispiele:

bewegter Sender ($f = 40\,016,0 \text{ Hz}$), ruhender Empfänger

f_{zu} in Hz	Δf in Hz	v in cm/s	$\Delta f = f \cdot \frac{v}{c}$ in Hz
40023,8	7,8	6,7	8,0
40020,8	4,8	4,1	4,9
40018,4	2,4	2,0	2,4

Die Geschwindigkeit des Motorwagens wurde mit Maßstab und Stoppuhr gemessen. Zwischen gemessener und gerechneter Frequenzverschiebung ergibt sich sehr gute Übereinstimmung.

Messungen bei wegbewegtem Sender bzw. bei bewegtem Empfänger oder bewegter, reflektierender Schallwand sind genauso leicht durchzuführen und liefern ebenfalls sehr gute Ergebnisse.

Die Geschwindigkeit des Motorwagens kann natürlich genauer mit einer Lichtschranke gemessen werden.

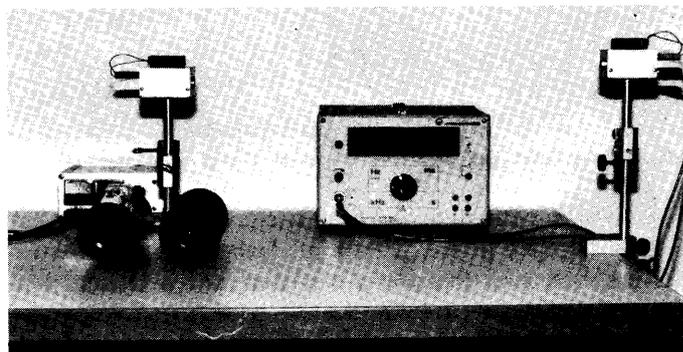


Abb. 7: Versuchsaufbau: Dopplereffekt mit Motorwagen aus einem Metallbaukasten

3 Beschreibung der Versuchsgerate

3.1 Der Ultraschallgenerator UG

Der Ultraschallgenerator UG besteht im wesentlichen aus zwei integrierten Schaltungen CD 4060 und CD 4049 in CMOS-Technik (Schaltplan Abb. 9).

Das IC CD 4060 beinhaltet einen Generator aus zwei Invertoren, der mit der Frequenz des angeschlossenen Quarzes schwingt. Es können Quarze bis ca. 6 MHz angeschlossen werden (wobei Quarze ab 3 MHz am preiswertesten sind).

Im IC ist außerdem ein 14-stufiger Binärteiler integriert, bei dem die Stufen 4 bis 14 (außer 11) an den Anschlußpins zugänglich sind, so daß die quarzstabilisierte Generatorfrequenz durch die entsprechenden Potenzen von 2 geteilt werden kann (s. Abb. 8).

Je nach angeschlossenen Quarz und gewähltem Teilungsfaktor können somit mit diesem IC sehr viele frequenzstabilisierte symmetrische Rechteckspannungen vom MHz- bis in den Hz-Bereich erzeugt werden.