

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.

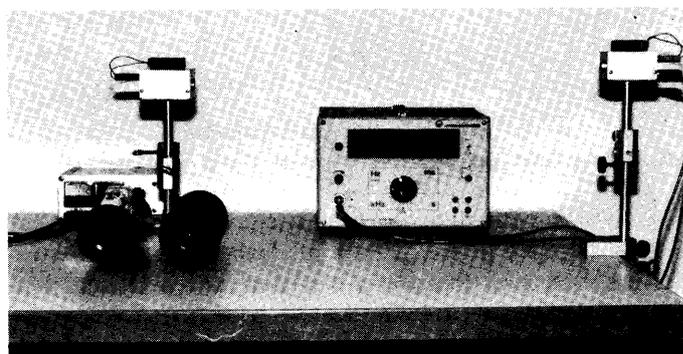


Abb. 7: Versuchsaufbau: Dopplereffekt mit Motorwagen aus einem Metallbaukasten

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 Invertiern, 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.

Beispiel:

Quarz

5,12 MHz Teiler 2^7 (Pin 6)

$f = 40\,000\text{ Hz}$

5,185 MHz Teiler 2^7

$f = 40\,500\text{ Hz}$

4,194 MHz Teiler 2^{14} (Pin 3)

$f = 256\text{ Hz}$

4,000 MHz Teiler 2^7

$f = 31\,250\text{ Hz}$

usw.

Bei konstanter Batteriespannung und Temperatur wird die Frequenz auf besser als 10^{-6} konstant gehalten.

Das IC CD 4060 ist mit wenig externen Widerständen und Kondensatoren beschaltet. Mit dem Kondensator C1 kann die Schwingfrequenz etwas verändert werden. Bei der Quarzfrequenz 5,12 MHz und Teiler 2^7 kann die Frequenz von 40 000 Hz am Pin 6 um ca. $\pm 10\text{ Hz}$ „gezogen“ werden, wenn $0 < C1 < 50\text{ pF}$ eingehalten wird (s. Abb. 9).

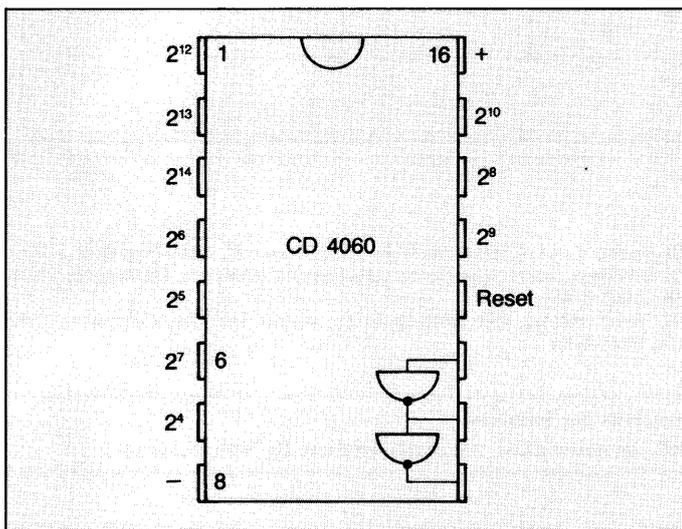


Abb. 8: Anschlußschema CD 4060 mit Teilerfaktoren

Ausgang ca. 30 V von Spitze zu Spitze gemessen).

Ein an den Ausgang A angeschlossener Piezo-Wandler schwingt bei der periodischen Anregung mit der symmetrischen Rechteckspannung sinusförmig. Mit dem Generator können bis ca. vier Piezo-Wandler parallel betrieben werden. (Um eine höhere Ausgangsleistung zu erreichen, können auch mehrere Treiber vom Typ CD 4049 parallel geschaltet werden. Dazu kann z. B. ein zweites IC CD 4049 auf das erste, das in die IC-Fassung gesteckt wurde, „huckepack“ aufgesetzt werden, wonach dann die entsprechenden Anschlußpins vorsichtig miteinander verlötet werden).

Die integrierten Schaltungen dürfen mit max. 16 V = betrieben werden. Zum (kurzzeitigen) Schutz vor Überspannung dienen die Zenerdiode Z 15 in Verbindung mit dem Widerstand 20 Ohm (auf diese beiden Bauteile kann ggf. auch verzichtet werden). Die Diode 1N4148 dient als Verpolungsschutz.

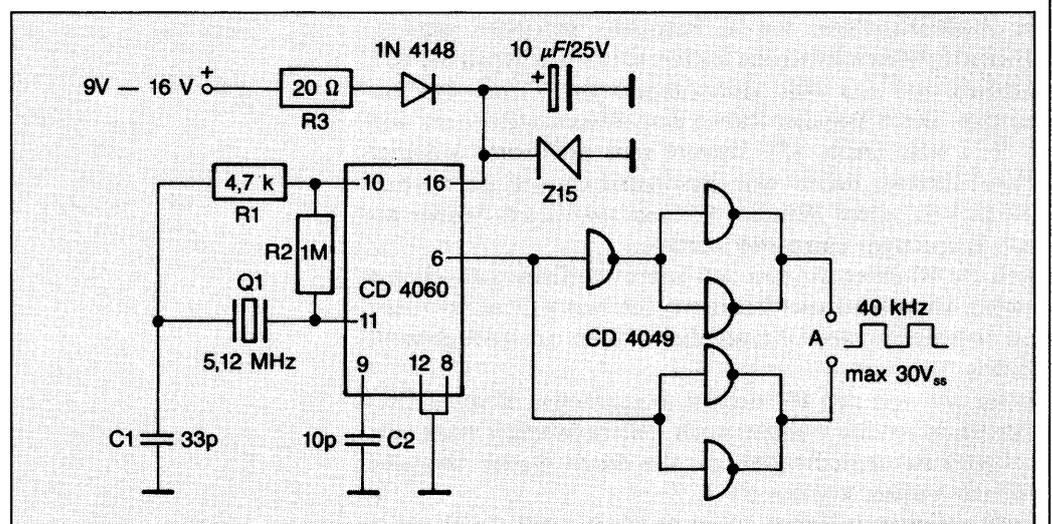
Da die integrierten Schaltungen in CMOS-Technik ausgeführt sind, ist der Strombedarf des Generators sehr gering, so daß er auch mit einer 9 V Blockbatterie betrieben werden kann.

3.2 Der Ultraschallempfänger UE

Es handelt sich um eine einfache (nicht-invertierende) Operationsverstärkerschaltung mit hohem Eingangswiderstand (ca. 100 k Ω). Der angeschlossene Ultraschall-Empfänger-Wandler wird somit kaum bedämpft (s. Abb. 10).

Die Verstärkung des UE kann mit dem Trimmer P1 zwischen ca. 10 und 1000 eingestellt werden. Der Verstärker hat einen Frequenzgang von ca. 500 Hz bis ca. 100 kHz (wobei die untere Grenzfrequenz durch Vergrößerung des Kondensators C2 abgesenkt werden kann). Der Verstärker kann also auch als empfindlicher Mikrophonverstärker eingesetzt werden, wobei der Piezo-Wandler als Mikrophon dienen kann.

Abb. 9: Schaltplan Ultraschallgenerator UG

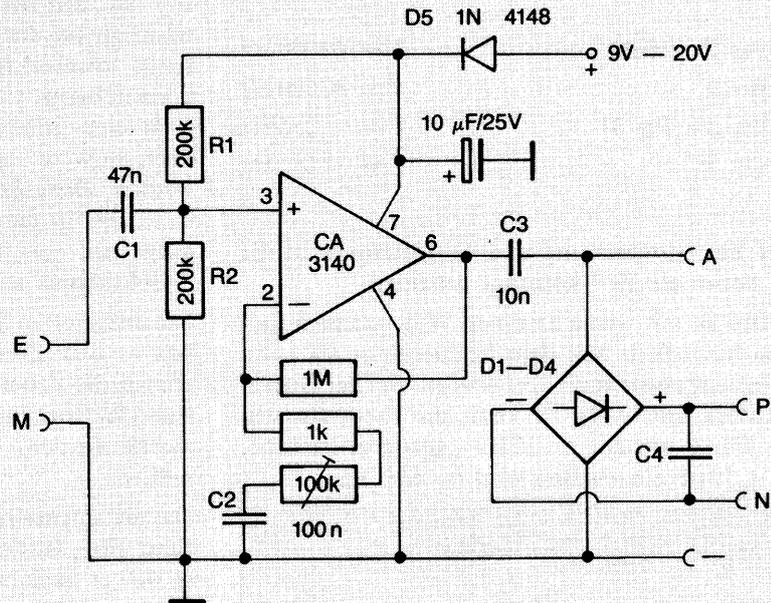


Das an den Pin 6 des IC CD 4060 angeschlossene IC CD 4049 besteht aus sechs Invertern, von denen vier als Treiber für den an den Ausgang des UG angeschlossenen Piezo-Ultraschall-Wandler dienen. Mit einem fünften Inverter wird der eine Ausgangsanschluß gegenphasig zum anderen angesteuert. Dadurch ergibt sich eine Verdoppelung der Ausgangsspannung. ($U_{ss} \approx 2 \cdot U_B$; d. h. bei einer Betriebsspannung von $U_b = 15\text{ V}$ beträgt die Rechteckspannung am

Am Ausgang A—M steht eine Wechsellspannung von einigen Volt zur Verfügung, so daß z. B. ein Wechsellspannungsmessinstrument (Bereich 3 V \sim) angeschlossen werden kann. Dabei ist allerdings zu beachten, daß die Empfindlichkeit von Vielfachinstrumenten im Ultraschallbereich stark abfallen kann.

Mit Hilfe eines Brückengleichrichters aus vier Germaniumdioden AA 112 wird die Wechsellspannung gleichgerichtet

Abb. 10: Schaltplan
Ultraschallempfänger UE



und mit dem Kondensator C4 geglättet. An den Gleichrichterausgang P—N kann ein Gleichspannungsmessinstrument (Bereich 3 V bis 10 V =) angeschlossen werden.

Die Diode 1 N4148 dient als Verpolungsschutz.

Der Strombedarf des UE ist sehr gering, so daß eine 9 V Batterie zum Betrieb ausreicht.

- [2] Rudolf Löhken; Dopplereffekt mit Ultraschall, PdN-Ph.; Heft 3/80
 [3] Hermann Zeuner; Interferenzversuche mit Schall und Ultraschall; PdN-Ph.; Heft 3/80
 [4] Heinz Mütting; Der Doppler-Effekt an der Luftkissenfahrbahn; PdN-Ph.; Heft 2/84

Anschrift des Verfassers:

StR. Bernhard Ehret, Metzenwiesenstraße 20, 7056 Weinstadt 1

3.3 Die Ultraschallwandler

An den Ultraschallgenerator und an den Ultraschallempfänger können alle erhältlichen Piezo-Wandler angeschlossen werden.

Bei Piezo-Wandlern, die in Resonanz betrieben werden, haben sich insbesondere die leichterhältlichen Typen SQ 40T (Sender) und SQ 40R (Empfänger) der Firma Stettner bewährt. Diese Wandler haben eine Resonanzfrequenz von 41 ± 1 kHz (Abb. 15). Weitere sehr preiswerte Wandler (USA-Fabrikat) haben eine Resonanzfrequenz im Bereich 30—33 kHz; diese Wandler können sowohl im Sender als auch Empfänger eingesetzt werden.

Auch die Wandler, die von den Lehrmittelfirmen angeboten werden, können angeschlossen werden, wenn Quarzfrequenz und Teilerfaktor des Ultraschallgenerators geeignet gewählt werden.

Neben den von den Herstellern angegebenen Resonanzfrequenzen haben die Wandler noch weitere (weniger stark ausgeprägte) Resonanzfrequenzen, die durch eigene Versuche ermittelt werden können.

Bei Interferenzversuchen ist zu beachten, daß die Wandler eine Richtungscharakteristik aufweisen, so daß die Intensität der Interferenzmaxima bei höherer Ordnung rasch abnimmt.

Neben Wandlern im Resonanzbereich können auch Experimente mit Piezo-Hochtönern durchgeführt werden.

Literatur

- [1] Heinz-Werner Oberholz; Experimente mit Ultraschall, PdN-Ph.; Heft 8/78