

# Copyright ©

---

Es gilt deutsches Urheberrecht.

Die Schrift darf zum eigenen Gebrauch kostenfrei heruntergeladen, konsumiert, gespeichert oder ausgedruckt, aber nicht im Internet bereitgestellt oder an Außenstehende weitergegeben werden ohne die schriftliche Einwilligung des Urheberrechtinhabers. Es ist nicht gestattet, Kopien oder gedruckte Fassungen der freien Onlineversion zu veräußern.

German copyright law applies.

The work or content may be downloaded, consumed, stored or printed for your own use but it may not be distributed via the internet or passed on to external parties without the formal permission of the copyright holders. It is prohibited to take money for copies or printed versions of the free online version.

Aus dem Institut für Angewandte Physik der Universität Kiel

## Ein hochgenaues Längenmeßgerät zur Absolutbestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Ultraschallwellen in Wasser

Von KLAUS UHLIG

**Zusammenfassung:** Es wird ein Verfahren beschrieben, wie aus der Messung von Frequenz und Wellenlänge von Schallwellen die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden kann. Die Messung der Wellenlänge geschieht mit Hilfe von optischen Interferometern, deren Aufbau und Konstruktion näher beschrieben wird.

**An instrument for high-precision-measurement of length for absolute determination of velocity of sound in water (Summary):** The paper describes a method for absolute determination of velocity of sound in water by measuring wavelength and frequency of acoustical sinewaves. The measurement of wave-length is done by optical interferometers. The arrangement of these interferometers and the construction of themselves are described in this paper.

Im Institut für Angewandte Physik an der Universität Kiel wurde ein Meßverfahren entwickelt, das es gestattet, in Labormessungen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Ultraschallwellen absolut mit hoher Genauigkeit in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern, wie Salzgehalt und Temperatur, zu messen. Für den akustischen Teil dieser jetzt entwickelten Meßapparatur wird ein akustischer Oszillator verwendet, der von KROEBEL (1965) beschrieben wird. Der Teil der Apparatur, der sich mit einer sehr genauen Längenmessung befaßt, soll in diesem Aufsatz näher beschrieben werden.

### Meßverfahren

In der Abb. 1 ist der Aufbau der Ultraschallstrecke dargestellt. Ein Ultraschallsender S und ein Ultraschallempfänger E sind über einen Verstärker V gekoppelt, der die Dämpfung der Wandler und der Schallstrecke ausgleicht. Ist die Amplitudenbedingung erfüllt, so stellt sich eine Frequenz ein, für die auch die Phasenbedingung erfüllt ist. Zwischen Sender und Empfänger befinden sich dann eine Anzahl  $m$  von Wellenlängen, wobei  $m$  wegen möglicher Phasenfehler der Wandler und des Verstärkers nicht ganzzahlig sein muß.

Nun sei zu einer bestimmten Länge  $s_0$  der Schallstrecke eine bestimmte Frequenz  $f_0$  und Wellenlänge  $\lambda_0$  gegeben. Ändert man nun die Länge der Schallstrecke von  $s_0$  auf  $s_0 + s_1$  in der Weise, daß nach der Längenänderung der Ultraschalloszillator auf der gleichen Frequenz  $f_0$  schwingt, so gilt  $s_1 = n \cdot \lambda_0$  mit  $n$  ganz, sofern man im Fernfeld mißt. Auf diese Weise werden die Phasenfehler der Wandler und des Verstärkers eliminiert. Diese Längenänderung  $s_1$ , die ein ganzes Vielfaches der Ultraschallwellenlänge beträgt, soll möglichst genau gemessen werden.

Die Schallgeschwindigkeit ergibt sich dann aus dem Produkt von Schwingfrequenz und Wellenlänge zu  $v = f \cdot \lambda$ . Da die Meßgenauigkeit bei der Frequenzmessung mittels elektronischer Zähler ohne Schwierigkeiten bei  $\Delta f/f = 10^{-6}$  liegt, ist die gleiche Genauigkeit auch für die Längenmessung angestrebt.

Als genaues Längennormal bietet sich hierfür die Wellenlänge von monochromatischen Licht an, das heute z. B. mit He-Ne-Lasern in einfacher und handlicher Weise erzeugt werden kann. Die Längenmessung geschieht mit Interferometern, die eine Auflösung von Bruchteilen der Lichtwellenlänge gestatten.

## Längenmessung

### Optischer und elektronischer Teil

Die Längenmessung wird mit Michelson-Interferometern vorgenommen. Der Aufbau eines solchen Interferometers ist in der Abb. 2 dargestellt. Das Licht der Lichtquelle L wird an der Teilerplatte T in zwei Teilstrahlen aufgespalten, die nach der Reflexion an den Spiegeln  $S_1$  und  $S_2$  wieder zusammengeführt werden und zur Überlagerung gelangen. Der Spiegel  $S_1$  ist relativ zu T feststehend, während  $S_2$  in Lichtstrahlrichtung verschoben werden kann. Verschiebt man  $S_2$  um eine Strecke  $\Delta l$ , so ändert sich der gegenseitige Gangunterschied der beiden Teilstrahlen um  $2 \cdot \Delta l \cdot n$  ( $n =$  Brechungsindex der Luft). Einen vollen Intensitätszyklus des Interferenzbildes erhält man für  $n = 1$  bei einer Verschiebung von  $l = \lambda/2$ .

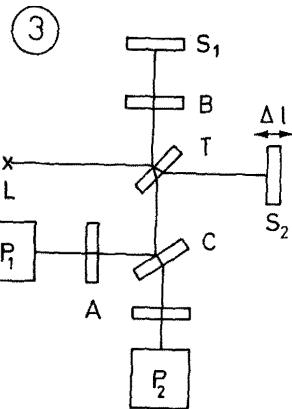
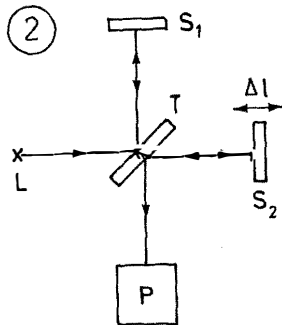
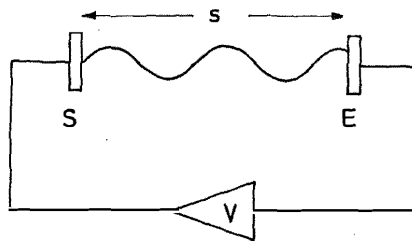
Es ergibt sich noch die Schwierigkeit, daß ein Photoempfänger bei einer Bewegung des Spiegels  $S_2$  die Hell-Dunkel-Perioden zwar wahrnehmen kann, aber nicht entscheiden kann, in welche Richtung  $S_2$  sich bewegt. Eine solche Richtungserkennung läßt sich erreichen durch ein optisches Drehfeld, das erzeugt werden kann durch zwei um  $\lambda/4$  verschobene Interferenzsysteme. Diese Methode benutzt die Eigenschaft, daß zwei Strahlen von linear polarisiertem Licht, deren Schwingungsrichtungen senkrecht aufeinander stehen, nicht miteinander interferieren. Der abgewandelte Aufbau sieht folgendermaßen aus (Abb. 3). Die Lichtquelle L liefert linear polarisiertes Licht einer definierten Polarisationsrichtung. Dieser eine Schwingungsvektor der elektrischen Feldstärke läßt sich zusammengesetzt denken aus zwei senkrecht aufeinander stehenden Schwingungsvektoren gleicher Amplitude, gleicher Frequenz und gleicher Phase. Diese zwei Lichtstrahlen, die geometrisch im gleichen Strahl verlaufen, erhalten bei zweimaligem Durchlaufen des  $\lambda/8$  Plättchens B (bei geeigneter Orientierung der Kristallachsen) einen gegenseitigen Gangunterschied von  $\lambda/4$ . Das Licht, das vom  $\lambda/8$ -Plättchen zur Teilerplatte T gelangt dieser Strahl zur Überlagerung mit dem nicht beeinflussten Meßstrahl vom Spiegel  $S_2$ . Es entstehen dann am Ausgang des Interferometers zwei Interferenzsysteme, die gegeneinander einen Gangunterschied von  $\lambda/4$  besitzen und deren elektrische Vektoren senkrecht aufeinander stehen. Diese werden bei C in zwei Teilstrahlen aufgespalten und in den Analysatoren A, deren Orientierungsrichtungen senkrecht aufeinander stehen und den Schwingungsrichtungen des Laserlichtes geeignet zugeordnet sind, aufgetrennt und zwei Photoempfänger  $P_1$  und  $P_2$  zugeführt, welche die optischen Signale in elektrische umwandeln. Diese Signale werden passend aufbereitet und dann einem elektronischen Zähler zugeführt, der vorwärts und rückwärts zählen kann (Abb. 4). Einem Zählschritt des Zählers entspricht eine Verschiebung von  $\lambda/8 \approx 80$  nm. Außer-

---

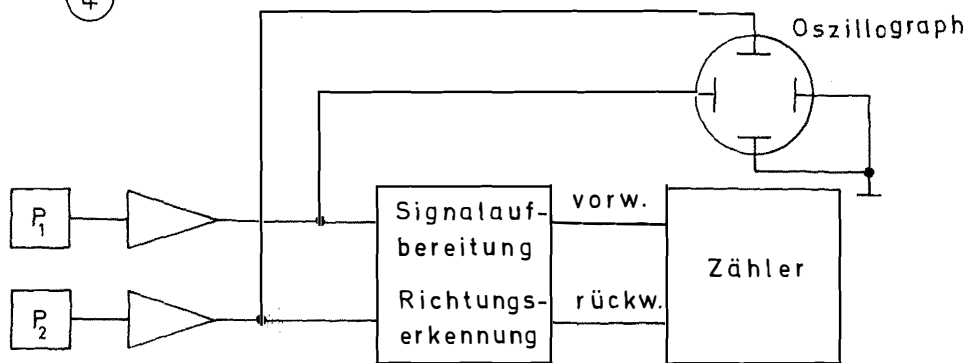
#### Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 1)

- Abb. 1: Schaltungsanordnung des akustischen Oszillators mit dem Schallsender S, dem Schallempfänger E und dem Verstärker V.  $s$  ist die Länge der Schallstrecke.
- Abb. 2: Schematischer Aufbau eines Michelson-Interferometers mit der Lichtquelle L, der Teilerplatte T, den beiden Spiegeln  $S_1$  und  $S_2$  und dem Photoempfänger P. Der Spiegel  $S_2$  ist in Lichtstrahlrichtung verschiebbar.
- Abb. 3: Abgewandelter Aufbau des Interferometers nach Abb. 2 zur Richtungserkennung. B ist ein  $\lambda/8$ -Plättchen (Glimmer) und A sind zwei Analysatoren. Die zwei Photoempfänger  $P_1$  und  $P_2$  liefern zwei um  $\lambda/4$  gegeneinander verschobene Ausgangssignale.
- Abb. 4: Blockschaltbild der elektronischen Anlage.

①

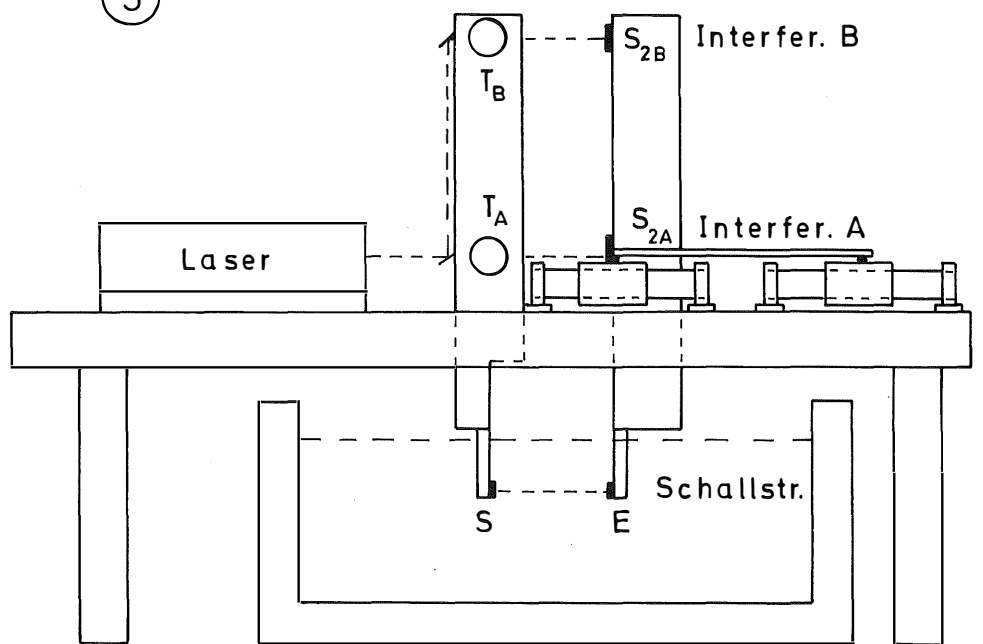


④



Tafel 1 (zu K. Uhlig)

5



Tafel 2 (zu K. Uhlig)

dem werden die von den beiden Photoempfängern gelieferten Signale an die X- und Y-Platten eines Oszillographen gelegt. Der Leuchtpunkt dieses Oszillographen beschreibt bei einer Verschiebung einen Kreis auf dem Schirm, wobei ein Umlauf des Leuchtpunktes einer Verschiebung von  $\lambda/2$  entspricht.

### Mechanischer Teil

Wie aus der Beschreibung des Meßverfahrens zu ersehen ist, soll eine Längenänderung in einer Ultraschallstrecke gemessen werden, die sich im Wasser befindet. An dieser Stelle läßt sich offensichtlich ein optisches Interferometer nicht anbringen, es muß über längere mechanische Verbindungen mit den Schallwandlern gekoppelt werden. Eine mechanische Parallelführung, die zur Verschiebung des einen Schallwandlers mit dem Spiegel  $S_2$  nötig ist, bewirkt aber einen recht großen Meßfehler: z. B. würde eine Neigungsänderung von  $1''$  an einem Hebel von 30 cm Länge eine Verschiebung von  $1,5 \mu\text{m}$  vortäuschen. Da ein solcher Fehler nicht zu beseitigen ist, wird er mit einem zweiten Interferometer mitgemessen. Die Längenänderung in der Schallstrecke läßt sich dann aus den gemessenen Längenänderungen an den Interferometern, deren Abstand voneinander und zur Schallstrecke nach dem Stahlsatz berechnen. Der Aufbau ist in der Zeichnung (Abb. 5) dargestellt. Auf einer stabilen Grundplatte ( $140 \times 60 \times 8 \text{ cm}$ ) befindet sich links der Laser. Der Turm in der Mitte trägt die Teilerplatten T für die beiden Interferometer. Der rechte Turm ist verschiebbar auf drei Kugelführungen und trägt die Spiegel  $S_2$ . Die Referenzstrahlen gehen senkrecht in die Zeichenebene hinein zu einem Turm, der die Spiegel  $S_1$  trägt. Die beiden ersten Türme sind durch die Grundplatte hindurch verlängert und tragen je eine Einhängenvorrichtung für Schallwandler, die in ein Wasserbecken eintauchen.

Der Entwurf des Längenmeßgerätes ging davon aus, eine maximale Verschiebung von 10 cm zu gewährleisten. Um über diesen Verschiebeweg einwandfreie Interferenzen zu erhalten, darf die Parallelführung höchstens einen Winkelfehler von wenigen Bogensekunden aufweisen. Diese hohe Genauigkeit in der Parallelführung wurde erreicht durch Verwendung von Kugelführungen, das sind Wälzlager für geradlinige Bewegung.

Die Auflösung des Gerätes beträgt einen Zählschritt des Zählers, was einer Verschiebung von  $\Delta l = \lambda/8 \approx 80 \text{ nm}$  entspricht. Bezogen auf eine Meßstrecke von 10 cm ergibt das eine Auflösung von  $\Delta l/l \approx 10^{-6}$ .

### Literaturverzeichnis

- KROEBEL, W. (1965): Ein Generator zur Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Wellen nach dem Frequenzverfahren. Zeitschrift f. Angewandte Physik 18, 275—285
- UHLIG, KL. (1970): Aufbau eines hochgenauen Längenmeßgerätes zur Absolutbestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Ultraschallwellen. Diplomarbeit am Institut für angewandte Physik an der Universität Kiel.

---

### Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 2):

Abb. 5: Mechanischer Aufbau des Längenmeßgerätes mit den beiden Interferometern A und B und der Schallstrecke, die in einen Wasserbehälter eintaucht. Der Turm mit den Spiegeln  $S_{1A}$  und  $S_{1B}$  befindet sich hinter dem Turm mit den Teilerplatten  $T_A$  und  $T_B$ .