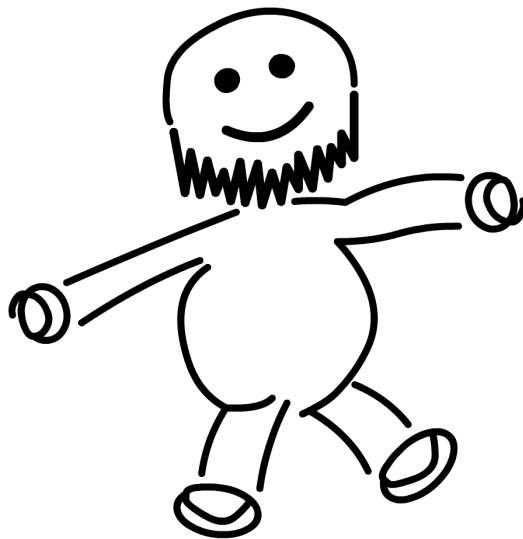


Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene

Versuch 233

Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten

Wintersemester 2006 / 2007



| | |
|--------------------|----------------------|
| Name: | Daniel Scholz |
| Mitarbeiter: | Hauke Rohmeyer |
| E-Mail: | physik@mehr-davon.de |
| Gruppe: | FK 56 |
| Assistent: | Daniel Schanz |
| Durchgeführt am: | 9. Januar 2007 |
| Protokoll abgeben: | 23. Januar 2007 |

Vorbereitung: ___ Versuch: ___ Protokoll: ___

Testiert: _____ Note: _____

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 3 |
| 2 | Theorie | 3 |
| 2.1 | Longitudinalwellen | 3 |
| 2.2 | Ultraschall | 4 |
| 2.3 | Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten | 5 |
| 2.4 | Beugung am Ultraschallgitter | 6 |
| 2.5 | Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Wasser | 7 |
| 3 | Versuchsdurchführung | 8 |
| 4 | Auswertung | 9 |
| 4.1 | Absolutmessungen | 9 |
| 4.2 | Verlaufsmessungen | 9 |
| 4.3 | Interpretation der Ergebnisse | 11 |
| 5 | Diskussion | 11 |
| 6 | Anhang | 13 |
| 6.1 | Ergebnisse der Verlaufsmessungen | 13 |

1 Einleitung

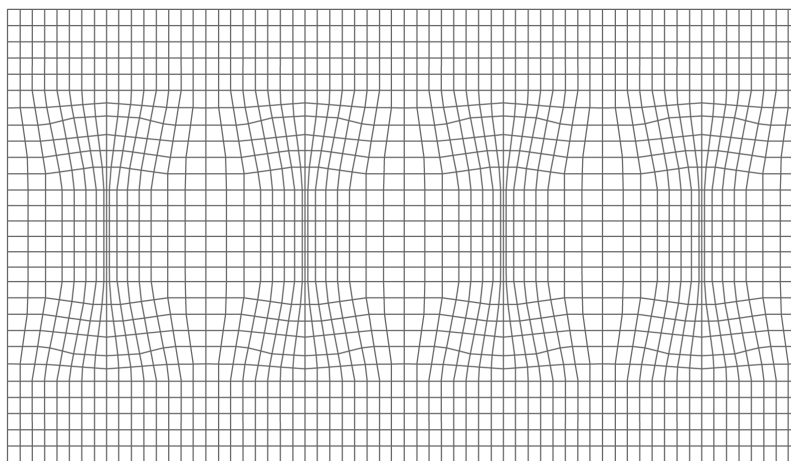
In diesem Versuch soll die Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Temperatur in Flüssigkeiten gemessen werden. Dazu wird in einem akustischen Resonator ein Stehwellenfeld aus Ultraschallwellen erzeugt. Durch Bestrahlung des Stehwellenfeldes mit Licht ergibt sich ein Streifenmuster, mit Hilfe dessen durch Abzählen der Streifen die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden kann.

Dieses Verfahren ist bereits im ersten Drittel des letzten Jahrhunderts entstanden. Es zeichnet sich dadurch aus, dass es besonders schnell durchzuführen ist und keinen komplizierten Versuchsaufbau benötigt.

2 Theorie

2.1 Longitudinalwellen

Akustische Wellen sind *Longitudinalwellen*. Bei einer Longitudinalwelle, wie auch zum Beispiel einer Druckwelle, schwingen die Atome in Ausbreitungsrichtung der Welle. Es handelt sich um eine Kompressionswelle, bei der durch Druckänderungen Kräfte entstehen, die eine Auslenkung der Atome in Ausbreitungsrichtung verursachen.



┌ Wellenlänge λ ─┐

Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Longitudinalwelle.

Longitudinalwellen treten sowohl in Festkörpern, wie auch in Gasen und Flüssigkeiten auf. Alle Atome in einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung haben gleiche Amplitude und Schwingungsrichtung. Die einzelnen Moleküle bewegen sich somit vor und zurück, nur der *Zustand* in der Welle,

also zum Beispiel die maximale Dichte, wandert nach rechts.

Allgemein gilt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle immer größer, als die der Transversalwelle ist. Den Effekt der Dichtefluktuationen werden wir uns in diesem Versuch zu nutze machen: In einem Resonator wird ein Stehwellenfeld erzeugt, so dass es Bereiche dichten und weniger dichten Mediums entstehen, welche stationär im Resonator sind. Das Medium ist im vorliegenden Fall eine Flüssigkeit (reines Wasser bzw. eine 20%ige Ethanol-Lösung). Die Schallgeschwindigkeit ist in Flüssigkeiten stark temperaturabhängig, genau dieses Phänomen soll untersucht werden.

2.2 Ultraschall

Mit *Ultraschall* bezeichnet man Schall oberhalb der menschlichen Hörschwelle, also Schallwellen mit einer Frequenzen zwischen 20 *kHz* und 1000 *MHz*. Töne noch höherer Frequenz werden als *Hyperschall* bezeichnet. Unterhalb des für Menschen hörbaren Schalls spricht man von *Infraschall*.

Ultraschallwellen sind elastische, harmonische und dreidimensional laufende Longitudinalwellen. Sie können sich daher wie bereits oben angesprochen in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern ausbreiten. Ultraschall ist für Menschen nicht hörbar, für eine Reihe von Tieren wie Delphine und einige Insektenarten jedoch schon. Fledermäuse können Ultraschall nicht nur hören, sondern auch erzeugen und sich anhand der Echos orientieren.

Erzeugung von Ultraschall

Im Versuch erzeugen wir Ultraschall über den *Piezo-Effekt*:

Durch die gerichtete Verformung einer Materialprobe bilden sich mikroskopische Dipole innerhalb der Elementarzellen. Die Aufsummierung über alle Elementarzellen des Kristalls führt zu einer makroskopisch messbaren elektrischen Spannung. Gerichtete Verformung bedeutet, dass der angelegte Druck nicht von allen Seiten auf die Probe wirkt, sondern beispielsweise nur von gegenüberliegenden Seiten aus.

Die Umkehrung dieses Piezo-Effektes machen wir uns zu nutze: Wird eine elektrische Spannung an den Kristall, auch *Piezo-Keramik* genannt, angelegt, so verformt sich dieser. Damit kann durch das Anlegen einer Wechselspannung eine mechanische Schwingung erzeugt werden, welche an die Wand eines Gefäßes abgegeben werden kann. Im Versuch wird dieses Gefäß eine mit Flüssigkeit gefüllte Küvette sein.

Quarz als Ultraschallsender

In unserem Versuch dient ein schwingender Quarz als Ultraschallsender. Die elektrische Anregung von Quarzen zu Schwingungen beschreibt der piezo-

elektrische Effekt. Nimmt man einen Kristall, der so geschnitten ist, dass zwei Flächen senkrecht auf die polare Achse stehen, und legt an diese eine Wechsellspannung an. Der Kristall wird so zu elastischen Schwingungen angeregt, die je nach anregender Frequenz unterschiedliche Amplituden aufweisen. Ein Maximum der Auslenkung erhält man, wenn die anregende Frequenz mit der Eigenfrequenz des Kristalls übereinstimmt. Für die Schwingungsrichtung ergeben sich je nach Anregung zwei Möglichkeiten. Entweder schwingt der Kristall in Richtung der polaren Achse, oder aber senkrecht zu dieser und auch zur optischen Achse. Mit Hilfe dieser Methode kann man bei Quarzstäben je nach Anregungsrichtung die folgenden Ultraschallfrequenzen erreichen:

$$\nu_1 = \frac{269000}{\text{Länge}} \text{ Hz} \quad \text{oder} \quad \nu_2 = \frac{283900}{\text{Dicke}} \text{ Hz}.$$

Im Versuch verwenden wir ein Quarzsender mit einer Frequenz von $\nu = 2,4 \text{ MHz}$.

2.3 Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten

Ganz allgemein gilt für die Ausbreitungsgeschwindigkeit c von Schallwellen in Flüssigkeiten die Beziehung

$$c = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}},$$

wobei ρ die Dichte und κ das **Kompressibilitätsmodul** der Flüssigkeit ist. Mit dem Volumen V und dem Druck p ist dabei das Kompressibilitätsmodul definiert durch

$$\frac{1}{\kappa} := - \frac{1}{\Delta p} \cdot \frac{\Delta V}{V}.$$

Wir erkennen also, dass die Schallgeschwindigkeit c nicht nur von der Dichte ρ , sondern auch von der Temperatur T abhängt. Dies liegt daran, dass mit der Temperatur neben der Dichte auch das Volumen V und damit das Kompressibilitätsmodul variiert.

Bei der Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Wasser mit Ultraschallinterferometern gibt es grundsätzlich zwei verschiedenen Vorgehensweisen:

Bei der ersten Möglichkeit bestimmt man die Anzahl an halben Wellenlängen $\lambda/2$ innerhalb einer bestimmten Schallstrecken durch Verschieben des Reflektors und wertet der Resonanzpunkte über die Rückwirkung auf dem schallerzeugendem Quarz mit Hilfe eines Oszillographen aus. Dabei werden die Resonanzen durch maximale Amplituden auf dem Schirm sichtbar. Dieses Prinzip untersuchen wir im folgenden Versuch 213: Messung von Phasen- und Gruppengeschwindigkeit mit Ultraschall.

In unserem Versuch wird jedoch auf eine elektrische Darstellung der Resonanzen verzichtet und eine optische Methode bevorzugt. Hierbei wird das *Phasengitter* mit parallelem Licht beleuchtet und so eine Abbildung des *Gitters* auf einem Schirm erzeugt. Das Bild der stehenden Ultraschallwelle zeigt sich dann auf dem Schirm als Streifenmuster, wobei jeder Streifen der Länge $\lambda/2$ entspricht (siehe hierzu auch Abschnitt 2.4). Wichtig hierbei ist, dass man den Schirm so einstellt, dass eine exakte Abbildung der Ultraschallwelle erreicht wird, denn dann kann man aus der Streifenanzahl auf der Meßstrecke direkt die Anzahl $\lambda/2$ auf der Schallstrecke ablesen, weil der Streifenabstand ja genau $\lambda/2$ entspricht.

Auf diesem Wege lässt sich also eine Absolutbestimmung der Wellenlänge bei einer genau bestimmten Temperatur durchführen. Hierbei ist es wichtig, dass man bei der Auszählung des Streifenbildes der Schallwelle sehr sorgfältig vorgeht und gleichzeitig eine Schallquelle mit exakt vorgegebener Frequenz zur Verfügung hat.

2.4 Beugung am Ultraschallgitter

Ist die Resonatorlänge L bzw. die Frequenz der Wellen und damit die Wellenlänge λ so eingestellt, dass die Resonatorlänge ein ganzzahliges Vielfaches N der halben Wellenlänge ist, erzeugt man eine Resonanz im Resonator. Die *Resonanzbedingung* lautet also

$$N \cdot \frac{\lambda}{2} = L. \quad (1)$$

Bestrahlen wir nun das ortsfeste Wellenmuster mit einem parallelen Lichtstrahl, so wird das Licht an den Orten verschiedener Dichte verschieden stark gebeugt. Der Grund dafür ist, dass dichtere Medien auch einen höheren Brechungsindex haben, welches sich auf die Intensitätsverteilung auswirkt. Dadurch entsteht hinter der Küvette ein Bild mit hellen und dunklen Streifen. Diesen Effekt, bei dem man das Bild direkt hinter der Küvette (also im Nahfeld) betrachtet, nennt man *Hiedemann-Effekt*. Hier werden die Maxima und Minima der Brechungsindexe beobachtet.

Weiterhin gibt es noch den *Debye-Sears-Effekt*, bei dem man das Beugungsbild im Fernfeld betrachtet. Hier werden also Maxima und Minima der Interferenz betrachtet und es entsteht ein Interferenzstreifenmuster.

Messung der Schallgeschwindigkeit mit Hilfe des Hiedemann-Effekts

Wir erhalten immer dann ein Stehwellenfeld bzw. Resonanz, wenn die Resonanzbedingung (1) erfüllt ist. Verändert man nun entweder die Resonatorlänge L oder die Wellenlänge λ , so verschwindet auch die Resonanz und damit das Stehwellenfeld bzw. damit das Streifenmuster. Eine Wellenlängenänderung kann man auf zwei verschiedene Arten bewirken:

Als ersten kann man die Frequenz ν ändern, so dass sich bei konstanter Schallgeschwindigkeit c die Wellenlänge λ ändern muss, da stets

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

gilt. Die zweite Möglichkeit ist, die Temperatur T zu ändern und damit die Schallgeschwindigkeit c . Genau dies werden wir im Versuch durchführen. Da die Frequenz durch den Ultraschallsender konstant gehalten wird, ergibt sich eine Wellenlängenänderung bei unterschiedlichen Temperaturen.

Aus der Resonanzbedingung (1) und der Beziehung $\lambda = c/\nu$ erhalten wir für die Schallgeschwindigkeit

$$c = \frac{2 \cdot \nu \cdot L}{N}. \quad (2)$$

Dabei ist wieder L die Resonatorlänge und N die Anzahl der gezählten Wellenmaxima im Interferenzstreifenmuster. Diese Formel dient zur Absolutmessung der Schallgeschwindigkeit.

2.5 Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Wasser

Wassermoleküle bilden Wasserstoffbrückenbindungen aus, so dass es zur Aggregatbildung von Wassermolekülen kommt. Die großen *Zwischenräume* zwischen den einzelnen Molekülen bewirken eine Erhöhung der Kompressibilität, wodurch die Schallgeschwindigkeit absinkt.

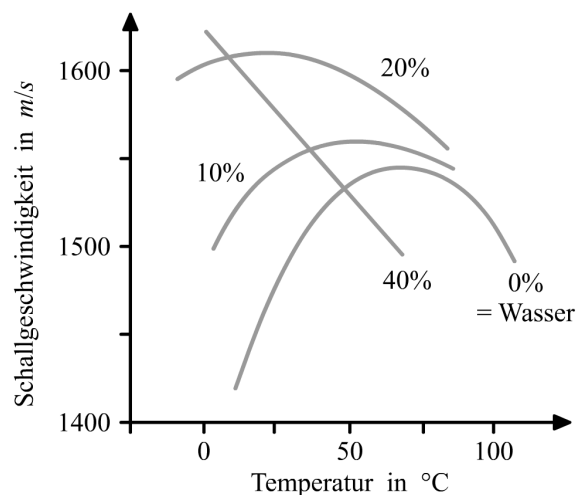


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Schallgeschwindigkeit in unterschiedlichen Ethanol-Wasser-Lösungen.

Mit wachsender Temperatur werden die Wasserstoffbrückenbindungen zunehmend zerstört, so dass die Kompressibilität abnimmt. Sind bei hinreichend großen Temperaturen annähernd alle Brückenbindungen zerstört, zeigt Wasser ein Verhalten, wie auch andere Flüssigkeiten und die Schallgeschwindigkeit nimmt mit der Temperatur linear ab.

In der im Versuche verwendeten 20%ige Ethanol-Wasser-Lösung sind bereits kaum Wasserstoffbrückenbindungen vorhanden, so dass die Schallgeschwindigkeit schon bei niedrigeren Temperaturen abnimmt und zunehmen linearer wird.

3 Versuchsdurchführung

Der schematische Versuchsaufbau ist Abbildung 3 zu entnehmen.

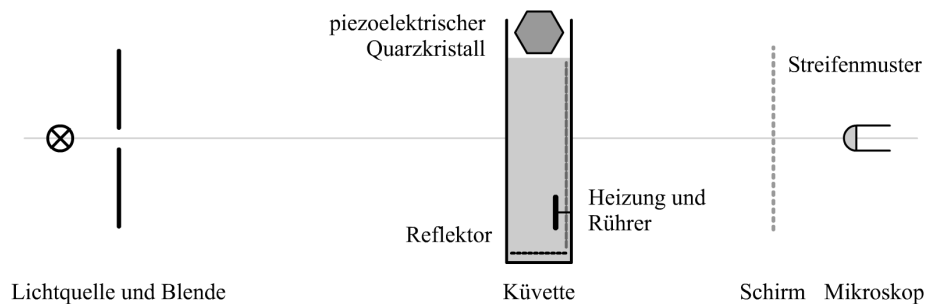


Abbildung 3: Schematischer Versuchsaufbau.

Es werden nacheinander die folgenden Schritte durchgeführt:

- (1) Die Flüssigkeit wird vorsichtig in die Küvette gefüllt. Es sollten sich nach Möglichkeit keine Luftblasen bilden. Diese würden die Messung stören, da das Licht an ihnen anders gebrochen wird. Da sich die in der Flüssigkeit gelösten Gase beim Erhitzen lösen wird aus diesem Grund auch entgastes Wasser für die Messungen benutzt.
- (2) Nachdem durch Justierung des Reflektors ein Stehwellenfeld erzeugt wurde, wird bei Zimmertemperatur die Anzahl der Streifen auf dem Schirm bei einer Frequenz von ca. $\nu = 2,4\text{MHz}$ ausgezählt. Die genaue Frequenz wird notiert.
- (3) Die Heizung wird eingeschaltet. Bei jedem erfolgten Resonanzwechsel, also bei einem erneuten scharfen Streifenmuster, wird die Temperatur notiert. Bei einer Temperatur von 80°C wird der Versuch abgebrochen.
- (4) Bei der Temperatur von ca. 80°C wird erneut die Absolutmessung der Schallgeschwindigkeit wie unter (1) durch Auszählung der Streifen wiederholt.

Der Versuch wird zunächst mit entgastem Wasser und dann noch einmal mit einer 20%igen Ethanol-Lösung durchgeführt.

4 Auswertung

4.1 Absolutmessungen

Wir können durch eine Absolutmessung der Streifenanzahl im Resonator nach Gleichung (2) die Schallgeschwindigkeit bestimmen. Es ist nun jedoch zu beachten, dass wir im Versuch nicht die Streifenanzahl auf der gesamten Länge des Resonators gemessen haben, sondern nur auf der kleineren Messstrecke der Länge l auf dem Schirm hinter der Küvette. Wir werden hier und im Folgenden immer Kleinbuchstaben verwenden, wenn wir über die Länge l oder der Streifenanzahl n auf dem Schirm sprechen und Großbuchstaben bei der Länge L des Resonators und der zugehörigen Streifenanzahl N .

Wir erhalten nun mit der Länge $l = 5 \text{ cm}$ der Schirmskala und der Gleichung

$$c = \frac{2 \cdot l \cdot \nu}{n} \quad (3)$$

die in Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse. Wir nehmen dabei einen Fehler der Frequenz von $\sigma_\nu = 2000 \text{ Hz}$ und einen Fehler der Streifenanzahl von $\sigma_n = 1$ an. Nach dem Gesetz der Fehlerfortpflanzung ergibt sich der zugehörige Fehler für die Schallgeschwindigkeit somit zu

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_\nu^2 \left(\frac{\partial c}{\partial \nu}\right)^2 + \sigma_n^2 \left(\frac{\partial c}{\partial n}\right)^2} = \sqrt{\sigma_\nu^2 \left(\frac{2 \cdot l}{n}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot l \cdot \nu}{n^2}\right)^2}.$$

| Stoff | Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] | ν [Hz] | n | c [m/s] |
|------------------|-----------------------------------|------------|-----|-------------------|
| Wasser | 21.53 ± 2 | 2403935 | 163 | 1474.8 ± 9.2 |
| | 62.4 ± 2 | 2405903 | 156 | 1542.3 ± 10.0 |
| Wasser + Ethanol | 29.3 ± 2 | 2405733 | 150 | 1604.6 ± 10.1 |
| | 77.2 ± 2 | 2406960 | 156 | 1542.9 ± 10.0 |

Tabelle 1: Ergebnisse der Absolutmessungen.

4.2 Verlaufsmessungen

Im Versuch haben wir nicht nur eine Absolutbestimmung durchgeführt, sondern sind auch an dem Verlauf der Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur interessiert. Hierzu haben wir zunächst eine Referenzmessung bei Zimmertemperatur T_0 durchgeführt (siehe 4.1) und notieren die Anzahl der auf dem Schirm sichtbaren Streifen n_0 . Dann haben wir die

Flüssigkeit in der Küvette erhitzt und zu jedem stattfindenen Resonanzwechsel die zugehörige Temperatur notiert. Bei der Δm -ten Resonanztemperatur T_m hat sich die Anzahl der halben Wellenlängen im Resonator der Länge L um Δm geändert. Das bedeutet, dass sich die Streifenzahl auf dem Schirm der Länge l um $\pm \Delta m \cdot l/L$ geändert hat. Damit sind auf dem Schirm bei der Temperatur T_m genau

$$n = n_0 \pm \Delta m \frac{l}{L}$$

Streifen zu sehen. Somit ergibt sich nach Gleichung (3) die Schallgeschwindigkeit c bei der Temperatur T_m zu

$$c_{T_m} = \frac{2 \cdot l \cdot \nu}{n_0 \pm \Delta m \frac{l}{L}}. \quad (4)$$

Um nun die Länge L der Küvette berechnen zu können, stellen wir Gleichung (4) nach L um und können mit Hilfe der zweiten Absolutmessung L berechnen, da wir wissen, wieviel Resonanzwechsel zwischen der ersten und der zweiten Absolutmessung stattgefunden haben. Es gilt also

$$L = \left| \frac{\Delta m \cdot c_{T_m} \cdot l}{2 \cdot \nu \cdot l - n_0 \cdot c_{T_m}} \right|.$$

Setzen wir die Werte aus Tabelle 1 und $\Delta m_1 = 20$ bzw. $\Delta m_2 = 15$ ein, so erhalten wir $L_1 = 14,29 \text{ cm}$ für erste Messreihe und $L_2 = 12,5 \text{ cm}$ für die zweite Messreihe. Diesen großen Unterschied können wir uns nicht erklären, da wir die Resonatorlänge zwischen den beiden Messreihen vermutlich nur im Millimeterbereich geändert haben.

Wir nehmen vorsichtshalber einen Fehler von $\sigma_L = 0,01 \text{ m}$ an. Mit den weiteren Fehlern $\sigma_\nu = 2000 \text{ Hz}$ und $\sigma_{n_0} = 1$ erhalten wir den Fehler für die temperaturabhängige Schallgeschwindigkeit durch das Gesetz der Fehlerfortpflanzung. Dieser berechnet sich durch

$$\sigma_{c_{T_m}} = \sqrt{\sigma_\nu^2 \left(\frac{\partial c_{T_m}}{\partial \nu} \right)^2 + \sigma_L^2 \left(\frac{\partial c_{T_m}}{\partial L} \right)^2 + \sigma_{n_0}^2 \left(\frac{\partial c_{T_m}}{\partial n_0} \right)^2}.$$

Unsere Messdaten und Ergebnisse sind in Tabelle 2 im Anhang zusammengefasst. In Abbildung 4 ist die Schallgeschwindigkeit in den beiden Flüssigkeiten in Abhängigkeit von der Temperatur graphisch aufgetragen. Wir gehen von einem Fehler von $\sigma_{T_m} = \pm 2^\circ \text{C}$ für die Temperatur aus, da der Temperaturregler nicht exakt ist und es sehr schwer war den genauen Zeitpunkt zu ermitteln an dem das Streifenmuster am schärfsten zu sehen war.

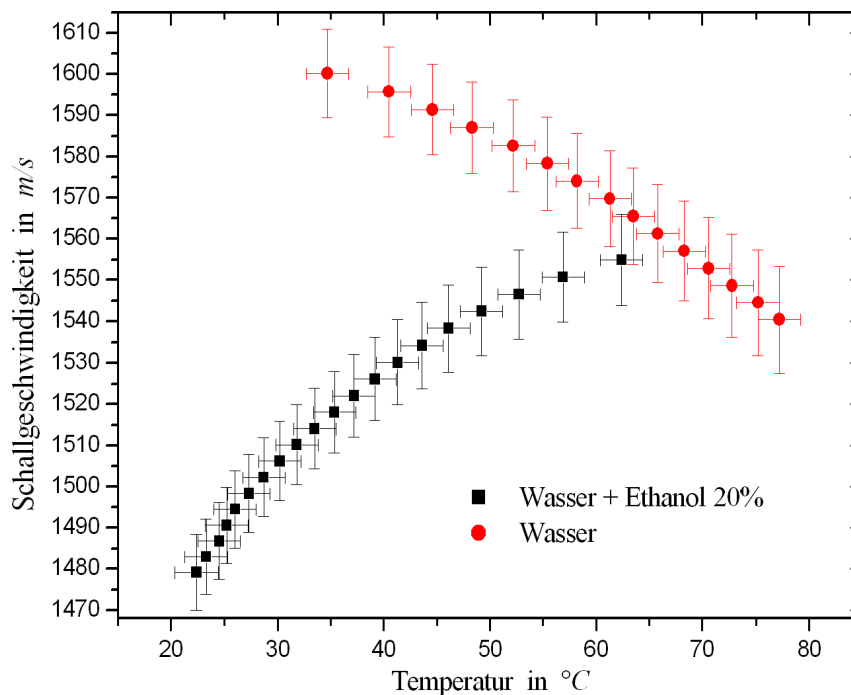


Abbildung 4: Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur.

4.3 Interpretation der Ergebnisse

Die Auftragung der Schallgeschwindigkeit in Wasser deckt sich mit den unter Abschnitt 2.5 beschriebenen Erwartungen. Im Bereich bis 70°C steigt die Schallgeschwindigkeit in reinem Wasser monoton mit der Temperatur an. Einen genauen Scheitelwert können wir nicht bestimmen, da wir nicht wissen, ob die Streifenanzahl bis zur zweiten Absolutmessung tatsächlich konstant abgenommen hat. Ist dies nicht der Fall, so sind die berechneten Werte für die Schallgeschwindigkeit nicht korrekt.

Bei der 20%igen Ethanol-Lösung scheint der Graph linear zu verlaufen. Lediglich bei niedrigen Temperaturen beobachtet man eine Abflachung der Kurve, die durch den Einfluss des Wassers hervorgerufen wird.

5 Diskussion

Zu diesem Versuch ist zu sagen, dass wir ihn als sehr interessant empfunden haben. Denn man bedient sich einfacher Hilfsmittel und misst damit auf unkompliziertem Wege komplizierte Zusammenhänge. Leider können wir zum Beispiel die Anomalie der Schallgeschwindigkeit im Wasser nur grob erklären und versuchen eine Begründung zu finden. Was die Fehlerquellen in diesem Experiment angeht, lässt sich als erste und wahrscheinlich größte nennen,

dass wir uns beim Auszählen der hellen und dunklen Streifen verzählt haben könnten, da es, wie schon erwähnt, bei der zweiten Absolutmessung schwierig war die Streifen auszuzählen. Dies lag daran, dass es Schwierigkeiten gab die Temperatur bei dieser Messung konstant zu halten. Zudem ist der Temperaturregler nicht genau, was jedoch für die Auswertung nicht sonderlich relevant ist.

Die ungenaue Längenbestimmung des Reflektors führt dazu, dass unsere Messergebnisse keinesfalls repräsentativ sind und nur beispielhaften Charakter haben. Trotz mehrmaliger Ergebniskontrolle konnten wir unseren Fehler nicht finden. Für eine genauere Längenbestimmung könnte man eventuell noch eine weitere Absolutmessung bei konstanter Temperatur aber unterschiedlichen Frequenzen durchführen.

Allerdings gibt es noch andere Faktoren, die die Messergebnisse verfälscht haben können. So nehmen wir an, dass sich die Kompressibilität vom Wasser in unserem Messbereich mit steigender Temperatur immer verringert hat, was aber noch nachzuweisen wäre. Hierzu müssten noch weitere Absolutmessungen bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt werden. Dies würde jedoch mit einem sehr hohen Arbeitsaufwand verbunden sein.

Verbesserungsvorschläge zum Versuchsaufbau

Der Stecker, der den Heizregler mit der Heizung verbindet, hat wahrscheinlich einen Wackelkontakt; dieser sollte behoben werden.

Eigene Kommentare

Auf Grund wiederholter Missverständnisse weisen wir darauf hin, dass die eigenen Kommentare nur für die Praktikanten bzw. für den Autor des Protokolls gedacht sind und vom korrigierenden Assistenten nach Möglichkeit überlesen werden sollten!

[Ja, das war dann Messung der Schallgeschwindigkeit in Wasser Teil 1. Recht kurzer und netter Versuch, nur war das ewige Steifen ansehen bzw. errahnen mal nur so semispannend und die dämliche Heizung funktionierte auch nicht so recht. Literaturmappe gabs nicht, war aber auch nicht schlimm, Vorgängerprotokolle waren sicherlich sowieso besser.]^{Daniel}

[Der Versuch war interessant, die zugrundeliegende Theorie gut verständlich. Leider konnte man bei hohen Temperaturen nicht mehr so genau sagen, wann das Streifenmuster scharf zu sehen war. Die Heizung sollte wirklich mal repariert werden, es war sehr schwer die Temperatur bei der zweiten Absolutmessung konstant zu halten.]^{Hauke}

6 Anhang

6.1 Ergebnisse der Verlaufsmessungen

| Wasser | | | Wasser+Ethanol (20%) | | |
|------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|
| Δm | T_m [$^{\circ}C$] | c_{T_m} | Δm | T_m [$^{\circ}C$] | c_{T_m} |
| 1 | 22.4 \pm 2 | 1478.6 \pm 9.2 | 1 | 34.7 \pm 2 | 1600.4 \pm 10.8 |
| 2 | 23.3 \pm 2 | 1481.8 \pm 9.2 | 2 | 40.5 \pm 2 | 1596.1 \pm 10.9 |
| 3 | 24.5 \pm 2 | 1485.0 \pm 9.3 | 3 | 44.6 \pm 2 | 1591.9 \pm 11.0 |
| 4 | 25.2 \pm 2 | 1488.2 \pm 9.4 | 4 | 48.3 \pm 2 | 1587.7 \pm 11.1 |
| 5 | 26.0 \pm 2 | 1491.4 \pm 9.5 | 5 | 52.2 \pm 2 | 1583.5 \pm 11.2 |
| 6 | 27.3 \pm 2 | 1494.7 \pm 9.6 | 6 | 55.4 \pm 2 | 1579.4 \pm 11.3 |
| 7 | 28.7 \pm 2 | 1497.9 \pm 9.7 | 7 | 58.2 \pm 2 | 1575.2 \pm 11.5 |
| 8 | 30.2 \pm 2 | 1501.2 \pm 9.8 | 8 | 61.3 \pm 2 | 1571.1 \pm 11.6 |
| 9 | 31.8 \pm 2 | 1504.5 \pm 9.9 | 9 | 63.5 \pm 2 | 1567.0 \pm 11.8 |
| 10 | 33.5 \pm 2 | 1507.8 \pm 10.1 | 10 | 65.8 \pm 2 | 1563.0 \pm 11.9 |
| 11 | 35.4 \pm 2 | 1511.1 \pm 10.2 | 11 | 68.3 \pm 2 | 1558.9 \pm 12.1 |
| 12 | 37.2 \pm 2 | 1514.4 \pm 10.4 | 12 | 70.6 \pm 2 | 1554.9 \pm 12.3 |
| 13 | 39.2 \pm 2 | 1517.8 \pm 10.6 | 13 | 72.8 \pm 2 | 1550.9 \pm 12.5 |
| 14 | 41.3 \pm 2 | 1521.1 \pm 10.8 | 14 | 75.2 \pm 2 | 1546.9 \pm 12.7 |
| 15 | 43.6 \pm 2 | 1524.5 \pm 11.0 | 15 | 77.2 \pm 2 | 1542.9 \pm 12.9 |
| 16 | 46.1 \pm 2 | 1527.9 \pm 11.2 | 16 | – | – |
| 17 | 49.2 \pm 2 | 1531.3 \pm 11.4 | 17 | – | – |
| 18 | 52.8 \pm 2 | 1534.7 \pm 11.6 | 18 | – | – |
| 19 | 56.9 \pm 2 | 1538.2 \pm 11.9 | 19 | – | – |
| 20 | 62.4 \pm 2 | 1541.6 \pm 12.1 | 20 | – | – |

Tabelle 2: Ergebnisse der Verlaufsmessungen.