

Versuchsanleitung 0 13 : DEBYE-SEARS-Effekt

1 Einleitung

Unter Ultraschall werden Dichtewellen in Gasen, Flüssigkeiten oder Festkörpern mit Frequenzen oberhalb des Bereichs des Hörschalls (16 Hz bis 20 kHz) verstanden.

Ultraschallwellen finden vielfältige Anwendungen in Medizin (z.B. Pränatale Diagnostik, Doppler - Ultraschall zur Bestimmung des Blutflusses) und Technik (z.B. Sonar, Material- und Rissprüfung, Ultraschallschweißen). Vorteilhaftes Eigenschaften von Ultraschallwellen resultieren aus ihren kurzen Wellenlängen und der daraus resultierenden Möglichkeit zur Bündelung und aus der Tatsache, dass bislang keine schädlichen Auswirkungen auf den menschlichen Organismus bekannt sind.

Ultraschallwellen werden technisch durch Schwingungen von Festkörpern erzeugt, wobei neben magnetostriktiven hauptsächlich piezoelektrische Ultraschallquellen Verwendung finden. Letztere basieren auf piezoelektrischen Kristallen, die auf das Anlegen einer elektrischen Spannung mit einer Längenänderung reagieren. Mittels einer hochfrequenten Wechselspannung lassen sich derartige Piezo-Kristalle (meist in Form von Scheiben) zu Eigenschwingungen anregen, die sich dann wiederum als Ultraschallwellen im umgebenden Medium fortsetzen.

Ultraschallwellen werden auch zur genauen Steuerung der Richtung eines Laserstrahls eingesetzt (Laserdrucker). Diese sog. Akusto-optische Deflektoren kommen ohne bewegliche Bauteile aus und erzielen damit wesentlich kürzere Schaltzeiten und längere Lebensdauern als mechanische Systeme. Für 2D-Scanning-Anwendungen sind Versionen verfügbar, welche die Ablenkung um zwei orthogonale Achsen in einem Kristall realisieren.

2 Grundlagen

Der Brechungsindex eines Materials ist keine Konstante sondern eine Funktion der Wellenlänge der sich in ihm ausbreitenden elektromagnetischen Strahlung und variiert darüber hinaus mit thermodynamischen Parametern wie Dichte und Temperatur. Bei der Ausbreitung von Schallwellen in transparenten Medien kommt es aufgrund der Dichteveränderungen zu einer periodischen Veränderung des Brechungsindex. Unabhängig davon, ob es sich bei der Welle um eine laufende oder eine stehende handelt, entsteht somit ein Beugungs- (genauer: Phasen-) gitter mit der Periode der Schallwellenlänge. Passiert monochromatisches Licht diesen Bereich senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Schallwellen, so kommt es aufgrund der unterschiedlichen Lichtgeschwindigkeiten im Medium zu periodischen Phasenunterschieden der austretenden Lichtstrahlen und somit auf der Rückseite zur Ausbildung eines Interferenzmusters. Die Beugung von Licht- an Ultraschallwellen wurde erstmals 1932 von DEBYE und SEARS beobachtet, weshalb dieser Effekt auch nach ihnen benannt wurde.

Für Phasengitter gelten die selben Bedingungen für das Auftreten von Intensitätsmaxima wie für Amplitudengitter:

$$\sin \phi_k = \frac{k \cdot \lambda_L}{d} \quad \text{mit } k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2 - 1)$$

wobei ϕ_k der Winkel ist, unter dem das k -te Intensitätsmaximum gegenüber der Richtung des einfallenden Lichtstrahls beobachtet wird. λ_L ist die Wellenlänge des Lichts (in der umgebenden Luft) und d die Gitterkonstante.

Entsprechend den vorigen Überlegungen ist dabei für die Gitterkonstante d , also dem Abstand zweier Brechungsindexmaxima, die Wellenlänge des Ultraschalls λ_{US} einzusetzen. Aus dieser einfachen Beziehung wird ersichtlich, dass der DEBYE-SEARS-Effekt eine komfortable Bestimmung der Ultraschallwellenlänge gestattet, wenn die Wellenlänge des Lichts bekannt ist. Ist zudem die Frequenz f_{US} des Ultraschalls bekannt, so kann über die Beziehung

$$f_{US} \cdot \lambda_{US} = c_{US} \quad (2 - 2)$$

die Schallgeschwindigkeit c_{US} im flüssigen Medium bestimmt werden.

3 Versuchsanordnung

Ein Spalt begrenzt die Strahlung der Lichtquelle auf einen engen Raumwinkel. Die durchtretenden Strahlen werden mittels Linse 1 parallelisiert und durchlaufen bis zur Linse 2 eine Halterung, in die wahlweise die Küvette mit dem Ultraschallgeber oder ein Transmissionsgitter eingebracht werden kann. Linse 2 fokussiert schließlich die Lichtstrahlen auf ein Okularmikrometer (Messokular).

Das optische System wird so justiert, dass ohne Ultraschallfeld der Spalt scharf auf den Okularmikrometer abgebildet wird. Wird der Spalt durch ein Objektmikrometer (Glasplatte mit aufgedampfter 100 μm -Teilung) ersetzt, so wird auch diese Teilung im Okularmikrometer scharf abgebildet und kann so zu dessen Kalibration verwendet werden (vgl. Abbildung 1).

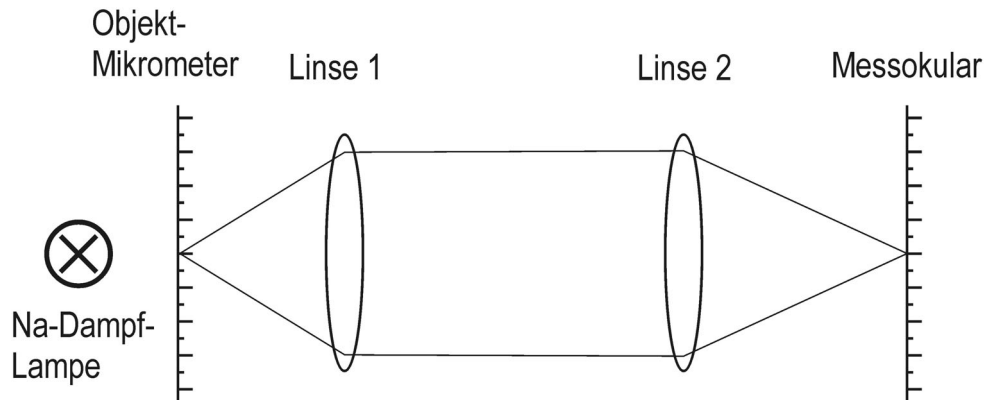


Abbildung 1: Versuchsaufbau zur Kalibration des Messokulars

Die Wellenlänge des verwendeten Lichts kann durch Einbringen des Transmissionsgitters in den Strahlengang zwischen den beiden Linsen und Ausmessen der Intensitätsmaxima des entstehenden Beugungsmusters bestimmt werden (vgl. Abbildung 2).

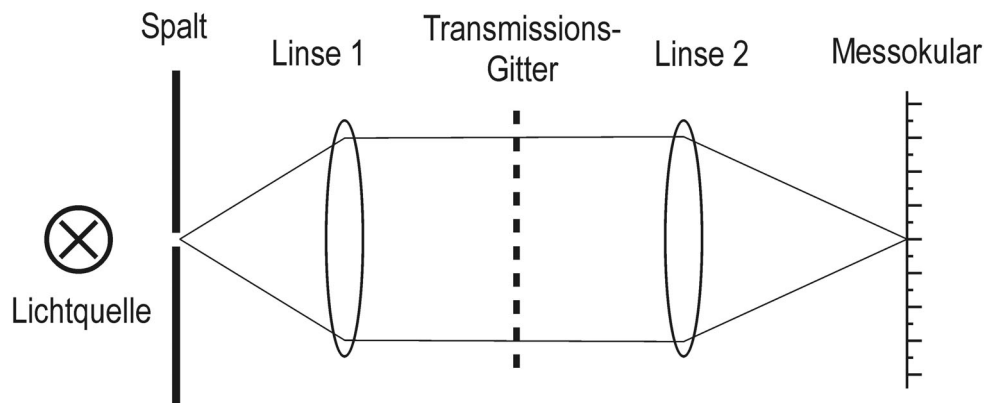


Abbildung 2: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Lichtwellenlänge

Zur Beobachtung der Beugungserscheinungen am durch den Ultraschall erzeugten Phasengitter ist es notwendig, die Küvette so in das parallele Strahlenbündel monochromatischen Lichts zwischen den beiden Linsen einzubringen, dass die Ausbreitungsrichtung des Ultraschalls senkrecht auf der des Lichts steht. Als Ultraschallgeber dient im vorliegenden Versuch ein Piezo-Schwingquarz, der sich in einer flüssigkeitsgefüllten Küvette befindet. Dieser Quarz wird mittels eines abstimmbaren Hochfrequenzsenders zu Schwingungen angeregt. Als Lichtquelle steht zum einen eine Natriumdampflampe, die im wesentlichen zwei eng benachbarte Linien mit den Wellenlängen 589,0 nm und 589,6 nm emittiert, zur Verfügung. Da die beiden Linien im vorliegenden Experiment nicht getrennt werden können, ist es für die Versuchsauswertung ausreichend von einer mittleren Wellenlänge von 589,3 nm auszugehen. Der entsprechende Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 a dargestellt. Zum anderen wird als Lichtquelle eine Laserdiode eingesetzt, die sichtbare Strahlung im roten Spektralbereich emittiert (siehe Abbildung 3 b).

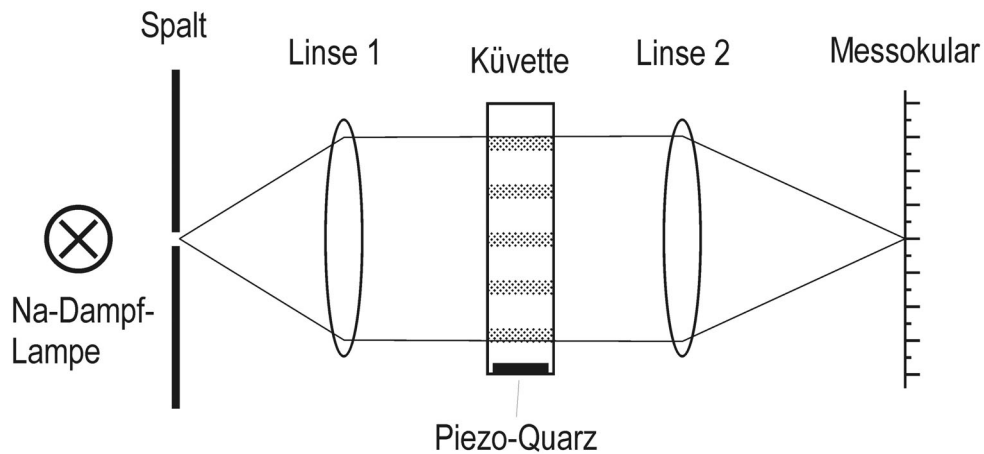


Abbildung 3 a: Versuchsaufbau zur Beobachtung des DEBYE-SEARS-Effekts mittels einer Natrium-Dampf-Lampe

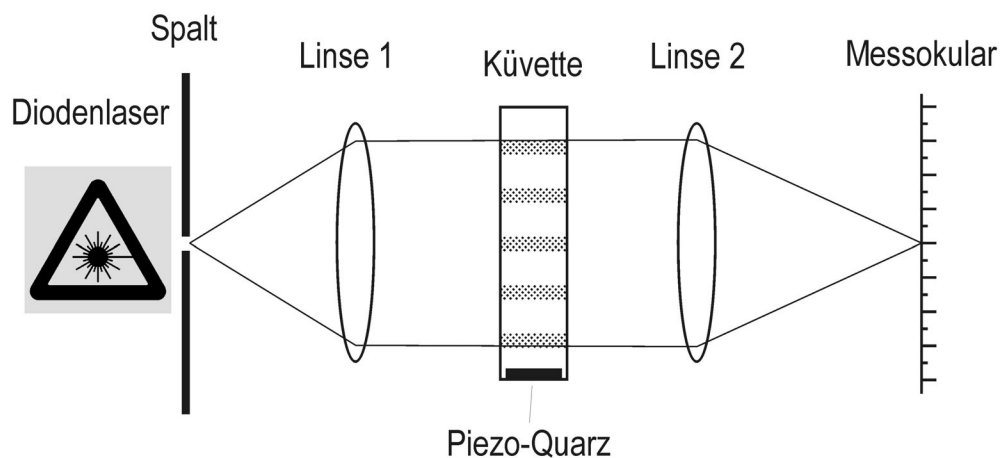


Abbildung 3 b: Versuchsaufbau zur Beobachtung des DEBYE-SEARS-Effekts mittels eines Diodenlasers

Ein Intensitätsmaximum des Beugungsmusters, das die Küvette unter einem Winkel ϕ gegenüber der Einfallsrichtung des Lichts verläßt wird vom optischen System so auf den Okularmikrometer abgebildet, dass die Richtung des Bildes vom Zentrum der Linse aus gesehen mit der optischen Achse wiederum den Winkel ϕ einschließt. Der Beugungswinkel des k -ten Intensitätsmaximums ϕ_k läßt sich somit aus seinem Seitenversatz gegenüber der optischen Achse im Okularmikrometer Δx_k und der Brennweite F_2 der Linse 2 mittels der einfachen Beziehung

$$\tan \phi_k = \frac{\Delta x_k}{F_2} \quad (3-1)$$

bestimmen.

In Verbindung mit Gleichung (2-1) und mit der Näherung $\tan \phi_k \approx \sin \phi_k$ ergibt sich somit für die Wellenlänge des Ultraschalls:

$$\lambda_{US} = \frac{k \cdot \lambda_L \cdot F_2}{\Delta x_k} \quad (3-2)$$

und schließlich mit Gleichung (2-2) für die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Ultraschalls

$$c_{US} = \frac{f_{US} \cdot k \cdot \lambda_L \cdot F_2}{\Delta x_k} \quad (3-3)$$

4 Aufgaben

In diesem Abschnitt werden die zu bearbeitenden Aufgaben nur grundsätzlich aufgeführt.
Genauere Hinweise zur Versuchsdurchführung befinden sich am Arbeitsplatz.

- 4.1 Mit der Natriumdampflampe als Lichtquelle justieren Sie die optische Anordnung so, dass die Küvette von einem parallelen Strahlenbündel durchsetzt wird.
- 4.2 Ermitteln Sie den Skalenwert des Messokulars mit Hilfe eines, in der Ebene der Küvette eingebrachten, Objektmikrometers!
- 4.3 Bestimmen Sie mit dieser Anordnung und mittels eines Gitters mit bekannter Gitterkonstante die Emissionswellenlängen der eingesetzten Lichtquellen nebst Fehler.
- 4.4 Ermitteln Sie drei Ultraschallfrequenzen im Bereich 2 ... 3 MHz, die zu einem ausgeprägten Beugungsmuster führen und beobachten Sie die Abhängigkeit der Anzahl der zu beobachtenden Intensitätsmaxima von der eingespeisten Ultraschallleistung!
Wichtig: Der HF-Sender darf nur eingeschaltet werden, wenn sich der Schwingquarz in Flüssigkeit befindet !
- 4.5 Vermessen Sie für die drei ermittelten Frequenzen die Lage jeweils eines Intensitätsmaximums und berechnen Sie daraus die Schallgeschwindigkeit im Medium nebst Fehler!

5 Fragen

- 5.1 Welchen Frequenzbereich umfasst der Hörschall ?
- 5.2 Wie lautet die Bedingung für das Auftreten eines Intensitätsmaximums hinter einem Amplitudengitter, das senkrecht mit monochromatischem Licht bestrahlt wird ?
- 5.3 Was versteht man unter dem Begriff "Phasengitter" ?
- 5.4 Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Frequenz und der Wellenlänge einer Welle ?
- 5.5 Skizzieren Sie die Versuchsanordnung zur Beobachtung des DEBYE-SEARS-Effekts !
- 5.6 Welche Größe ist als Gitterkonstante des Phasengitters der Ultraschallwelle anzusehen ? Begründen Sie Ihre Antwort !
- 5.7 Wie unterscheiden sich die Beugungsmuster von stehenden und laufenden Ultraschallwellen ? Begründung !
- 5.8 Berechnen Sie die Wellenlänge einer Ultraschallwelle in Wasser, wenn ihre Frequenz a) 20 kHz, b) 200 MHz beträgt. (Die Schallgeschwindigkeit in Wasser betrage 1483 m/s)
- 5.9 Warum kann es zu einer Beugung von Licht an einer Ultraschallwelle kommen ?
- 5.10 Geben Sie für die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mittels des DEBYE-SEARS-Effekts eine Formel zur Berechnung des absoluten Fehlers für den Fall an, dass alle eingehenden Größen fehlerbehaftet sind.

Literatur

- | | | |
|-----|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| [1] | Geschke, D. (Hrsg.): | Physikalisches Praktikum
Teubner-Verlag, Leipzig |
| [2] | Bergmann, L.; Schaefer, C.: | Physik, Bd. 3, Optik
de Gruyter, Berlin |
| [3] | Bergmann, L.: | Der Ultraschall und seine Anwendung in Wissenschaft und Technik
Hirzel, Stuttgart |