

Zeitschrift: Helvetica Physica Acta
Band: 10 (1937)
Heft: IV

Artikel: Über die Erzeugung ebener Schallwellen in Flüssigkeiten und über die Demonstration Fresnelscher Beugungerscheinungen an diesen Wellen
Autor: Bär, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-110748>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Über die Erzeugung ebener Schallwellen in Flüssigkeiten und über die Demonstration Fresnelscher Beugungerscheinungen an diesen Wellen

von R. Bär.

(18. V. 37.)

§ 1. Einleitung. — Vor einiger Zeit habe ich¹⁾ Versuche mitgeteilt, die zeigen, dass die zur Erzeugung von Ultraschallwellen in Flüssigkeiten gewöhnlich verwendeten Piezoquarze, welche entweder als kreisförmige Scheiben oder als rechteckige Quader geschliffen sind, keine ebenen Wellen aussenden. Dieses Verhalten der Quarze war beim Schwingen in Luft schon lange bekannt; bei den Ultraschallversuchen in Flüssigkeiten, insbesondere bei der Lichtbeugung am Ultraschall, war es aber merkwürdigerweise nie beobachtet worden. In jener Arbeit konnte nun gezeigt werden, dass die Quarze tatsächlich auch in Flüssigkeiten nicht als Kolbenmembrane schwingen. Bei der Lichtbeugung, bei der im allgemeinen ein parallel zur Schallwellenfront stehender beleuchteter Spalt als Lichtquelle dient, wird aber durch diese Auszeichnung einer Beobachtungsrichtung über die Abweichungen von der Planwelle weggemittelt. Durch Verwendung einer punktförmigen Lichtquelle wurden die Chladnifiguren der Piezoquarze sogleich nachweisbar und zwar geschah dies nach zwei Methoden. Erstens mit Hilfe der Beugungsspektren: Diese sind nicht so einfach, wie sie bei ebenen Schallwellen sein müssten, sondern haben eine kompliziertere Struktur vom Typus der von SCHAEFER und BERGMANN²⁾ an räumlichen Schallgittern in Flüssigkeiten erhaltenen. Zweitens mit Hilfe der Abbildung des Schallwellenfeldes: Diese Methode ist die weiterreichende, weil sie die Abstrahlung der Schallwelle längs der Berandung des Piezoquarzes im einzelnen zu beobachten gestattet und weil sie ferner jede Inhomogenität des Schallfeldes direkt aufzeigt. Um die fortschreitende Schallwelle sichtbar zu machen, ist hierbei entweder eine stroboskopische Beleuchtungseinrichtung notwendig, oder aber man muss eine Schlierenanordnung benutzen; dies bedeutet: man muss das nicht abgebeugte

¹⁾ R. BÄR, Helv. Phys. Acta **9**, 617 (1936).

²⁾ C. SCHAEFER und L. BERGMANN, Naturwiss. **22**, 686 (1934).

Licht wegblenden, sodass nur die Stellen des Gesichtsfeldes, die von Schallwellen überstrichen werden, eine Aufhellung zeigen. Diese letztere Anordnung wurde, weil sie die einfachere ist, allein benutzt. Unabhängig und fast gleichzeitig haben ausserdem noch HIEDEMANN und HOESCH¹⁾ und PARTHASARATHY²⁾ diese Versuchsanordnung beschrieben und, soweit die gleichen Versuche damit angestellt wurden, auch dieselben Resultate erhalten.

Was nun diese Versuchsresultate betrifft, so sollen in diesem Zusammenhange nur die beiden folgenden erwähnt werden: Erstens erwies sich die Methode als ein brauchbares und einfaches Hilfsmittel, um zu prüfen, wie weit ein bestimmter Quarz unter bestimmten Versuchsbedingungen imstande ist, Planwellen zu emittieren. Zweitens zeigte sich, dass bei den bisher allein untersuchten kreisförmig oder rechteckig geschliffenen Quarzplatten die Abweichungen von der Planwelle so gross sind, dass solche Quarze zu allen Versuchen, bei denen die ebene Welle eine wesentliche Voraussetzung bildet, nicht verwendet werden können. Nun hat bekanntlich STRAUBEL³⁾ gezeigt, dass man den Piezoquarzplatten eine Form der Berandung geben kann, bei der sie sehr angenähert wie Kolbenmembrane schwingen. Es schien daher von Interesse, eine derart geschliffene Quarzplatte auch noch nach der Lichtbeugungsmethode in einer Flüssigkeit auf ihre Schwingungsform zu prüfen. Im folgenden wird zuerst die hierzu verwendete Versuchsanordnung beschrieben (§ 2); die Versuche hatten tatsächlich das Ergebnis, dass die Platte in den Oberschwingungen mit grosser Annäherung Planwellen zu emittieren imstande ist (§ 3).

Es wurde schon bemerkt, dass eine Reihe von Ultraschallversuchen voraussichtlich nur mit Schallquellen, die ebene Wellen aussenden, einwandfrei durchgeführt werden können. Dazu gehören wohl alle die Schallfortpflanzung betreffenden Fragen, wie insbesondere die Schallbeugung, -brechung und -absorption. Nachdem sich gezeigt hatte, dass die zu den Versuchen des § 3 verwendete Quarzscheibe wahrscheinlich mit guter Näherung eine solche Schallquelle darstellte, schien es angebracht, eine weitere Prüfung der Platte noch dadurch vorzunehmen, dass untersucht wurde, ob die bei der Beugung ebener Schallwellen an einfachen Hindernissen auftretenden Fresnelschen Beugungerscheinungen sich mit diesen Wellen nachweisen lassen. Es zeigte sich, dass die Beugungerscheinungen tatsächlich sehr schön zu sehen waren. Natürlich können mit Hilfe der Lichtbeugung nur ebene Schall-

¹⁾ E. HIEDEMANN und K. H. HOESCH, ZS. f. Phys. **104**, 197 (1937).

²⁾ S. PARTHASARATHY, Proc. Ind. Acad. Sci. **4**, 555 (1936).

³⁾ H. STRAUBEL, ZS. f. Hochfrequenz. **38**, 14 (1932).

wellenfelder leicht untersucht werden, d. h. Schallfelder, die in Richtung einer Raumkoordinate konstant sind. In dieser Richtung, welche wir als z -Achse bezeichnen, muss dann das Licht durch die Schallwelle hindurchgehen. Aus demselben Grunde dürfen auch nur solche räumlichen Hindernisse, die eine von der z -Koordinate unabhängige Form haben, zur Schallbeugung verwendet werden. Untersucht wurde also die Beugung an einer geraden (in der z -Richtung laufenden) Kante einer Halbebene (§ 4), die Beugung an einem und an zwei Spalten (§ 5), und die Beugung an einem schmalen rechteckigen Schirm, wie ihn z. B. ein in der z -Richtung ausgespannter Draht darstellt (§ 6).

§ 2. Versuchsanordnung. — Die zu den Versuchen benutzte Piezoquarzscheibe stammte von der Firma Carl Zeiss in Jena. Sie hatte die Grösse 54×66 mm und die von STRAUBEL angegebene Form der Berandung: Länge des Scheibendurchmessers in jeder Richtung proportional der Wurzel aus dem Elastizitätsmodul dieser Richtung. Ihrer Dicke entsprach eine Grundschwingung von ca. 440 kHz. Zur Schwingungserzeugung wurde ein Gegenaktionsender benutzt mit zwei Philips TC⁰⁴/10-Röhren und 200 V Anodenspannung. Da sich die Schwingungsform der Quarzplatte als unbeeinflussbar erwies von der Art der Ankoppelung an den Sender (vgl. § 3), wurde meistens galvanisch gekoppelt, d. h. der Quarz lag parallel dem Kondensator des Anodenschwingungskreises. Zur Spannungszuführung waren dünne Stanniolstreifen am Rande auf die beiden vergoldeten Oberflächen der Quarzplatte aufgeklebt. Als Halterung des Quarzes wurde entweder ein Ebonitrahmen verwendet, der beidseitig längs der Berandung ca. 1 mm der Quarzoberfläche abdeckte, oder aber die Platte wurde in Richtung des 54-mm-Durchmessers zwischen Korkscheiben elastisch eingeklemmt, in welchem Falle auf beiden Seiten die ganze Oberfläche frei abstrahlen konnte. Die Flüssigkeit, in welcher der Ultraschall erzeugt wurde, war entweder Xylol oder, wenn die Schalldämpfung besonders gross sein sollte, leichtflüssiges Paraffinöl. Der Flüssigkeitstrog hatte 30 cm Länge, 7 cm Breite und 9 cm Höhe. Die Quarzscheibe stand gewöhnlich ungefähr in der Mitte des Troges mit dem 66-mm-Durchmesser vertikal und mit dem 54-mm-Durchmesser horizontal; die Schallemission erfolgte in Richtung der 30-cm-Kante des Troges. Bei den Versuchen in Xylol waren die beiden reflektierenden Wände des Troges, um das Auftreten stehender Schallwellen zu verhindern, mit mehrere Zentimeter dicken Kissen aus Steifleinen ausgepolstert; in Paraffinöl war diese Vorsichtsmaßregel wegen der grossen Dämpfung unnötig (vgl. aber § 3). Die

Durchstrahlung der Schallwelle mit Licht erfolgte in horizontaler Richtung, also parallel zum 54-mm-Durchmesser der Quarzplatte in wenigen Zentimetern Abstand von derselben. Der Querschnitt des Lichtstrahls war ein Kreis mit 2,5 cm Radius; es war also nicht möglich, den ganzen Querschnitt der Schallwelle gleichzeitig zu durchstrahlen. Daher wurde der Piezoquarz so justiert, dass das Licht möglichst durch die Mitte der Schallwelle hindurchging. Die optische Anordnung war die früher beschriebene, nur bei den Versuchen im Frequenzbereich der niedrigsten Eigenschwingungen bei ca. 440 und 1300 kHz war die Verwendung von Linsen mit grösserer Brennweite (70 bis 80 cm) notwendig. Ausser diesen beiden Eigenschwingungen wurden dann von den höheren noch die 11. bis 19., die 23. und die 25. (d. h. der Bereich von $5000 \div 11\,000$ kHz) mehr oder weniger eingehend untersucht. Bei den meisten Versuchen war die Schallemission so klein, dass nur die ersten und zweiten Ordnungen der Beugungsspektren mit merklicher Intensität auftraten, und nur mit Hilfe dieser beiden Ordnungen wurde das Vorhandensein der Chladnifiguren untersucht.

§ 3. Versuchsresultate.— Bei den höheren Eigenschwingungen wurde mit unserer Schlierenanordnung in Xylol tatsächlich eine fast vollkommen homogene Aufhellung des ganzen Gesichtsfeldes erhalten, was mit den früher untersuchten kreisförmigen und rechteckigen Quarzscheiben nie erreicht werden konnte. Dies beweist, dass die Straubelsche Quarzscheibe dann also wirklich sehr angenähert wie eine Kolbenmembran schwang. Fig. 1a stellt das Gesichtsfeld dar, wie es auf diese Weise bei der 15. Oberschwingung bei 6530 kHz erhalten wurde.

Wenn die Blenden der Schlierenanordnung nun aber derart verstellt wurden, dass nur noch ein einzelnes Beugungsspektrum in das Gesichtsfeld gelangen konnte, so zeigte sich allerdings, dass allein die ersten Ordnungen diese gleichmässige Aufhellung des Gesichtsfeldes hervorbrachten, während die (schwächeren) zweiten Ordnungen immer noch das Vorhandensein einer Chladnifigur erkennen liessen. Fig. 1b gibt das Gesichtsfeld wieder, das unter denselben Versuchsbedingungen mit einem Beugungsspektrum zweiter Ordnung erhalten wurde. Dieser Versuch zeigt, dass die zweite Ordnung (und wahrscheinlich umso mehr jede höhere Ordnung) ein empfindlicheres Reagens auf Chladnifiguren des Piezoquarzes darstellt, und dass also auch die nach STRAUBEL geschliffenen Platten noch keine exakten Planwellen aussenden (worauf übrigens von STRAUBEL selbst a. a. O. hingewiesen wurde). Auch in der ersten Ordnung war natürlich das Vorhandensein der

Chladnifigur sichtbar, wenn der Quarz zu einer erzwungenen Schwingung weit ausserhalb des Resonanzmaximums angeregt wurde, sodass er keine reine Dickenschwingung mehr ausführen konnte. Dies zeigt Fig. 1c, die unter denselben Versuchsbedingungen wie 1a, aber mit der Frequenz 6420 kHz aufgenommen ist.

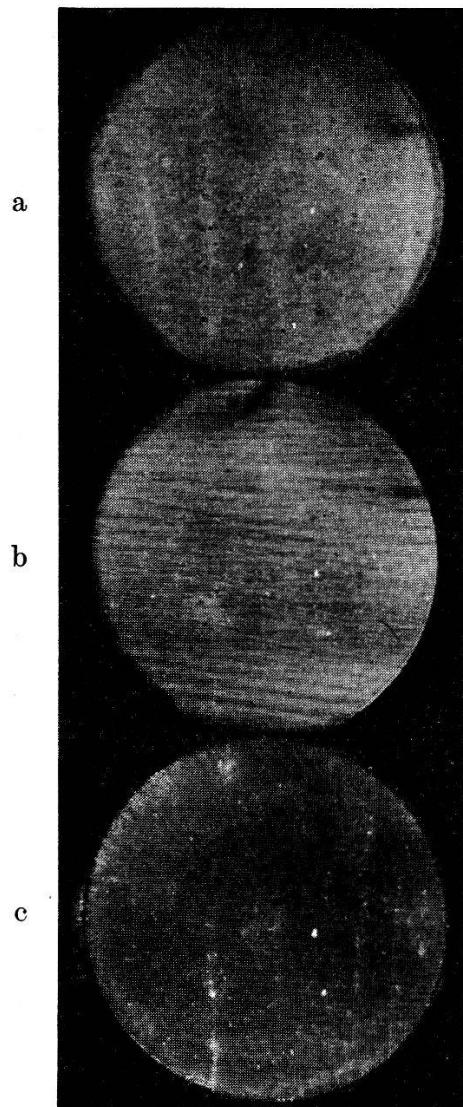


Fig. 1.

Schlierenaufnahme des Gesichtsfeldes beim Durchgang der von einer Straubelschen Piezoquarzscheibe erzeugten Ultraschallwellen in Xylol; Scheibe schwingt in 15. Oberschwingung.

- a) Schallfrequenz = 6530 kHz; Aufnahme erfolgt mit einem 1. und einem 2. Beugungsspektrum.
- b) Gleiche Frequenz wie a), aber mit 2. Beugungsspektrum allein.
- c) Beugungsspektren wie a), aber Verstimmung des Piezoquarzes auf 6420 kHz.

Natürlich wurden nun noch eine Reihe von Versuchen ange stellt, um die Schwingung der Quarzplatte so zu verbessern, dass auch in der zweiten Ordnung keine Chladnifiguren mehr sichtbar werden; sie blieben alle erfolglos. Insbesondere waren keine Ver-

besserungen zu erzielen durch sehr lose induktive Kopplung des Quarzes an den Sender; ferner auch nicht dadurch, dass die Ultraschallwellen in Paraffinöl erzeugt wurden, in welcher Flüssigkeit die Schalldämpfung so gross ist, dass die Gefässwände sicher keine störende Rückwirkung auf den Quarz ausüben konnten.

Was schliesslich noch die beiden niedrigsten Eigenschwingungen der Platte bei 440 und bei 1300 kHz betrifft, so war bei diesen Frequenzen auch mit der ersten Ordnung der Beugungsspektren kein homogenes Gesichtsfeld zu erhalten. Den Versuchen kann aber kein grosses Gewicht beigelegt werden, da bei diesen Frequenzen durch keine Art der Auspolsterung des Schalltropes und auch nicht durch Verwendung von Paraffinöl als Ultraschallflüssigkeit die Ausbildung stehender Wellen verhindert werden konnte, sodass also die störende Rückwirkung der Gefässwände auf die Quarzschwingung unvermeidbar war.

§ 4. Beugung an der geraden Kante eines ebenen Schirmes. — Wir besprechen zuerst diese einfachste Beugungerscheinung, bei der aber schon alle experimentellen Schwierigkeiten klar werden, die sich den Bemühungen, übersichtliche Versuchsbedingungen zu realisieren, hier in den Weg stellen. Es soll also eine ebene, in der $+y$ -Richtung fortschreitende Schallwelle an der Stelle $y = 0$ auf einen Schirm senkrecht auftreffen, der die halbe xz -Ebene, nämlich den Teil von $x = 0$ bis $+\infty$ einnimmt. Dann ist die z -Achse (parallel zu welcher mit Licht durchstrahlt wird) die beugende Kante. Die resultierende Beugungerscheinung lässt sich bekanntlich darstellen durch die Annahme, dass von dieser Kante eine Zylinderwelle ausgeht, die sich der einfallenden Welle überlagert. Da man ein ebenes, von der z -Koordinate unabhängiges Wellenfeld erhält, braucht nur die Erscheinung in der xy -Ebene behandelt zu werden. Es ergeben sich in den Bereichen, die von der ebenen und von der Zylinderwelle überstrichen werden, als Ort der Maxima und Minima bekanntlich konfokale Parabeln, deren Brennpunkt der Koordinaten-Nullpunkt und deren Achse die y -Achse ist. Sei Λ = Schallwellenlänge und φ = Phasendifferenz zwischen ebener Welle und Zylinderwelle, so lautet die Gleichung dieser Parabeln

$$x^2 = 2(n + \varphi) \Lambda \cdot [y + (n + \varphi) \Lambda/2]. \quad (1)$$

Obgleich solche Parabeln an jedem geradlinigen Rand eines in den Schallstrahl gebrachten Hindernisses entstehen und daher auf mehreren der folgenden Bilder (z. B. Figg. 4a und b) ungewollt kleinere Parabelstücke zu sehen sind, so bereitet die Demonstration eines Bereiches, in dem eine grössere Anzahl langer ungestörter

Parabelbögen sichtbar sind, doch gewisse Schwierigkeiten. Dies röhrt daher, dass es beim Schall wahrscheinlich noch schwieriger ist als in der Optik, sauber definierte Randbedingungen herzustellen. Die beiden extremen Fälle: vollkommene Reflexion oder vollkommene Absorption z. B. lassen sich mit Hilfe eines dünnen, in den Schallstrahlengang gebrachten Schirmes wohl überhaupt nicht realisieren. Der Schirm muss wie in der Optik, damit er merklich reflektiert oder absorbiert, eine gewisse Dicke haben. Dann ist aber die Berandung des Schirmes keine mathematische Gerade mehr, sondern man muss der Kante noch ein bestimmtes, willkürliches Profil geben. Dies hat zur Folge, dass die Beugungerscheinung von der Form dieses Profils (und meist auch noch vom Schirmmaterial) abhängig wird, und zwar in einer Weise, dass im allgemeinen keine ungestörten Parabeln mehr entstehen.

Es sollen nur die Bilder der Beugung an einem besonders dicken und an einem besonders dünnen Schirm wiedergegeben werden. Die Versuchsanordnung war die im § 2 beschriebene; wo nichts anderes bemerkt ist, wurden durch Blenden die Beugungsspektren des einen Vorzeichens sowie das unabgebeugte Licht weggeblendet. Fig. 2a stellt in ungefähr natürlicher Grösse die Beugung an der Kante eines 3,7 mm dicken Schirms aus Messingblech bei 6540 kHz dar. Das Blech wurde von oben in den Weg des von links kommenden Schallstrahls gestellt. Die beugende Kante hatte die Form eines ebenen Streifens von ca. 4 mm Breite, der mit der Einfallrichtung der Schallwellen einen Winkel von ca. 12° bildete. In diesem Falle waren also eigentlich zwei beugende Kanten und dazwischen ein Stück einer den Schall reflektierenden Ebene vorhanden. Die Parabeln sind, an der hinteren Kante des Messingblechs ansetzend, in dem Winkelbereich von 0 bis ca. 30° gut ausgebildet; für grössere Beugungswinkel werden sie aber in schmalen Winkelbereichen periodisch unsichtbar und erscheinen dann wieder mit merklicher Phasenverschiebung. Diese Störungen sind sicher durch das Profil der beugenden Kante verursacht; sie können nämlich, wie das Bild der Fig. 2b zeigt, zum Verschwinden gebracht werden. Diese Aufnahme stellt die Beugung an der Kante eines 0,1 mm dicken Kupferblechs bei derselben Schallfrequenz dar. Hier ist das Profil mit viel besserer Annäherung eine mathematische Gerade. Tatsächlich sind die Parabeln vollkommen störungsfrei ausgebildet, aber sie sind leider nur im falschen Quadranten, nämlich im Schallschatten, gut sichtbar. Die Erklärung dafür, dass im Schallschatten ebenfalls Parabeln auftreten, ist natürlich die, dass das dünne Kupferblech noch merklich schall-durchlässig ist. Dadurch wird gleichzeitig die Intensität der im

richtigen Quadranten auftretenden Parabeln herabgesetzt. Warum dieselben hier aber fast ganz unsichtbar sind, muss dahingestellt bleiben; wahrscheinlich handelt es sich nur um eine Intensitätsfrage und nicht um eine prinzipielle Schwierigkeit. Da der Zusammenhang zwischen der im Bild allein sichtbaren Intensität des abgebeugten Lichts und der Schall-Intensität nur qualitativ bekannt ist, dürfen übrigens aus unsren Aufnahmen wohl überhaupt kaum Rückschlüsse auf die Schallintensität gemacht werden.

Natürlich kann man prinzipiell durch Vermessung der Parabeln (wie überhaupt jeder Beugungerscheinung) die Schallwellenlänge λ und die Phase φ bestimmen. Erstes ist ohne Interesse, weil λ sehr genau bekannt ist, und zur Berechnung von φ sind die vorliegenden Versuche nicht genau genug.

§ 5. Beugung an einem und an zwei Spalten. — Die an einem Spalt auftretende Beugungerscheinung wurde zuerst von GROSSMANN und HIEDEMANN¹⁾ untersucht und mit der Theorie verglichen. Weitere, noch unveröffentlichte Versuche haben HIEDEMANN und ASBACH angestellt; HIEDEMANN²⁾ hat schon kurz über dieselben berichtet und auch zwei schöne Beugungsbilder dieser Arbeit reproduziert. Diese Bilder, bei denen das Verhältnis a/λ (a = Spaltbreite) ungefähr = 5 war, sehen etwas anders aus als die im Folgenden wiedergegebenen, da zur Sichtbarmachung des Wellenfeldes statt der Schlierenanordnung eine stroboskopische Beleuchtungseinrichtung verwendet wurde.

Das Verhältnis a/λ = ungefähr 5 erweist sich zu den Versuchen als am besten geeignet. Wenn man dieses Verhältnis nämlich wesentlich kleiner macht, ist in dem hier benutzten Frequenzbereich der Spalt so schmal, dass die durch denselben austretende Schallenergie sehr klein und die Beugungerscheinung daher überaus lichtschwach wird. Für sehr viel grössere a/λ hat man dagegen nur noch die von den beiden Spalträndern erzeugten, sich überlagernden Parabelscharen. Diesem letzteren Fall nähert sich die Aufnahme der Fig. 3, die in ca. zweifacher Vergrösserung die Beugung an einem 3 mm breiten Spalt bei der Frequenz 6540 kHz darstellt (a/λ = ca. 17). Die Spaltbacken bestanden bei diesem Versuch aus zu einer doppelten Lage zusammengefaltetem 0,1 mm dicken Kupferblech, wobei die Knickstellen die Kanten des Spaltes bildeten. Die Ultraschallflüssigkeit war bei dieser sowie bei einer Reihe der im Folgenden reproduzierten Aufnahmen Paraffinöl. Die starke Dämpfung der Schallwellen in dieser Flüssigkeit, die

¹⁾ E. GROSSMANN und E. HIEDEMANN, ZS. f. Phys. **95**, 383 (1935).

²⁾ E. HIEDEMANN, Ergeb. d. exakt. Naturw. **14**, 201 (1935).

auf dem Bild gut zu sehen ist, beeinträchtigt zwar etwas die Sichtbarkeit der Beugungerscheinung; sie hat aber den Vorteil, dass das in ca. 5 cm Entfernung vom Piezoquarz in den Schallstrahlengang gestellte Hindernis keine störende Rückwirkung auf die Schwingung der Quarzscheibe ausübt.

Fig. 4a ist die Wiedergabe (in ungefähr natürlicher Grösse) der an einem 1 mm breiten Spalt bei 4700 kHz auftretenden Beugungerscheinung ($a/\lambda = 4$). Von den Parabeln ist im Spaltbereich auf dieser Aufnahme nichts mehr zu sehen; dagegen erstreckt sich die Beugungerscheinung viel ausgeprägter auch in den Schattenraum. Es treten hier deutliche Maxima und Minima auf; ihre Lage ist nach GROSSMANN und HIEDEMANN in Übereinstimmung mit der Theorie. Auf dem Bild sind ferner die Parabeln sichtbar, die von den dem Spalt abgekehrten Kanten der beiden Spalt-



Fig. 3.

Beugung an 3 mm breitem Spalt bei 6540 kHz in Paraffinöl; ca. zweifach vergrössert.

backen erzeugt werden. Die von diesen Kanten ausgehenden Beugungswellen verursachen auch die feinen Querstreifungen, die in der vom Spalt erzeugten Beugungerscheinung noch sichtbar sind.

Fig. 4b gibt unter ungefähr denselben Versuchsbedingungen (die Schallfrequenz betrug 4800 kHz) die Beugungerscheinung an einem Doppelspalt wieder. Es waren zwei Spalte von 1 mm Breite im gegenseitigen Abstand von 1 mm vorhanden, sodass also, wenn man die zwei Spalte als Gitter auffasst, die Gitterkonstante $d = 2$ mm betrug. Man sieht gut, wie sich in einiger Entfernung von den beiden Spalten neue Maxima und Minima ausbilden in Richtungen ϑ , die ungefähr übereinstimmen mit den aus der Gittergleichung $\sin \vartheta = \pm \lambda/d$ berechneten; auch die Richtungen der höheren Ordnungen sind noch andeutungsweise sichtbar.

§ 6. Beugung an einem schmalen Schirm. — Wenn ebene Wellen auf eine ebene, reflektierende Wand unter dem Einfallswinkel α auftreffen, so bilden sich in dem Bereich, der von den

einfallenden und den von der Wand reflektierten Wellen überstrichen wird, bekanntlich¹⁾ „pseudostehende“ Kombinationswellen parallel zur reflektierenden Wand aus, deren Wellenlänge $\Lambda' = \Lambda/\cos \alpha$ beträgt. Bei Ultraschallversuchen sind diese Wellen, wie BACHEM und HIEDEMANN²⁾ gezeigt haben, als gerade Streifen mit dem gegenseitigen Abstand $d = \Lambda/2 \cos \alpha$ sichtbar. Hat die Wand vom Koordinaten-Nullpunkt den Abstand R , so ist die Gleichung für den Ort der Streifen in unserem Koordinatensystem

$$x \sin \alpha - y \cos \alpha - R - n \Lambda/2 \cos \alpha = 0. \quad (2)$$

Hierbei ist angenommen, dass der erste Streifen an der Wand aufsitzt. Es scheint aber, dass noch keine Versuche angestellt wurden, um zu prüfen, ob diese Annahme wirklich immer zutrifft. Falls dies nicht der Fall wäre, müsste in der Gleichung noch eine Phasenkonstante hinzugefügt werden.



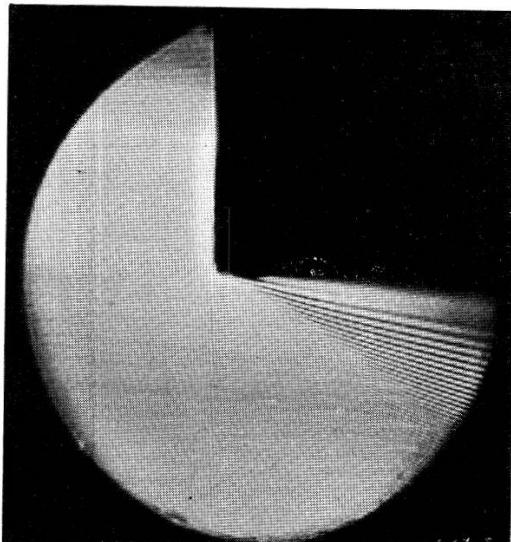
Fig. 5.

Lloydscher Spiegelversuch mit Ultraschallwellen von 4100 kHz in Paraffinöl. Die Lage des Spiegels, einer 4 cm langen und 1,3 mm dicken Glasplatte, ist am Schallschattenwurf und an den am Spiegel aufliegenden pseudostehenden Wellen kenntlich. Der links im Gesichtsfeld sichtbare vertikale schwarze Streifen ist der Schatten eines Stativstabs, an dem der Spiegel befestigt war.

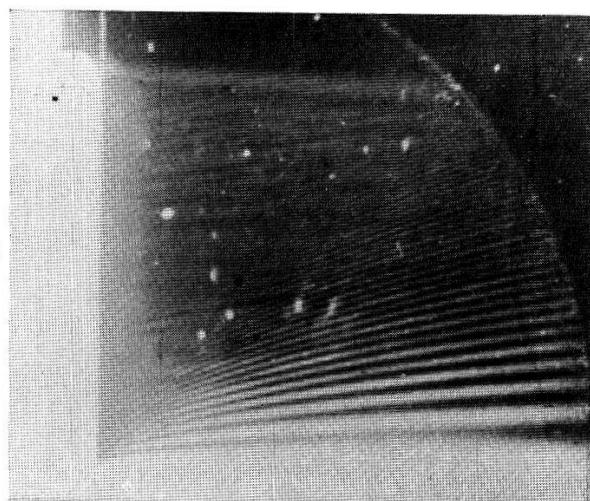
Durch Vergrösserung des Einfallswinkels kann der Streifenabstand d beliebig gross gemacht werden. In der Optik wird hier von Gebrauch gemacht, um beim Lloydschen Spiegelversuch pseudostehende Wellen zu erzeugen, die ohne Mikroskop sichtbar sind. Fig. 5 gibt das Wellenfeld bei diesem Versuch für Ultraschallwellen der Frequenz 4100 kHz wieder. Der Spiegel, eine 1,3 mm dicke Glasplatte, war gegen den Schallstrahl um 78° geneigt. Man sieht schön, wie die äquidistanten Streifen der pseudostehenden Welle kontinuierlich in die Parabeln übergehen, die an den beiden Rändern der Platte entstehen. Bekanntlich macht auch

¹⁾ Vgl. z. B. G. Joos, Lehrb. d. theoret. Phys., Leipzig 1932, S. 54.

²⁾ CH. BACHEM u. E. HIEDEMANN, ZS. f. Phys. **91**, 418 (1934).



a



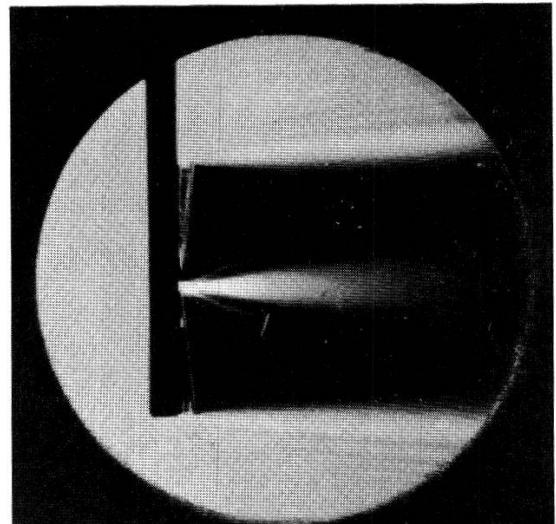
b

Fig. 2.

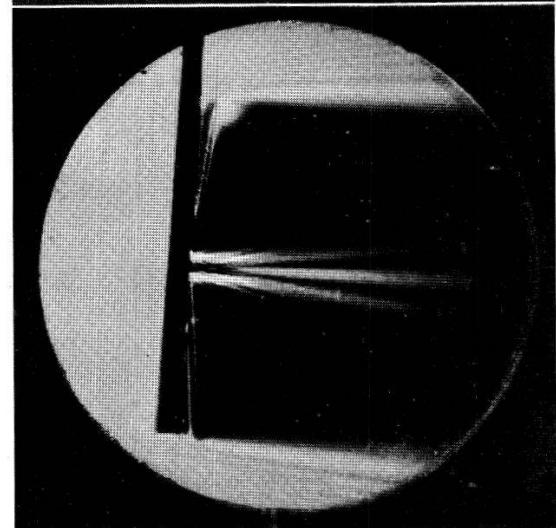
Beugung an gerader Kante eines Schirms bei 6540 kHz in Xylol; Schallwelle von links kommend (wie auf allen folgenden Aufnahmen).

a) Schirm: 3,7 mm dickes Messingblech mit etwas abgeschrägter Endfläche (natürliche Grösse).

b) Schirm: 0,1 mm dickes Kupferblech (Ausschnitt, ca. zweifach vergrössert).



a



b

Fig. 4a.

Beugung an 1 mm breitem Spalt bei 4700 kHz in Paraffinöl.

Fig. 4b.

Beugung an zwei 1 mm breiten Spalten mit 1 mm gegenseitigem Abstand; 4800 kHz Paraffinöl.

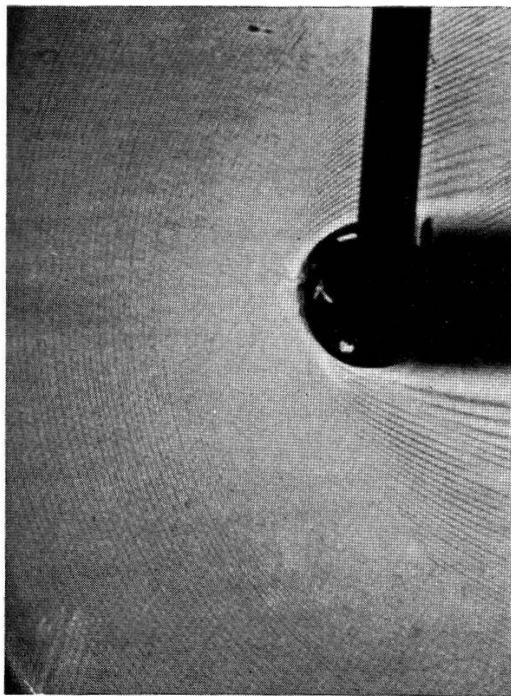


Fig. 6.

Ca. dreifach vergrößerter Ausschnitt der Aufnahme der Fig. 8; vgl. deren Begleittext*).

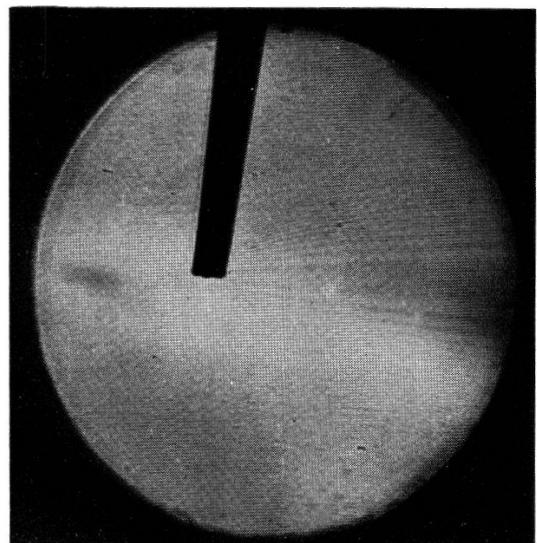


Fig. 7.

Beugung von Schallwelle der Frequenz 6550 kHz in Xylol an 0,1 mm dickem Neusilberdraht. Der schwarze Streifen, der schräg von oben bis ungefähr in die Mitte des Gesichtsfeldes reicht, ist der Schatten des Stativs, an dem der Draht ausgespannt war.

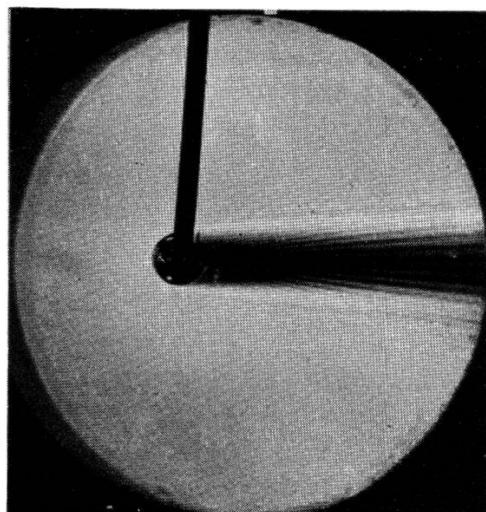


Fig. 8.

Beugung von Ultraschallwelle der Frequenz 6550 kHz an einem Zylinder von 5 mm Durchmesser, hergestellt durch Zusammenrollen eines 4 cm breiten Stücks 0,1 mm dicken Cu-Blechs. Der schwarze Streifen von oben bis zur Mitte des Gesichtsfelds ist der Stativschatten.

*) Anm. b. d. Korr.: Da sich bei der Anfertigung des Clichés Schwierigkeiten ergaben, die im Original (allerdings nur mit Lupe) gut sichtbaren Streifen in der Reproduktion ebenso deutlich wieder zu geben, sind die Streifen auf diesem Bild durch Retusche in der Clichieranstalt teilweise verstärkt.

in der Optik bei der Demonstration derartiger Interferenzversuche das gleichzeitige Auftreten der nichtäquidistanten Beugungsstreifen oft Schwierigkeiten.

Wenn man als reflektierende Wand statt der Ebene einen Kreiszylinder vom Radius R nimmt, dessen Achse zusammenfällt mit der z -Achse, so gehen die geradlinigen Streifen in Kurven über, die hier in Fig. 6 demonstriert werden, nachdem ähnliche Kurven schon früher von BACHEM und HIEDEMANN erhalten wurden. Das Bild ist ein Ausschnitt der unten zu besprechenden Aufnahme der Fig. 8 in ca. dreifacher Vergrößerung; die Streifen sind (Anm. b. d. Korr.: nur im Original) fast im ganzen Gesichtsfeld sichtbar. Diese Streifen sind die Enveloppen von Geradscharen (2), welche sich ergeben, wenn man bei festgehaltenem R den Winkel α verändert, indem man die reflektierende Wand auf dem Zylinder abrollen lässt. Man erhält dann als Gleichung der Enveloppen

$$\begin{aligned} x &= R \sin \alpha + n \Lambda \operatorname{tg} \alpha \\ y &= -R \cos \alpha - n \Lambda/2 \cdot (1 - \operatorname{tg}^2 \alpha). \end{aligned} \quad (3)$$

Für $R = 0$ wird aus (3)

$$x^2 = 2n \Lambda \cdot (y + n \Lambda/2), \quad (4)$$

welche Gleichung bis auf die Phasenkonstante, die in (2) = 0 gesetzt wurde, mit der Parabeln-Gleichung (1) des § 4 identisch ist. Fig. 7 gibt eine Aufnahme wieder, in der diese Versuchsbedingungen angenähert realisiert sind: das Bild zeigt die Beugung einer Schallwelle von 6550 kHz an einem Neusilberdraht von 0,1 mm Durchmesser.

Die bisher besprochenen Interferenzen kamen durch Überlagerung der einfallenden und der vom Schirm reflektierten Welle zustande. Eine andere Beugungerscheinung tritt im Schallschatten auf, nämlich die Interferenz der von den beiden Schirmkanten ausgehenden Zylinderwellen. Hierdurch entstehen Hyperbeln, deren Gleichung lautet:

$$x^2/(n \Lambda/2)^2 - y^2/[R^2 - (n \Lambda/2)^2] = 1. \quad (5)$$

Diese Hyperbeln sind in Fig. 8 im Schallschatten gut sichtbar. Bei der Aufnahme wurde nur das 0te Beugungsspektrum weggeblendet, die Schallfrequenz war wieder 6550 kHz. Als beugender Schirm diente ein 4 cm breiter Streifen von 0,1 mm dickem Kupferblech, der zu einem Zylinder von ca. 5 mm Durchmesser lose aufgerollt war. Versuche mit massiven Zylindern aus Glas oder Messing ergaben viel unübersichtlichere Resultate, weil dann offenbar auch quer durch den Stab hindurch noch Schall in den Schallschatten

gelangen konnte. Auf der hier wiedergegebenen Aufnahme sind unmittelbar hinter dem Zylinder ebenfalls noch von der speziellen Bauart desselben verursachte komplizierte Interferenz- und Beugungerscheinungen sichtbar. In etwas grösserer Entfernung sind die Hyperbeln aber störungsfrei ausgebildet; die hyperbelförmige Krümmung ist gut zu erkennen, während in der Optik bekanntlich anstelle von (5) die Näherung $x = n \Lambda y/2R$ die Beobachtungen genügend genau darstellt.

Zusammenfassung. — (§§ 2 und 3): In einer früheren Arbeit war eine Schlierenmethode beschrieben worden zur Prüfung der Frage, welche Form im Raum die Ultraschallwellen haben, die von schwingenden Piezoquarzen in Flüssigkeiten emittiert werden. Die damals untersuchten kreisförmigen und rechteckigen Quarzplatten hatten stets Schallwellen ausgesandt, die stark von der Planwelle abwichen; jetzt wurde daher eine Quarzscheibe untersucht, deren Berandung nach STRAUBEL so geschliffen war, dass die Scheibe möglichst reine Dickenschwingungen ausführte. Die Wellenform wurde geprüft für die Grundschwingung der Scheibe bei 440 kHz und für die meisten Oberschwingungen bis zur 25. bei 11 000 kHz. Es ergab sich, dass die Platte in der benutzten Versuchsanordnung in den höheren Oberschwingungen, d. h. von ca. 5 000—10 000 kHz, wirklich sehr angenähert ebene Wellen emittierte. Ein weiterer indirekter Beweis dafür ist auch die Tatsache, dass die an ebenen Schallwellen auftretenden Fresnelschen Beugungerscheinungen mit dieser Quarzscheibe sehr gut sichtbar gemacht werden konnten. Bei 440 und bei 1300 kHz wurden keine befriedigenden Planwellen erhalten, doch waren in der benutzten Anordnung bei diesen kleinen Frequenzen keine einwandfreien Versuche ausführbar. — (§§ 4—6): Es werden Aufnahmen einiger Fresnelscher Beugungerscheinungen bei Ultraschallwellen in Xylol und Paraffinöl im Frequenzbereich 4000÷6500 kHz wiedergegeben; es sind dies die Beugung an gerader Kante eines Schirms, an breitem und an engem Spalt, an zwei engen Spalten, an einer Glasplatte bei angenähert streifender Inzidenz (als Demonstration des Lloydschen Spiegelversuchs), an dünnem und dickem Zylinder.

Der Firma Carl Zeiss in Jena möchte ich für die Bereitwilligkeit, mit der sie mir die benötigte Straubelsche Piezoquarzscheibe für diese Versuche kostenlos zur Verfügung stellte, den herzlichsten Dank aussprechen.

Physikalisches Institut der Universität Zürich.