

Praktikumsplatz Nr.: 52, 57, 61

Akustik

(Ultraschall)

Aufgaben:

- * Bestimmung der Schallgeschwindigkeit
- * Interferenz (u.a. am Doppelspalt)
- * Schwebungen

10. November 1987

W. Hofer

Zweck der Versuche

Die Versuche befassen sich mit der Wellenausbreitung in Luft, die Schallgeschwindigkeit wird bestimmt und Interferenzen und Schwebungserscheinungen werden beobachtet.

Achtung: Man informiere sich unbedingt vor Beginn des Praktikums über:

- * Ausbreitung von Wellen in Gasen
- * Phasenmessung mit Lissajous - Figuren
- * Schallbeugung und -interferenz (u.a. Einzel- und Doppelspalt)
- * Schwebungen
- * Aufgabenstellung, Durchführung und Interpretation (bzw. Auswertung) der Versuche
- * die in Berkeley Physik Kurs 6, Abschnitt 7.2.3, 7.3.3. und 7.4.3 gestellten Fragen und versuche sie zu beantworten !

Literatur dazu:

Berkeley Physik Kurs 6: "Physik und Experiment" Vieweg Verlag
(Kap. 7.1 - 7.4)

(Kopie liegt bei)

Funktechnische Arbeitsblätter Mv01 Franzis Verlag

(Kopie liegt bei)

Skriptum: "Physik für TPH IV" (Kap. 2.30, 5.30, 11.60)

Berkeley Physik Kurs 3: "Schwingungen und Wellen" Vieweg Verlag
(Kap. 1.5, 4.1, 4.2, teilw. 9)

Protokoll

Während der Durchführung der Versuche ist auch ein Protokoll zu verfassen. Beschreiben Sie darin in einigen Sätzen je Versuch wie Sie dabei vorgegangen sind, was Sie dabei beobachtet haben und wie Sie es interpretieren. Zusätzlich sind bei den quantitativen Messungen (Versuch 1.2, 2.2, 2.4) die Meßergebnisse samt Auswertung und Diskussion zu dokumentieren.

Durchführung der Versuche

Die hier beschriebenen Versuche (1.1 bis 3.2) beruhen auf den im Berkeley Physik Kurs 6: "Physik und Experiment" in Kapitel 7 (7.1 - 7.3) diskutierten Aufgabenstellungen. Eine Kopie davon liegt bei und ist vor der Durchführung der Versuche unbedingt zu lesen, da dort zusätzliche Informationen, ergänzende Bemerkungen und zur Auswertung notwendige Formeln zu finden sind.

Ultraschallwandler

In den Experimenten werden Wellen mit einer Frequenz von etwa 40 kHz und einer Wellenlänge von rund 1 cm verwendet.

Als Sender dient ein von einem Sinusgenerator gespeister Lautsprecher (Piezohochtöner PH 5.9 von Visaton[®] mit einem Übertragungsbereich von 4 kHz bis > 40 kHz).

Dieser Piezohochtöner wird ebenfalls als Empfänger eingesetzt. Um die Empfindlichkeit zu steigern und um Störsignale zu unterdrücken, wird dem als Empfänger dienenden Lautsprecher ein zweistufiges, aktives Bandpaßfilter ($40 \text{ kHz} \pm \text{einige kHz}$, $v = 1250$ fach) nachgeschaltet.

1. Akustische Wellen

1.1 Amplitudenveränderungen (stehende Welle)

Stellen Sie den Sinusgenerator auf eine Frequenz von etwa 40 kHz ein (mit Frequenzzähler messen). Das Oszilloskop zeigt in einem Kanal (auf den getriggert wird) das Signal des Sinusgenerators mit dem der Sender gespeist wird, im anderen das vom Empfänger aufgenommene. Stellen Sie Sender und Empfänger einander gegenüber (Bildung einer stehenden Welle). Variieren Sie den Abstand zwischen Sender und Empfänger und beobachten Sie die dabei auftretende Amplitudenveränderung. Schätzen Sie die Wellenlänge ab.

1.2 Phasenänderung

Aufbau wie bei Versuch 1.1, Triggerung auf das Signal des Sinusgenerators. Bewegen Sie den Empfänger und beobachten Sie die Veränderung der relativen Phase der beiden am Oszilloskop gleichzeitig dargestellten Signale. Schalten Sie danach das Oszilloskop auf X-Y Betrieb um und beobachten Sie die Phasenverschiebung mit Hilfe von Lissajous - Figuren. Messen Sie damit die Wellenlänge, wobei Sie zur Steigerung der Genauigkeit den Empfänger über eine Strecke von 10 bis 20 Wellenlängen bewegen und den Mittelwert aus mehreren solchen Einzelmessungen bestimmen. Schätzen Sie den Fehler (grob) ab. Bestimmen Sie aus der gemessenen Wellenlänge und aus der Frequenz die Schallgeschwindigkeit der Welle. Vergleichen Sie Ihr Resultat mit der Vorhersage laut Gleichung 7.1 (Berkeley Band 6, Seite 146).

2. Schallbeugung und -interferenz

2.1 Strahlungsverteilung des Senders

Aufbau des Versuches wie bei Versuch 1.1. Beobachten Sie die Strahlungsverteilung des Senders indem Sie den stets zur Quelle ausgerichteten Empfänger entlang eines Kreisbogens (Sender im Mittelpunkt) führen. Beschreiben Sie die beobachtete Strahlungsverteilung.

2.2 Interferenz am Doppelspalt

Zur Erzeugung von Interferenzen benützen wir einen Doppelspalt. Die Versuchsanordnung ist in Bild 7.3 (Berkeley 6, Seite 148) skizziert. Durchführung des Versuches analog zu Versuch 2.1.

Vermessen Sie die Lage möglichst vieler Maxima und Minima (bis $n = 3$ gut meßbar) und vergleichen Sie das Ergebnis mit den Vorhersagen (Gleichung 7.3a und 7.3b in Berkeley 6, Seite 148).

2.3 Lloydscher Spiegel

Demonstrieren Sie das Auftreten eines Interferenzbildes beim Lloydschen Spiegel mit Hilfe eines neben Sender und Empfänger gehaltenen Papierblattes.

2.4 Interferenz bei 2 Sendern gleicher Frequenz

Dieser Versuch ist in Prinzip nur eine Variation des Doppelspalt - Experimentes. Zwei nebeneinander im Abstand d aufgestellte Sender werden von einem Sinusgenerator gespeist.

Vermessen Sie die Lage möglichst vieler Maxima und Minima (bis $n = 3$ gut meßbar) und vergleichen Sie das Ergebnis sowohl mit den Vorhersagen (Gleichung 7.3a und 7.3b in Berkeley 6, Seite 148) als auch mit den Ergebnissen aus Versuch 2.2.

3. Akustische Interferometrie

3.1 Schwebungen

Betreiben Sie die beiden Sender mit je einem eigenen Sinusgenerator, wobei Sie den einen Generator auf einer festen Frequenz von etwa 40 kHz belassen und die Frequenz des anderen variieren (Frequenzdifferenz bis zu etwa 2 kHz). Beobachten Sie die Schwebungserscheinung am Signal eines Empfängers. Stellen Sie für die weiteren Versuche eine Frequenzdifferenz von ungefähr 1.5 kHz ein.

Um eine (der Wegdifferenz entsprechende) Phasenverschiebung der einhüllenden Kurve beobachten zu können, muß die Triggerung auf eine als Phasenreferenz dienende einhüllende Kurve erfolgen. Überlagern Sie hierzu die Signale der beiden Sinusgeneratoren mit Hilfe der aus Widerständen aufgebauten Mischstufe (→ Schwebung im gemischten Signal) und verwenden Sie die mit Hilfe der Empfangsschaltung (Bild 7.9 in Berkeley 6, Seite 151) erzeugte resultierende Hüllkurve zur Triggerung. Analysieren Sie die Schaltung mit Hilfe des Oszilloskops.

Untersuchen Sie die Strahlungsverteilung mit einem Empfänger, wobei Sie die Schwebungen der Signale beobachten (insbesondere die Phasenverschiebung der resultierenden Kurve). Wie wirkt sich ein Wegunterschied auf das Schwebungsbild aus?

3.2 Überlagerung von Schwebungen

Beobachten Sie die Überlagerung der Schwebungssignale zweier Empfänger (überlagern Sie die Schwebungssignale mit Hilfe der aus Widerständen aufgebauten Mischstufe). Wie verändert sich die Amplitude der einhüllenden Kurven, wenn der Abstand der Empfänger geändert wird? Vergleichen Sie die Ergebnisse mit Versuch 1.1.

es folgt der Anhang mit Kopien aus der Literatur...

7. Akustik und Flüssigkeiten (AF)

7.1. Einleitung

Die ersten drei Experimente dieser Reihe befassen sich mit der Wellenausbreitung in Luft und Flüssigkeiten. Verschiedene Wellenphänomene, die mit sichtbarem Licht oder Mikrowellen demonstriert werden können, werden auch bei akustischen Wellen beobachtet, die natürlich nicht elektromagnetischer Natur sind. Wir werden dabei Ähnlichkeiten, aber auch wichtige Unterschiede zwischen akustischen und elektromagnetischen Wellen feststellen.

Um Wellen geringer Wellenlänge zu erhalten, muß bei Frequenzen von etwa 40 kHz (40 000 Schwingungen pro Sekunde) gearbeitet werden. Die Obergrenze der Hörbarkeit für das menschliche Ohr liegt bei 20 kHz, so daß diese Wellen im *Ultraschallbereich* liegen. Dennoch bezeichnet man sie oft als *Schall*, obwohl sie für den Menschen unhörbar sind. Einige Tiere haben aber einen Hörfrequenzbereich, der sich weit höher hinauf erstreckt als jener des Menschen.

Verschiedene Interferenz- und Beugungseffekte mit Schall sind den Beobachtungen bei elektromagnetischen Wellen völlig analog. Da Schallwellen in Gasen longitudinal und nicht transversal sind, treten allerdings keine Polarisationsphänomene auf. In Festkörpern können akustische Wellen entweder longitudinal oder transversal oder auch eine Kombination beider sein, so daß hier Polarisations-effekte beobachtet werden.

Die letzten drei Experimente dieser Serie behandeln die Strömung von Flüssigkeiten, hauptsächlich von Luft und Wasser. Wir beginnen mit der Betrachtung einer idealisierten Flüssigkeit, in der alle Effekte der Viskosität völlig fehlen. Von hier aus gehen wir zur viskosen und schließlich zur turbulenten Strömung über. Jede dieser Beobachtungen können wir durch grundlegende physikalische Prinzipien erklären.

7.2. Experiment AF-1: Akustische Wellen

7.2.1. Einleitung

Gase können bekanntlich als Medium zur Ausbreitung mechanischer Wellen dienen. Die dabei auftretenden Abweichungen vom Gleichgewicht sind kurzzeitige Druckschwankungen, wobei Bereiche verringerter und vergrößerter Gasdichte aufeinander folgen. Die Ausbreitung von Wellen in Gasen wird in vielen Lehrbüchern diskutiert und soll hier nicht im Detail behandelt werden. Für ein ideales Gas, in dem Verdichtungen und Verdünnungen adiabatisch erfolgen, ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit u gegeben durch

$$u = \left(\frac{\gamma RT}{m} \right)^{1/2}, \quad (7.1)$$

wobei γ das Verhältnis der spezifischen Wärmen ($\gamma = c_p/c_v$), R die Gaskonstante, T die absolute Temperatur und m die Molekülmasse des Gases ist.

Für unsere Experimente benützen wir Wellen mit einer Frequenz von etwa 40 kHz und einer Wellenlänge von rund 1 cm. Solche Wellen können leicht mit einem Sinusgenerator und einem elektro-akustischen Wandler hergestellt werden. Dazu kann ein gewöhnlicher Lautsprecher dienen; um bessere Wirkungsgrade zu erreichen, verwenden wir aber einen Wandler in Form einer kleinen Scheibe von etwa 2 cm Durchmesser. Die Kennlinie dieses Wandlers wird in Experiment EI-5 im Detail untersucht.

Als Empfänger der Ultraschallwellen benützen wir einen zweiten Wandler. Bei relativ geringen Entfernungen (d.h. weniger als 1 m) ist die Wellenamplitude groß genug, um im Empfänger ein Signal auszulösen, das einem Oszillographen zugeführt werden kann.

Stehen Sender und Empfänger einander im Abstand L frontal gegenüber, wirkt jeder teilweise als Reflektor, und eine stehende Welle bildet sich zwischen ihnen aus. Die Amplitude der stehenden Welle ist maximal, wenn jede der beiden Scheiben nahe einem Knoten ist. Das ist der Fall, wenn die Entfernung ein ganzzahliges Vielfaches einer halben Wellenlänge ist, also

$$L = n \frac{\lambda}{2} = \frac{nu}{2f}, \quad (7.2)$$

wobei n eine ganze Zahl ist. Daher kann man durch Änderung des Abstands und gleichzeitiger Beobachtung der periodischen Änderungen der Amplitude die Wellenlänge direkt messen.

Eine alternative Vorgangsweise zur Messung der Wellenlänge besteht darin, den Sender an den Vertikaleingang des Oszillographen und den Empfänger an den Horizontaleingang zu legen. Die beiden Signale unterscheiden sich in der Phase um einen Betrag, der direkt proportional zur Entfernung zwischen den Wandlern ist. Wenn wir eine Entfernung finden, für die die beiden Signale in Phase sind, und dann den Empfänger weiterbewegen, bis die Signale wieder in Phase sind, haben wir ihn um eine Distanz von genau einer Wellenlänge bewegt.

7.2.2. Experiment

1. Amplitudenveränderungen. Schalten Sie die Wandler wie Bild 7.1 zeigt. Der 10-k Ω -Widerstand dient dazu, einen 50-Hz-Brummtön zu unterdrücken, der sonst möglicherweise an den Eingang des Oszillographen gelangen könnte. Abgeschirmte Drähte sind für die Verdrahtung erforderlich, um eine elektromagnetische Kopplung zwischen den beiden Schaltkreisen zu vermeiden.

Die Empfindlichkeit von Sender und Empfänger zeigt eine scharfe Resonanz nahe einer Frequenz von 40 kHz. Stellen Sie Sender und Empfänger einander gegenüber und

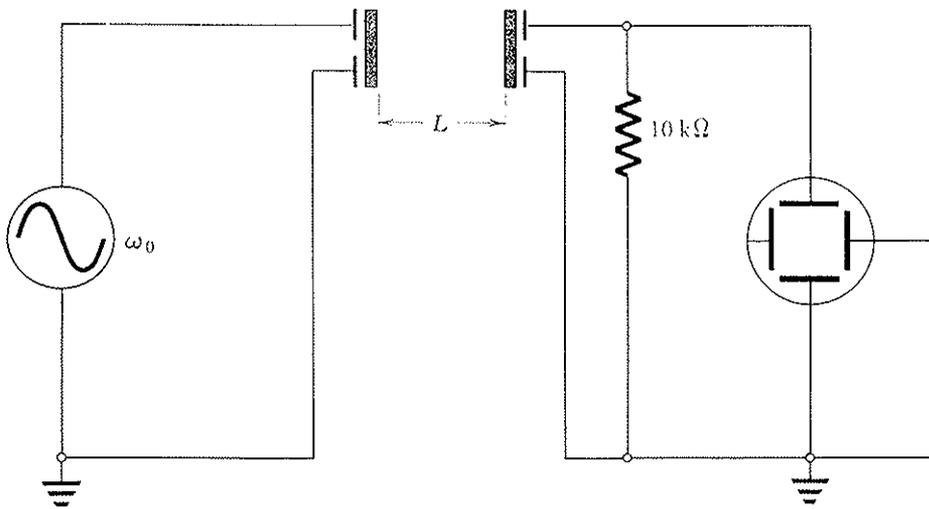


Bild 7.1

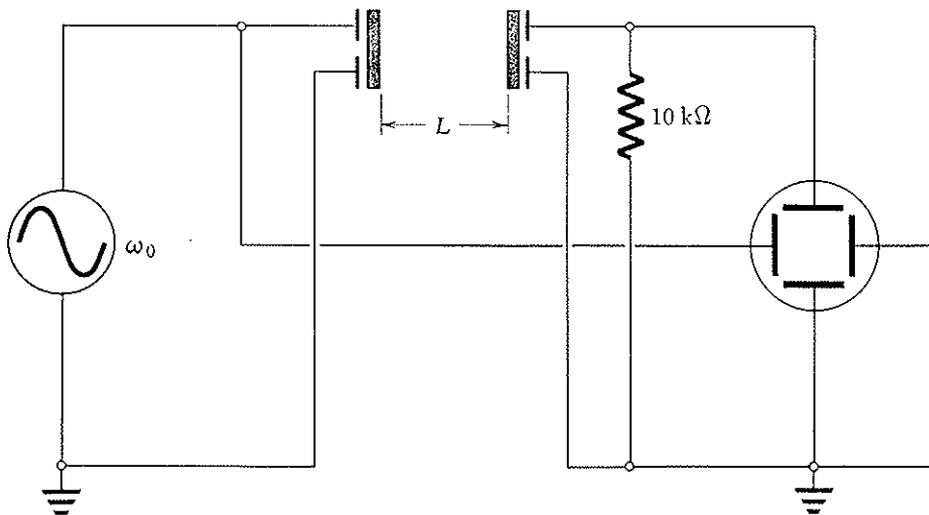


Bild 7.2

variieren Sie die Frequenz, bis die Resonanzfrequenz gefunden ist. Dann lassen Sie den Sinusgenerator bei dieser Frequenz fest eingestellt, wobei Sie von Zeit zu Zeit prüfen sollten, ob das System nicht von der Resonanzfrequenz weggedriftet ist.

Nun bewegen Sie den Empfänger entlang der Achse und beobachten die Änderung des Signals. Messen Sie die Wellenlänge so genau wie möglich, und berechnen Sie damit und aus der Frequenz die Geschwindigkeit der Welle. Vergleichen Sie Ihr Resultat mit der Vorhersage gemäß Gl. (7.1).

2. **Phasenänderung.** Ändern Sie nun die Anschlüsse des Oszillographen gemäß Bild 7.2. Verdrehen Sie den Empfänger etwas, so daß die reflektierte Welle nicht zum Sender zurückkehrt. Bewegen Sie den Empfänger entlang der Achse und beobachten Sie nun die Veränderung der rela-

tiven Phase der beiden Signale. Messen Sie wieder die Wellenlänge und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem vorhergehenden. Bewegen Sie den Empfänger über eine Strecke von mehreren Wellenlängen, um die Genauigkeit zu steigern.

7.2.3. Fragen

1. Bei welcher der beiden Frequenzen, 40 kHz oder 60 Hz, stellt elektromagnetische Kopplung zwischen den beiden Kreisen ein ernsteres Problem dar? Warum? Bei welcher Frequenz ist die Abschirmung der Drähte wichtiger?
2. Erklären Sie, wie die obige Anordnung als Thermometer verwendet werden könnte. Welche Temperaturänderungen sind noch nachweisbar, wenn Sie 10 Wellenlängen mit einer Genauigkeit von 0,2 mm vermessen können (d.h. 0,02 mm pro Wellenlänge)? Dabei soll die Frequenz konstant bleiben.

3. Manche Orgelpfeifen werden so konstruiert, daß in ihnen eine longitudinale stehende Welle mit einem Wellenbauch an jedem Ende der Pfeife entsteht. Die Länge der Pfeife beträgt dann eine halbe Wellenlänge. Wie ändert sich die Tonhöhe (Frequenz) einer solchen Pfeife mit der Temperatur? Welcher Temperaturanstieg hat einen Anstieg der Tonhöhe von einem Halbton (etwa 5 % Frequenzänderung) zur Folge?
4. Das Metall der Orgelpfeife dehnt sich mit steigender Temperatur aus und ändert so ebenfalls die Tonhöhe. Ist dieser Effekt wichtiger oder weniger wichtig als die Änderung der Schallgeschwindigkeit? Erklären Sie Ihre Antwort!
5. Unter welchen Bedingungen würden Sie erwarten, daß die Verdichtungen und Verdünnungen bei der Schallausbreitung *nicht* adiabatisch sind? Wie wird sich in diesem Fall die Schallgeschwindigkeit von der Vorhersage gemäß Gl. (7.1) unterscheiden?
6. Welches Gas hat die größte Schallgeschwindigkeit? Um welchen Faktor ist sie größer als die Schallgeschwindigkeit in Luft?
7. Luft ist hauptsächlich ein Gemisch von zweiatomigen Gasen. Welche Werte von γ und m sollten in Gl. (7.1) für Luft verwendet werden?

7.3. Experiment AF-2: Schallbeugung und -interferenz

7.3.1. Einleitung

Viele klassische Beugungs- und Interferenzexperimente, die ursprünglich mit Licht durchgeführt wurden, können in einfacher Weise auch mit Ultraschallwellen ausgeführt werden. Eines der schönsten ist das Doppelspaltexperiment, mit dem *Thomas Young* im Jahre 1802 in überzeugender Weise die Wellennatur des Lichts nachwies. Die Versuchsanordnung zeigt Bild 7.3. Für Werte von θ , für die der Wegunterschied von den Spalten zum Empfänger Null oder ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist, findet konstruktive Interferenz statt, und ein Intensitätsmaximum wird beobachtet. Beträgt die Wegdifferenz dagegen ein halbzahliges Vielfaches der Wellenlänge, dann entsteht ein Minimum. Die entsprechenden Bedingungen sind daher:

$$\text{Maximum: } d \sin \theta = n \lambda \quad (7.3a)$$

$$\text{Minimum: } d \sin \theta = (n + \frac{1}{2}) \lambda, \quad (7.3b)$$

wobei n eine ganze Zahl ist.

Eine andere Anordnung ist der „Lloydsche Spiegel“ (Bild 7.4). Die reflektierende Oberfläche erzeugt ein virtuelles Bild der Quelle. Mit Hilfe des Empfängers können die Knoten im Interferenzbild untersucht werden, das durch die einfallende und die reflektierte Welle gebildet wird.

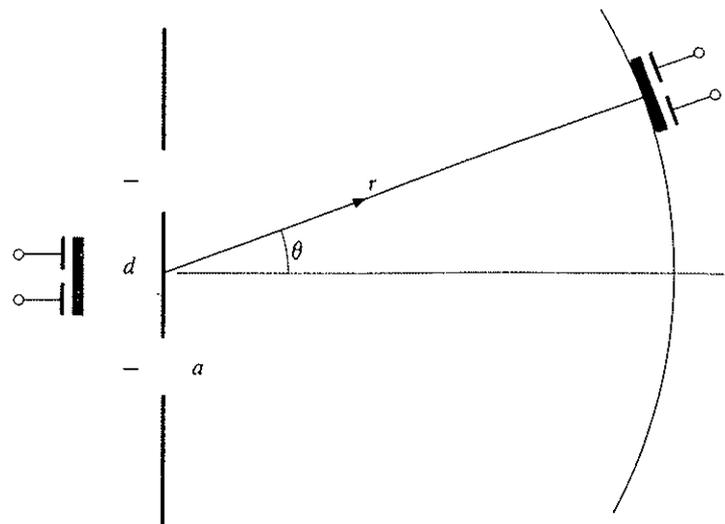


Bild 7.3

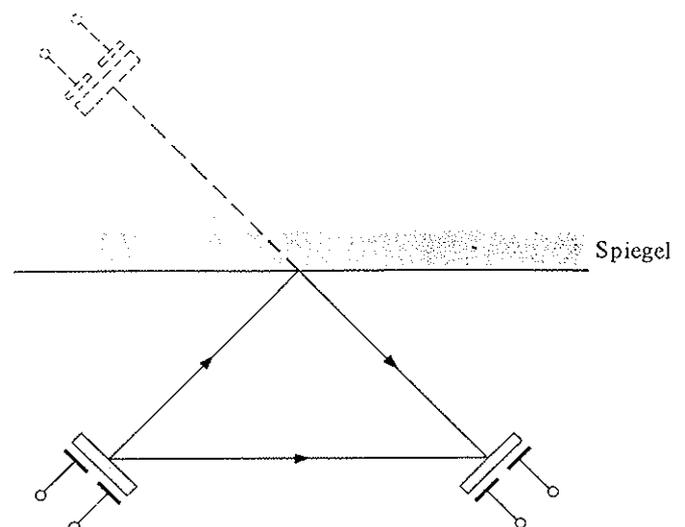


Bild 7.4

Beugungseffekte können ebenfalls beobachtet werden. Das einfachste Beispiel ist die in Bild 7.5 gezeigte Strahlungsverteilung des Senders selbst, die folgermaßen zustande kommt: Nehmen wir der Einfachheit halber an, daß sich alle Punkte der Oberfläche der Senderscheibe in Phase bewegen (was in Wirklichkeit nicht der Fall ist), so ist die Strahlung an Punkten neben der Achse doch eine Superposition von Wellen, die unterschiedliche Entfernungen von der Quelle zurückgelegt haben. Dadurch treten Phasenunterschiede auf. Die Berechnung dieses Interferenzbildes ist kompliziert, es kann aber experimentell untersucht werden.

Ein viel einfacheres Beugungsexperiment ergibt sich, wenn man den in Bild 7.6 gezeigten engen Einzelspalt als Quelle benützt. Destruktive Interferenz tritt auf, wenn

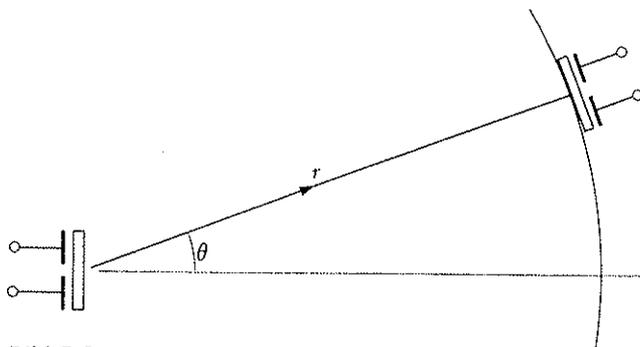


Bild 7.5

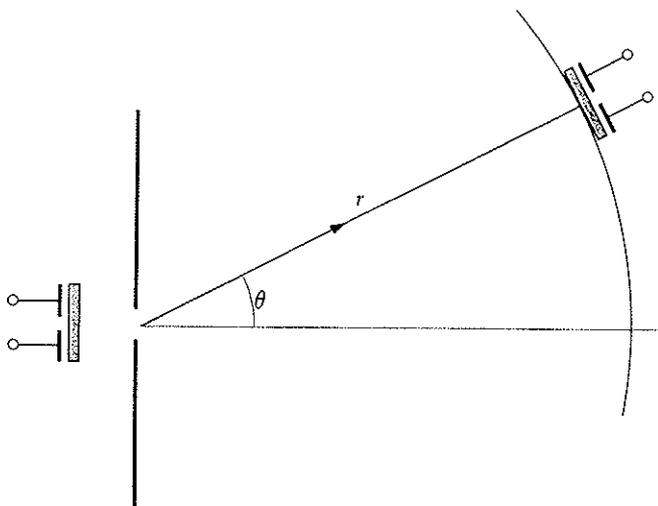


Bild 7.6

die Strahlung von der einen Hälfte des Spalts die Strahlung der anderen Hälfte auslöscht. Die Bedingung dafür ist bei einem Spalt der Breite a

$$\frac{a}{2} \sin \theta = (n + \frac{1}{2}) \lambda, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (7.4)$$

7.3.2. Experiment

Verbinden Sie den Sender mit dem Sinusgenerator und den Empfänger mit dem Vertikaleingang des Oszillographen, wobei Sie genau wie in Experiment AF-1 abgeschirmte Drähte verwenden. Stellen Sie den Generator auf die Resonanzfrequenz des Empfängers ein.

1. Die Strahlungsverteilung. Mit der in Bild 7.5 gezeigten Anordnung kann nun die Strahlungsverteilung des Senders bestimmt werden. Um verlässliche Messungen zu erhalten, müssen Sie den Empfänger stets zur Quelle richten und die Entfernung konstant lassen. Das Experiment sollte so weit wie möglich von reflektierenden Oberflächen entfernt ausgeführt werden, um störende Reflexionen auszuschalten. Es ist zweckmäßig, den Empfänger mit Klebeband auf einem Lineal zu befestigen, das um einen Zapfen drehbar ist. Ein Winkelmesser unter dem Lineal ermöglicht

das Ablesen des Drehwinkels (es kann aber auch der Sender verdreht werden). Ist die Strahlungsverteilung symmetrisch bezüglich der Achse?

2. Die Beugung am Einzelspalt. Benützen Sie dieselbe Anordnung wie vorher, aber fügen Sie in Bild 7.6 noch eine Spaltblende hinzu. Sie können mit einem ziemlich weiten Spalt beginnen, etwa $a = 3 \lambda$, und dann beobachten, wie sich das Beugungsbild ändert, wenn der Spalt enger gemacht wird. Lokalisieren Sie die Minima der Verteilung und vergleichen Sie ihre Positionen mit den Vorhersagen der Gl. (7.4).

3. Die Interferenz am Doppelspalt. Zur Erzeugung von Interferenzen benützen wir die Doppelspalt-Anordnung des Bildes 7.3. Um die Komplikationen zu verringern, die von der Beugung an den Spalten herrühren, sollte die Breite der einzelnen Spalte von der Größenordnung einer Wellenlänge oder etwas kleiner gewählt werden, wobei die Spalte einige Wellenlängen voneinander entfernt sind. Ein kräftiges Interferenzbild kann leicht beobachtet werden. Vermessen Sie die Lage möglichst vieler Maxima und Minima und vergleichen Sie das Ergebnis mit den Vorhersagen der Gl. (7.3). Umgekehrt kann man diese Messungen auch verwenden, um die Wellenlänge der Strahlung zu bestimmen, wie im ursprünglichen Youngschen optischen Zweispaltexperiment.

4. Der Lloydsche Spiegel. Stellen Sie für das Lloydsche Spiegelexperiment den Sender einige Wellenlängen entfernt vor einer vertikalen reflektierenden Platte auf und messen Sie die Knoten des Interferenzbildes, wie in Bild 7.4 gezeigt ist. Man kann auch die Tischplatte als Spiegel benützen.

Ist nach der Lage der Knotenlinien zu schließen, daß der durch den Spiegel erzeugte virtuelle Sender in Phase oder außer Phase mit dem wirklichen Sender ist? Die Elongationen in den einzelnen Wellen sind rein longitudinal. Welche Richtung der Elongationen an der reflektierenden Oberfläche folgt aus dem beobachteten Knotenbild? Ist dies eine allgemeine Randbedingung für eine reflektierende Oberfläche? Welches Experiment könnten Sie ausführen, um direkt zu zeigen, daß Schall in Luft longitudinal und nicht transversal ist?

7.3.3. Fragen

1. Bewegen sich alle Oberflächenpunkte des Senders in Phase? Bewegen sie sich mit derselben Amplitude? Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Verhalten, das im Experiment EI-5 diskutiert wurde.
2. Wenn beim Einzelspalt-Experiment der Spalt zu eng ist, beobachtet man kein Intensitätsminimum. Was ist der kleinste Wert für a , bei dem ein Minimum zwischen 0° und 90° entsteht?
3. Eine Schallwelle wird von einer starren Oberfläche reflektiert. Ist die reflektierte Welle bei Punkten nahe

der Oberfläche gleichphasig oder gegenphasig zur einfallenden Welle? Erklären Sie die Antwort.

4. Dreht man den Detektor um 90° um eine Achse senkrecht zur Scheibenfläche, würde sich dann sein Verhalten ändern? Vergleichen Sie diese Situation mit der entsprechenden für einen elektromagnetischen Detektor.
5. Kann man die akustische Anordnung verwenden, um ein Michelson-Interferometer zu bauen?

7.4. Experiment AF-3: Akustische Interferometrie

7.4.1. Einleitung

Bei Verwendung mehrerer Sender oder Empfänger erhalten wir neue und interessante akustische Erscheinungen. Das einfachste Beispiel (Bild 7.7) ist im Prinzip nur eine Variation des Doppelspalt-Experiments AF-2. Wir können die Strahlungsverteilung sowohl in der Ebene der Bilder als auch in Punkten oberhalb und unterhalb dieser Ebene untersuchen.

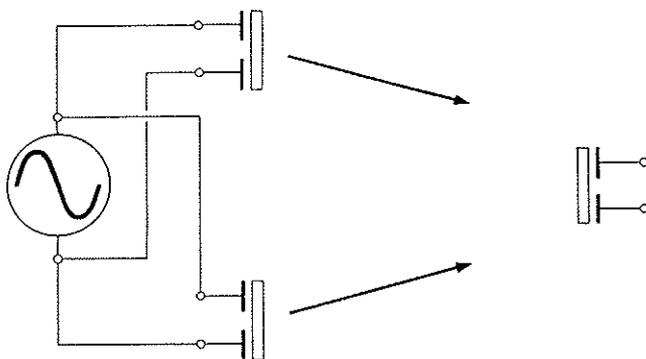


Bild 7.7

Eine interessante Änderung ergibt sich, wenn die beiden Sender mit Signalen leicht differierender Frequenzen ω_1 und ω_2 erregt werden. In einem von beiden Sendern gleich weit entfernten Punkt wird das resultierende Signal die bekannte Schwebungserscheinung zeigen (Bild 7.8). Das Signal variiert rasch mit einer Frequenz, die gleich dem Mittelwert von ω_1 und ω_2 ist, d.i. $\frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$, während die Frequenz, die der *einwickelnden* Kurve (gestrichelte Linie) entspricht, gleich der Differenzfrequenz $\Delta\omega = \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)$ ist.

Verschieben wir den Detektor, so daß er um eine halbe Wellenlänge näher an der einen Quelle liegt als an der anderen, so beobachten wir Schwebungen, bei denen die Phase der *einwickelnden* Kurve um einen Viertelzyklus verschoben ist. Zu den Zeiten, zu denen beide Signale an äquidistanten Punkten momentan in Phase waren, sind die Signale nämlich nunmehr um eine halbe Periode außer Phase, was zur Auslöschung führt.

Zwei Empfänger. Wir *addieren* nun die Ausgänge von zwei Empfängern, die individuelle Wegunterschiede zu den beiden Sendern aufweisen. In dieser Situation kommt als neuer Effekt hinzu, daß die Minima und Maxima des resultierenden Signals durch die relativen Phasen der Hüllkurven und nicht der individuellen Signale selbst bestimmt sind. Sogar wenn die Phasen der Oszillatoren, die die Signale ω_1 und ω_2 erzeugen, in zufälliger Weise variieren, würde sich die *relative* Phase der beiden Hüllkurven nicht ändern. Die *resultierende* Hüllkurve kann mit Hilfe der in Bild 7.9 gezeigten üblichen Empfängerschaltung beobachtet werden. Dabei sind die Werte für R und C so gewählt, daß am Ausgang nur die Spannung auftritt, die der niederfrequenten Hüllkurve entspricht, nicht aber die hohen Frequenzen der beiden Sender.

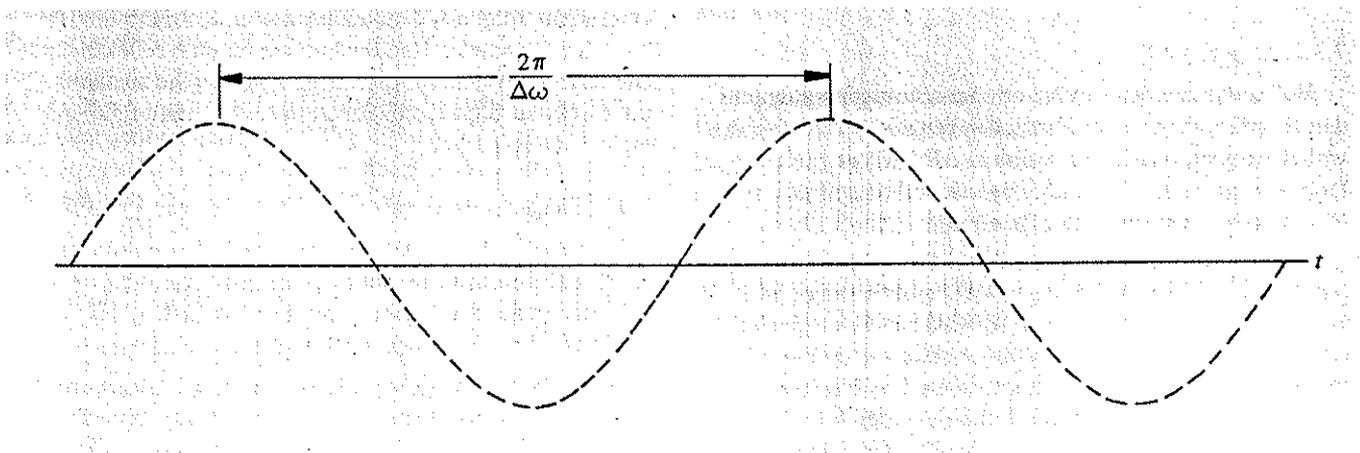


Bild 7.8

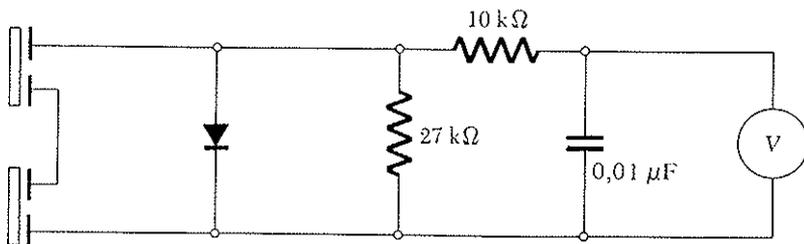


Bild 7.9

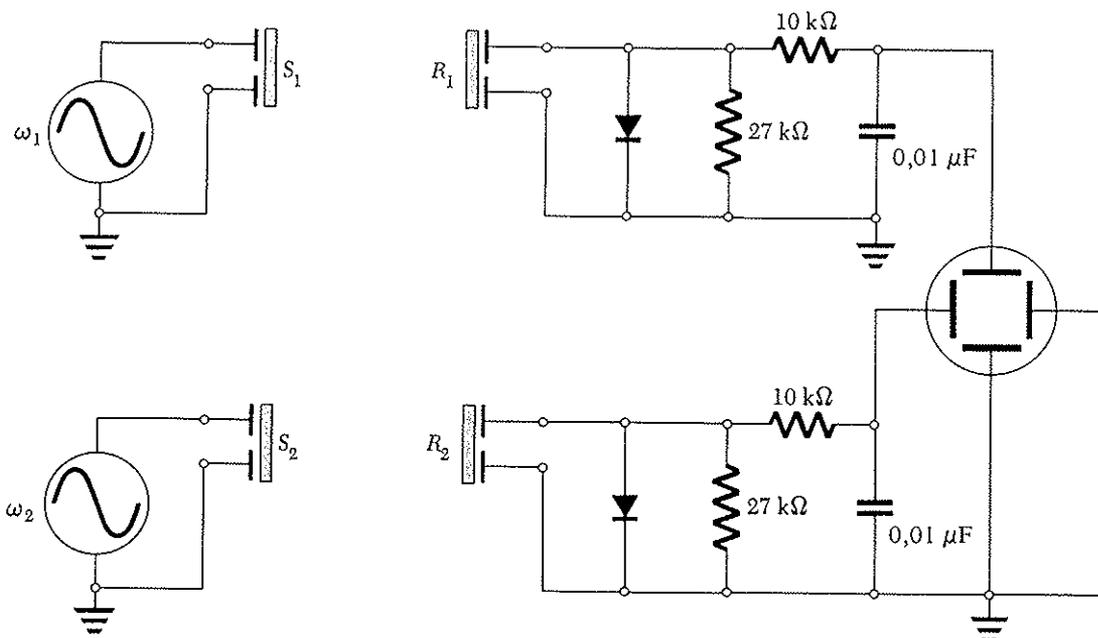


Bild 7.10

Es ist auch möglich, die Einhüllenden der beiden Signale separat zu messen, und dann die relative Phase dieser Signale zu ermitteln (Bild 7.10). In abgewandelter Form ist diese Anordnung die Grundlage des *Brown-Twiss-Interferometers*, mit dem *Brown und Twiss* im Jahre 1954 den Winkeldurchmesser von Sternen bestimmten, die starke Radioquellen sind. Dazu vergleichen Sie die relativen Phasen der niederfrequenten Schwankungen des Radiosignals, die mit räumlich getrennten Empfängern gemessen wurden.

7.4.2. Experiment

1. Schwebungen. Speisen Sie zwei Sender mit zwei Sinusgeneratoren unterschiedlicher Frequenz. Untersuchen Sie die entstehende Strahlungsverteilung mit einem Empfänger, wobei Sie die Schwebungen der Signale beobachten (Bild 7.8). Wie variiert die Verteilung in Abhängigkeit vom Wegunterschied zu den beiden Quellen?

2. Überlagerung von Schwebungen. Beobachten Sie die Überlagerung der Schwebungssignale mit zwei Empfängern (Bild 7.11). Wie verändert sich die Amplitude der ein-

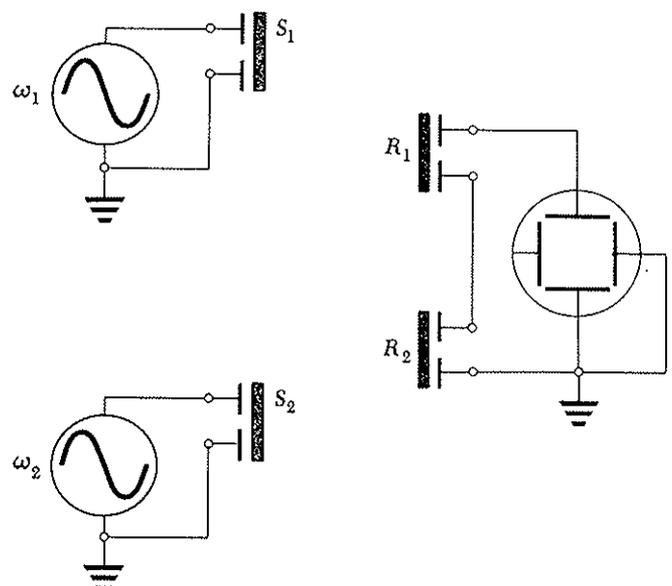


Bild 7.11

hüllenden Kurven, wenn der Abstand der Empfänger geändert wird? Gibt es konstruktive oder destruktive Interferenz, wenn sie nahe beieinander sind? Hängt dies von der Polung der Empfänger ab?

3. Messung der Einhüllenden. Bestimmen Sie die Form der Hüllkurve, indem Sie die Summe der Signale der beiden Empfänger gemäß Bild 7.9 ermitteln. Um Veränderungen der Intensität zu messen, bringen Sie die beiden Empfänger R_1 und R_2 nahe zusammen und schwenken Sie die beiden Quellen S_1 und S_2 vor den Empfängern. Durch Vergrößerung des Abstands zwischen R_1 und R_2 können Sie einen Abstand finden, für den die Intensitätsvariationen von den beiden Quellen einander aufheben. Die Hüllkurve kann auf einem Oszillographen verfolgt oder auch mit einem Voltmeter gemessen werden. Berechnen Sie den Abstand zwischen S_1 und S_2 .

4. Brown-Twiss-Interferometer. Bild 7.10 zeigt die Schaltung des Brown-Twiss-Interferometers. Die Empfängersignale steuern die Vertikal- und Horizontalauslenkung eines Oszillographen. Daraus kann ihre relative Phase bestimmt werden. Stehen die Empfänger nahe beisammen, so sind die Veränderungen der Hüllkurven in Phase und der Oszillograph zeigt eine diagonal verlaufende Linie. Wird der Abstand zwischen R_1 und R_2 vergrößert, so öffnet sich diese Linie zu einer Ellipse. Wenn die Signale 90° außer Phase sind, sind die Ellipsenachsen vertikal und horizontal. Benützen Sie ihre Resultate, um den Abstand zwischen S_1 und S_2 zu berechnen.

7.4.3. Fragen

1. Wenn zwei Signale mit den Frequenzen ω_1 und ω_2 addiert werden, ist die Frequenz der Hüllkurve $\frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)$, aber die Intensität variiert mit einer doppelt so großen Frequenz $\omega_1 - \omega_2$. Wie sind diese beiden Beobachtungen in Einklang zu bringen?

2. Ist es bei diesen Experimenten nötig, daß die beiden Sendersignale dieselbe *Amplitude* haben? Was geschieht, wenn dies nicht zutrifft?
3. Wie ändern sich die experimentellen Resultate, wenn einer der Empfänger in Bild 7.9 umgepolt wird?

7.5. Experiment AF-4: Flüssigkeitsströmungen

7.5.1. Einleitung

In den folgenden Experimenten werden wir die Strömung von Flüssigkeiten, hauptsächlich von Luft und von Wasser, und ihre Wechselwirkungen untersuchen. Wir beginnen mit dem einfachsten Fall, der Strömung von Wasser unter Bedingungen, bei denen die Zähigkeit und die Kompressibilität des Wassers vernachlässigt werden können. Im Experiment AF-5 werden wir die Effekte der Viskosität betrachten, und in AF-6 die Luftströmungen, bei denen die Kompressibilität wichtig ist.

Zunächst wollen wir das *Bernoullische Theorem* beweisen, das die Beziehung zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Druck in der Flüssigkeit herstellt. Dazu gehen wir von der Situation des Bildes 7.12a aus, wo Wasser aus einer Öffnung an der Seite eines Tanks ausströmt. Bild 7.12b zeigt die Strömung in größerem Detail. Die Linien sind Stromlinien, und wir betrachten eine Röhre, die in der angedeuteten Weise von Stromlinien begrenzt wird. Beim ersten Schnitt hat die Röhre die Querschnittsfläche A_1 und beim zweiten Schnitt (innerhalb der Öffnung) die Fläche A_2 . Während sich die Flüssigkeit beim Punkt 1 um eine kleine Strecke ds_1 verschiebt, schiebt sie sich bei 2 um eine Strecke ds_2 vor. Bei einer inkompressiblen Flüssigkeit müssen die beiden entsprechenden Volumina einander gleich sein:

$$A_1 ds_1 = A_2 ds_2. \quad (7.5)$$

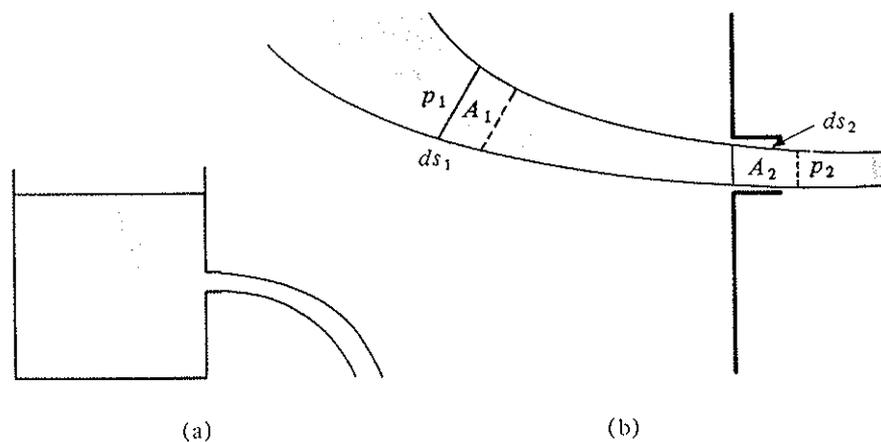


Bild 7.12

Phasenmessung mit Lissajous-Figuren

Mv 01

2 Blätter

A. Prinzip

Gibt man auf die beiden Plattenpaare einer Oszillografenröhre zwei sinusförmige Spannungen gleicher Frequenz, aber verschiedener Phasenlage, so schreibt der durch beide Spannungen abgelenkte Elektronenstrahl eine Ellipse. Je nach der Phasendifferenz ist das Verhältnis der kurzen zur langen Ellipsenachse, die Öffnung, verschieden groß. In dem einen Grenzfall kann ein Kreis (beide Achsen gleich groß), im anderen ein Strich (eine Achse gleich Null) geschrieben werden. Aus der Form der Ellipse kann also auf die Phasendifferenz geschlossen werden. Voraussetzung für die übliche Messung ist, daß die Auslenkung in x-Richtung genauso groß wie in y-Richtung ist. Beim Einstellen der Spannungen müssen also die unterschiedlichen Ablenkempfindlichkeiten der beiden Plattenpaare berücksichtigt werden.

B. Die Entstehung bzw. Konstruktion der Ellipse

Man zeichnet nach Bild 1 für die Ablenkung in x-Richtung über der y-Achse eine Sinuskurve (u_x). Entsprechend wird in der Verlängerung der x-Achse eine Sinuskurve gleicher Amplitude (u_y) dargestellt. Die u_y -Kurve muß aber gegen die u_x -Kurve um den gegebenen Phasenwinkel (45° in Bild 1) verschoben sein. D. h. für die u_x -Kurve liegt der Zeitpunkt $t = 0$ im Schnittpunkt dieser Kurve mit der y-Achse (und zwar auf dem aufsteigenden Ast). Bei der u_y -Kurve dagegen befindet sich $t = 0$ zwar auch auf dem ansteigenden Ast, aber noch vor Erreichen der Nulllinie. Die dann zu gleichen Zeitpunkten gehörenden Amplituden werden zusammengesetzt und so ergibt sich die gezeichnete Ellipse.

Bild 2 zeigt für einige ausgezeichnete Phasen-Verschiebungen ($\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ$ und 180°) die sich ergebenden Ellipsenformen. Wichtig ist, daß für $\varphi = 0^\circ$ eine Gerade geschrieben wird. Bei gleichen Amplituden, wie vorausgesetzt, ist sie unter 45° gegen das Achsenkreuz geneigt. Bei einer Phasenverschiebung von 90° entsteht ein Kreis.

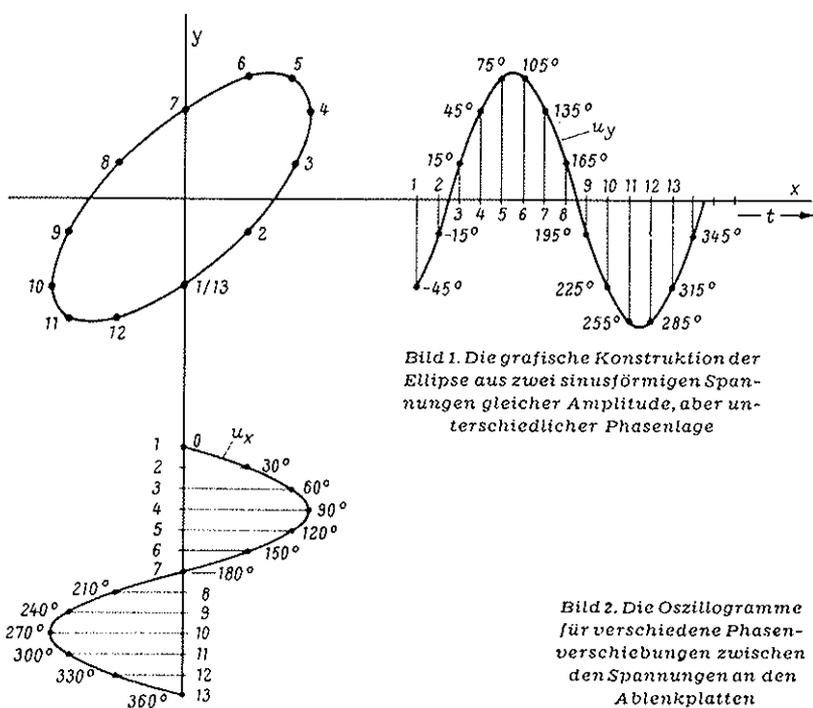


Bild 1. Die grafische Konstruktion der Ellipse aus zwei sinusförmigen Spannungen gleicher Amplitude, aber unterschiedlicher Phasenlage

Bild 2. Die Oszillogramme für verschiedene Phasenverschiebungen zwischen den Spannungen an den Ablenkplatten

$\varphi = 0^\circ$

$\varphi = 30^\circ$

$\varphi = 45^\circ$

$\varphi = 60^\circ$

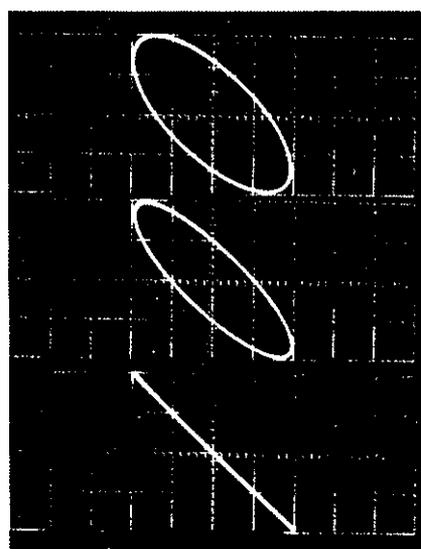
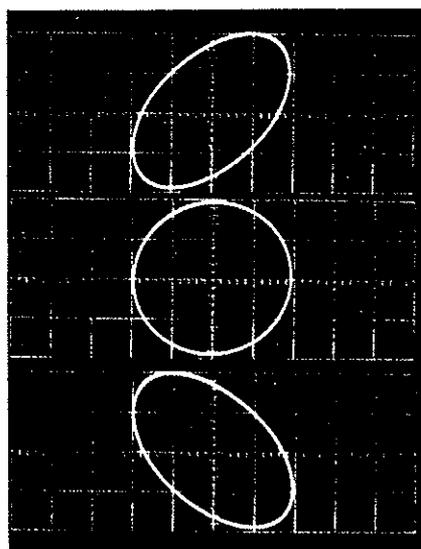
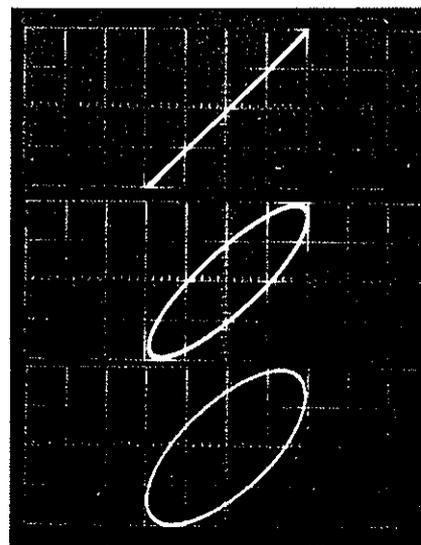
$\varphi = 90^\circ$

$\varphi = 120^\circ$

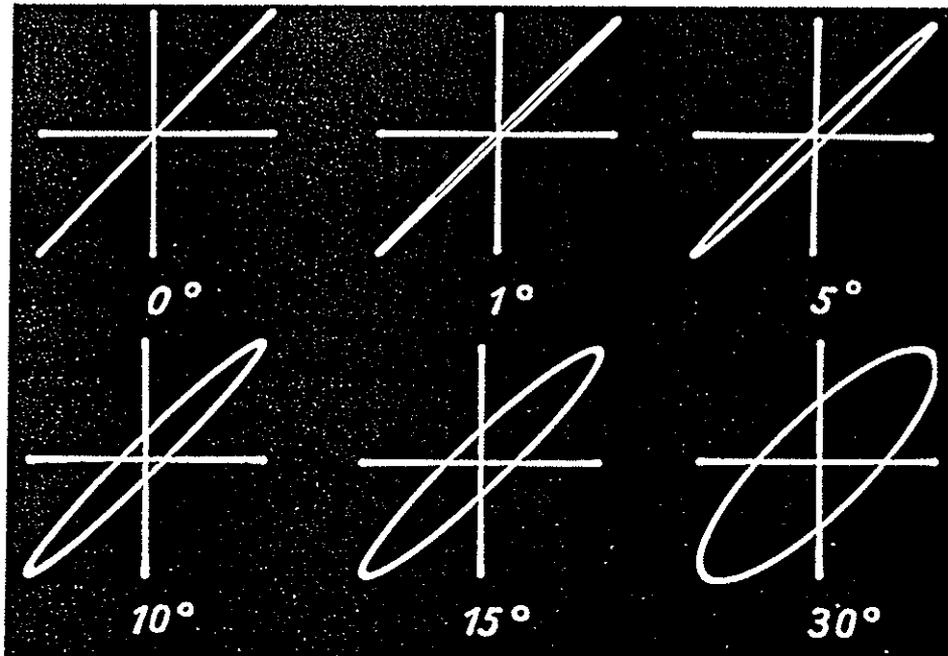
$\varphi = 135^\circ$

$\varphi = 150^\circ$

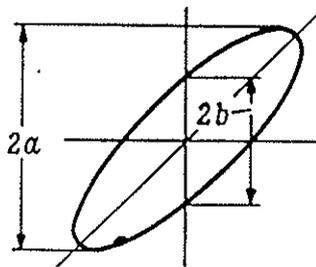
$\varphi = 180^\circ$



Phasenmessung mit Lissajous-Figuren

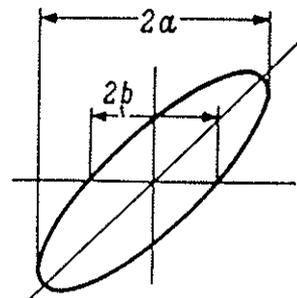


Formeltafel zur Berechnung des Phasenwinkels



$$\sin \varphi = \frac{b}{a}$$

$$\varphi = \arcsin \frac{b}{a}$$



$$\sin \varphi = \frac{b}{a}$$

$$\varphi = \arcsin \frac{b}{a}$$