

**Zusammenfassung** · Es wird die Wirkungsweise einer Apparatur zur optischen Darstellung von Luftschallfeldern beschrieben. Ausgehend von der von *Kock* und *Harvey* entwickelten Methode, welche die photographische Abbildung von fortschreitenden Wellen gestattet, wurde ein Verfahren entwickelt, das zusätzlich die Aufzeichnung von Linien gleichen Schallpegels ermöglicht. Die Schalldruckverteilung eines Feldes wird durch 6 Isobaren, deren Schallpegel-Differenz jeweils 5 dB beträgt, dargestellt. Als Anwendungsbeispiele werden Schallfeldaufnahmen eines Kugelstrahlers, einer Gruppe von zwei Einzelstrahlern und einer Modellglocke behandelt.

**Summary** · The mode operation of an apparatus for optically visualizing sound fields in air is described. Starting from the method of *Kock* and *Harvey*, which permits photographic recording of progressive waves, a method was developed that makes possible the additional recording of lines of the same sound level. The sound pressure distribution of a field is represented by 6 isobars, whose level difference in each case is 5 dB. As examples of application, sound field recordings of a spherical emitter, a group of two individual emitters and a model bell are dealt with.

**Résumé** · L'article décrit le fonctionnement d'un appareillage permettant de visualiser des champs sonores dans l'air. En partant de la méthode de *Kock* et *Harvey*, qui permet la représentation photographique d'ondes progressives, on a développé un procédé avec lequel il est possible d'enregistrer aussi des lignes d'égal niveau de pression sonore. La répartition de la pression sonore d'un champ est représentée par 6 isobares dont la différence de niveau est toujours de 5 dB. A titre d'exemple l'article traite de l'enregistrement du champ sonore d'un émetteur sphérique, d'un groupe de deux émetteurs individuels et d'une cloche modèle.

## 1. Einleitung

Für die optische Darstellung von Luftschallfeldern ist nur eine Methode anwendbar, nämlich die Abtastung des Feldes mit einem Sondenmikrophon. Das akustische Signal wird dabei auf elektronischem Wege in ein optisches umgewandelt und an der Sondenöffnung abgebildet. Das Bild kommt dadurch zustande, daß Mikrophon und Lampe in einem verdunkelten Raum eine Ebene des Schallfeldes abtasten. Dieser Vorgang wird von einer Kamera registriert (Abb. 1).

Im Jahre 1950 haben *Kock* und *Harvey* [1] über die Sichtbarmachung von Schallwellen und elektromagnetischen Wellen im cm-Gebiet berichtet. Im Vordergrund stand dabei die Darstellung der fortschreitenden Wellen. Zu dieser Darstellungsart gelangt man, wenn die vom Mikrophon abgegebene Spannung einer phasenstarken Vergleichsspannung überlagert, und die Summenspannung zur Steuerung der Lichtquelle benutzt wird. Das Bild, das man auf diese Weise erhält, ist gewissermaßen eine Momentaufnahme der fortschreitenden Wellen. Die Amplitudenverteilung im Feld wurde durch eine Helligkeitsmodulation der Lampe dargestellt. Diese Methode ist für eine quantitative Auswertung jedoch kaum geeignet, da sie nur über die Graustufung erfolgen kann und daher nicht sehr genau ist. In den vergangenen Jahren haben sich mehrere Autoren [2, 3, 4, 5] mit der Methode von *Kock* und *Harvey* befaßt, ohne daß hinsichtlich der Amplitudenaufzeichnung eine befriedigende Lösung gefunden wurde. Die vorliegende Arbeit berichtet über eine neue Möglichkeit, das Schallfeld nach Phase und Amplitude exakt darzustellen [6, 7]. Die Unsicherheit der Aufzeichnung im Feld ist kleiner als 1 cm, die Pegelunsicherheit bei der

# Die photographische Darstellung stationärer Luftschallfelder

Hans Jürgen Schroeder

Zeichnung der Isobaren kleiner als 0,3 dB. Es können Feldausschnitte von etwa 1 m<sup>2</sup> photographiert werden.

## 2. Aufbau der Meßapparatur

### 2.1. Mechanischer Teil

Der mechanische Teil der Apparatur hat die Aufgabe, das Mikrophon und die Lampe auf einer spiralförmigen Bahn durch das Schallfeld zu führen (Abb. 2). Im Hinblick auf die photographische Registrierung muß der Abstand zwischen zwei benachbarten Rasterlinien konstant und kleiner als die Lichtaustrittsöffnung sein. Dadurch wird erreicht, daß

auf dem Film kein unbelichteter Streifen zwischen den Zeilen zurückbleibt. Damit die Schwärzung des Films ausschließlich von der Helligkeit der Lampe abhängt, mußte der Antrieb für die Abtastvorrichtung so ausgebildet werden, daß die Abtastgeschwindigkeit konstant bleibt (1,3 m/s). Die automatische Drehzahlregelung erfolgt mit einem stufenlosen Getriebe.

### 2.2. Akustisch-elektrischer Teil

Das verwendete Mikrophon ist als Sondenmikrophon ausgebildet, damit es auch für höhere Frequenzen eine Kugelcharakteristik

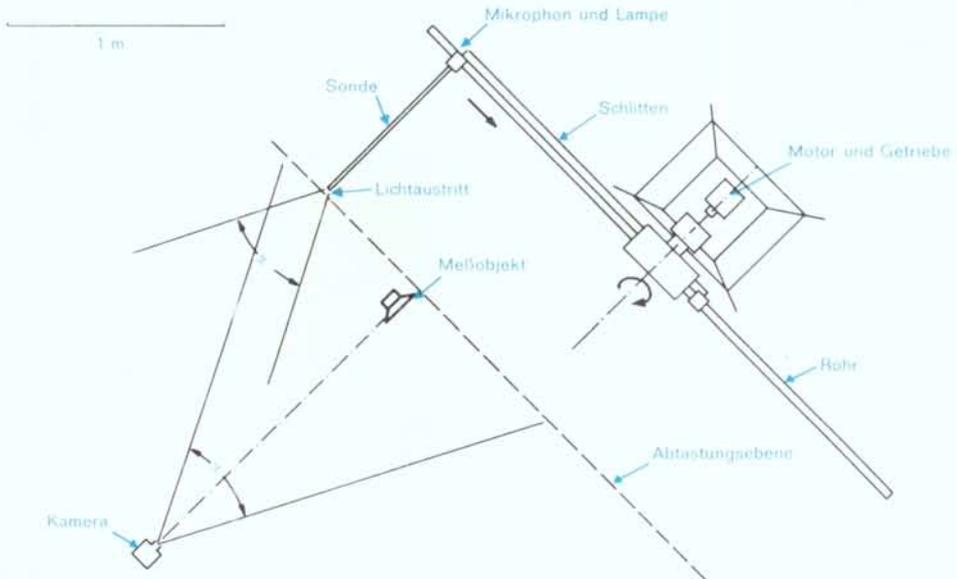


Abb. 1 Grundriß der Meßanordnung

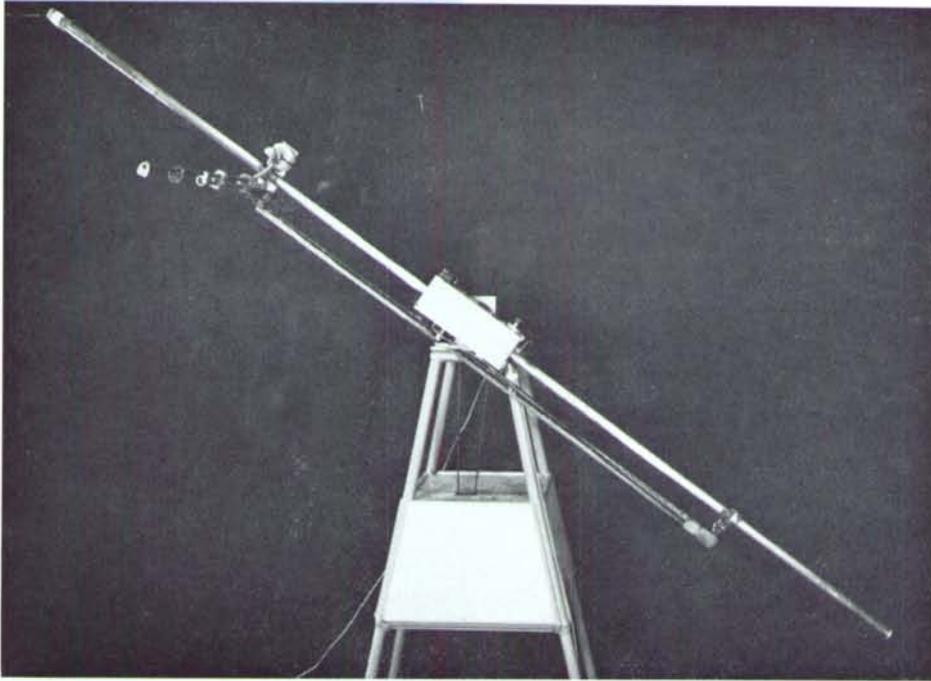


Abb. 2 Abtastvorrichtung

aufweist und keine Schallfeldverzerrungen verursacht. Die Sonde hat eine Länge von 750 mm, einen Innendurchmesser von 8 mm bei einer Wandstärke von 1 mm. Bei diesen Abmessungen entsteht bis zu einer Frequenz  $f = 10$  kHz noch keine nennenswerte Abweichung von der Kugelcharakteristik (Fehler kleiner als 0,5 dB).

### 2.3. Elektronischer Teil

Das vom Mikrophon empfangene Signal wird in einem Vorverstärker verstärkt (Abb. 3). Da trotz sorgfältiger Luft- und Körperschallisolation des Antriebes noch Störungen zum Mikrophon gelangen, müssen diese zunächst beseitigt werden. Hierzu dient das Hochpaßfilter, da die vom Motor stammenden Anteile des Störpegels vorwiegend tiefe Frequenzen enthalten.

Wie sieht nun die Nutzspannung aus, wenn die Schallquelle einen Sinuston sendet? Beim Durchlaufen des Schallfeldes entsteht ein Empfangssignal, das amplituden-, frequenz- und phasenmoduliert ist. Die Amplitudenmodulation entsteht dadurch, daß sich das Mikrophon durch Gebiete unterschiedlichen Schalldrucks bewegt. Die Modulationsfrequenz hängt von der Abtastgeschwindigkeit und der Struktur des Schallfeldes ab. Beim Abtasten ändert sich laufend der Abstand vom Mikro-

phon zur stationären Schallquelle. Hierdurch entstehen die Phasen- und die Frequenzmodulation (*Doppler-Effekt*). Für die Steuerung der Lichtquelle werden die Amplituden- und die Phasenmodulation benutzt.

#### 2.3.1. Phasenkanal

Das phasenmodulierte Signal dient zur Darstellung der fortschreitenden Welle. Im Abstand (Mikrophon-Schallquelle)  $r = \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$  herrschen jeweils gleiche Phasenverhältnisse. Betrachtet man den Phasenwinkel zwischen der Speisespannung für die Schallquelle und der Mikrophonspannung, so dreht sich der Phasenwinkel um  $2\pi$ , wenn das Mikrophon um den Betrag  $\lambda$  von der Quelle fort- oder auf sie zubewegt wird. Diese Tatsache wird zur Phasendarstellung benutzt, indem die Mikrophonspannung einer phasenstarken Vergleichsspannung überlagert wird. Der Betrag der Summenspannung dient zur Modulation des Lampenstromes. Zur Erzielung eines vom Mikrophonabstand unabhängigen Modulationsgrades muß der Betrag der Mikrophonspannung mit einem Begrenzer konstant gehalten werden.

#### 2.3.2. Amplitudenkanal

Zur Sichtbarmachung der Amplitudenverteilung wird die verstärkte und gefilterte Mi-

krophonspannung gleichgerichtet und auf einen Spannungsteiler geschaltet. An ihm befinden sich 6 Abgriffe, die in 5 dB-Stufen die Teilspannungen  $U_1 \dots U_6$  liefern. Jede dieser Teilspannungen steuert einen Spannungsdiskriminator (Schmitt-Trigger). Beim Über- oder Unterschreiten seiner Schwellenspannung entsteht am Ausgang ein positiver oder negativer Impuls. Die Ausgänge der 6 Diskriminatoren sind parallelgeschaltet. Die Wirkungsweise dieser Apparatur ist folgende: Bei größer werdender Mikrophonspannung erreicht die größte der Teilspannungen ( $U_1$ ) zuerst die Ansprechspannung des zugehörigen Diskriminators 1, der daraufhin einen Impuls liefert. Ist der Schallpegel an der Sonden Spitze um 5 dB angestiegen, so hat die zweitgrößte Teilspannung  $U_2$  gerade den Wert erreicht, der erforderlich ist, um den Diskriminator 2 anzusprechen zu lassen. Beim weiteren Steigen des Schallpegels erreichen nacheinander die Teilspannungen  $U_3 \dots U_6$  die Ansprechspannungen ihrer Diskriminatoren, so daß jeweils im Abstand von 5 dB ein Impuls abgegeben wird. Dasselbe geschieht in umgekehrter Reihenfolge, wenn sich der Schallpegel verringert: Die Teilspannungen steuern ihre Diskriminatoren in den Ausgangszustand um, wobei jetzt Impulse in umgekehrter Richtung erzeugt werden. Auf diese Weise entstehen beim Über- oder Unterschreiten definierter Schallpegel Impulse, die nach Gleichrichtung zur Steuerung der Lampe benutzt werden. Auf dem Film ergeben sich daraus bei der photo-

graphischen Registrierung des Abtastvorganges Linien gleichen Schallpegels. Die Impulshöhe wurde zur besseren Unterscheidung dieser Linien so abgestuft, daß der Diskriminator 6, der die Linie für den größten Schallpegel zeichnet, auch die größte Amplitude erhält. Damit wird diese Isobare sehr hell und die anderen dagegen entsprechend weniger hell ausgesteuert.

Im Misch- und Endverstärker werden die zur Verfügung stehenden Informationen (Impulse des Amplitudenkanals, die gefilterte und verstärkte Mikrophonspannung, sowie die phasenstarre Vergleichsspannung) in geeigneter Weise gemischt, verstärkt und der Lampe zugeführt.

#### 2.4. Elektrisch-optischer Teil

Die Ausgangsspannung des Endverstärkers muß in einen äquivalenten Lichtstrom umgewandelt werden. Damit diese Umwandlung unverzerrt erfolgen kann, hat die Lampe eine Reihe von Bedingungen zu erfüllen. Die wichtigsten sind: Trägheitsarme Helligkeitsmodulation (obere Grenzfrequenz größer als 1 kHz), großer Modulationsbereich und ausreichende Lichtstärke. Außerdem soll die Lichtquelle möglichst punktförmig sein und die Lampe kleine Abmessungen haben. Verwendet wurde eine Punktlichtglühlampe (Osram 767740), die 80 mm lang war und daher nicht an der Sondenöffnung montiert werden konnte, ohne das Schallfeld zu stören.

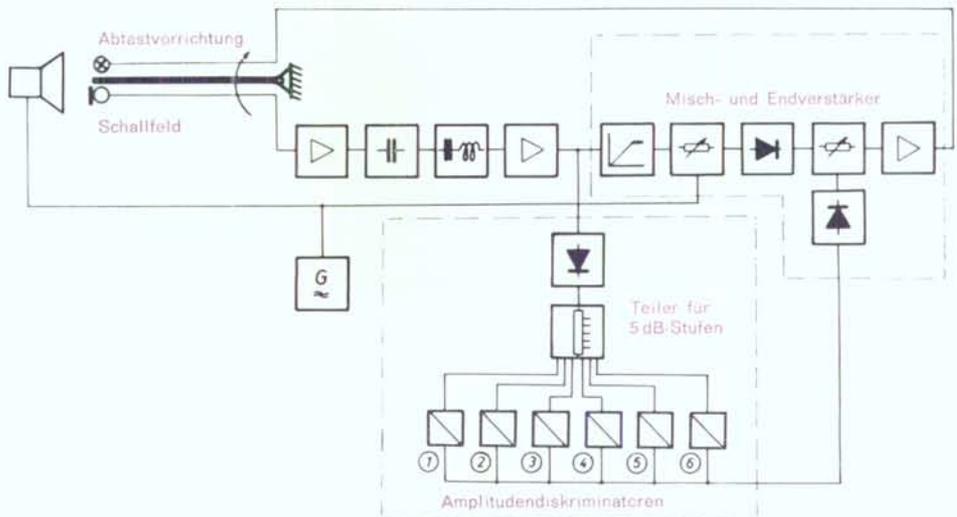


Abb. 3 Blockschaltbild

Es wurde daher an der Sondenspitze ein Sekundärstrahler angebracht.

### 2.5. Photographische Registrierung und Abbildungsfehler

Um eine gleichmäßige Belichtung des Films in bezug auf den Raumwinkel zu erhalten, ist eine entsprechende Lichtverteilungskurve des Strahlers erforderlich. Danach hat die Lichtstromlenkung so zu erfolgen, daß die von der Lampe ausgehende divergente Strahlung zunächst gebündelt und parallel zur Sonde bis zur Sondenspitze geführt wird. Sie trifft hier auf den Sekundärstrahler, der die gewünschte räumliche Verteilung vornimmt. Als Strahler dient eine kleine plankonvexe Linse von etwa 8 mm Durchmesser, deren Oberfläche auf der planen Seite aufgeraut ist und dadurch als Mattglas eine zusätzliche Streuung bewirkt.

Da der Wirkungsgrad dieser Lichtstromumformung nicht sehr groß ist, muß auf der photographischen Seite mit großer Empfindlichkeit gearbeitet werden (Lichtstarkes Objektiv, Film Agfa-Rekord).

Die Verzögerungszeit zwischen der akustischen Messung an der Sondenspitze und der optischen Anzeige bewirkt eine Verzeichnung um den Betrag, um den sich Mikrophon und Lampe inzwischen fortbewegt haben. Bei der Phasendarstellung liegt die Verzögerungszeit bei etwa 10 ms. Bei der Amplitudenaufzeichnung ist sie wegen der Hysterese der Diskriminatoren nicht konstant, sondern von der Steilheit des Spannungsanstiegs abhängig. Sie kann etwas größere Werte erreichen. Der hierdurch entstehende Abbildungsfehler wird auf einfache Weise dadurch korrigiert, daß der Ort der optischen Abbildung (Mattscheibe an der Sondenspitze) um die der mittleren Verzögerungszeit entsprechende Wegstrecke verlegt wird. Das Lichtsignal wird dann an der Stelle registriert, an der sich die Sondenachse vor 10 ms befunden hat. Eine geringfügige Ungenauigkeit bleibt noch bestehen. Diese bewirkt eine Verzeichnung von wenigen Millimetern. In den meisten Fällen ist das jedoch belanglos, da diese Abweichungen in den verkleinerten Abbildungen nicht mehr erkennbar sind.

Die optische Abbildung des Schallfeldes wird durch nachträgliche Einblendung eines Koordinatennetzes (Abstand der Gitterlinien 10 cm) ergänzt.

## 3. Anwendungen

### 3.1. Schallfeldaufnahmen eines Kugelstrahlers

Am einfachsten ist der Fall der ungebündelten Strahlung zu übersehen, der bei einem Kugelstrahler nullter Ordnung auftritt. Hierbei

schwingen die einzelnen Elemente der Kugeloberfläche mit konstanter Geschwindigkeitsamplitude konphas nach außen und innen. Das Schallfeld eines solchen Strahlers ist dadurch gekennzeichnet, daß sowohl die Flächen gleicher Phase wie auch die Flächen gleicher Schalldruckamplitude durch konzentrische Kugeln gebildet werden, deren gemeinsamer Mittelpunkt der Strahler ist.

Technisch läßt sich ein Strahler nullter Ordnung in Form einer atmenden Kugel nicht verwirklichen. Man erhält jedoch bei Strahlern, deren Abmessungen hinreichend klein gegenüber der Wellenlänge sind, auch eine kugelförmige Schallabstrahlung. Für die Versuche wurde ein magnetischer Kleinhörer mit folgenden Abmessungen verwendet: Durchmesser 20 mm, Höhe 11 mm und Durchmesser der Schallaustrittsöffnung 2 mm. Im folgenden soll untersucht werden, wie weit sich die Kugelcharakteristik realisieren läßt.

Bei der Schallfelddarstellung wird ein Schnitt durch das Feld gelegt. In dem vorliegenden Fall legt man die Schnittebene am zweckmäßigsten durch den Ursprung. Wegen der endlichen Abmessungen des Strahlers läßt sich das zwar nicht exakt verwirklichen, doch sind die entstehenden Abweichungen sehr gering.

Die Kurven konstanter Phase ergeben in der Schallfelddarstellung konzentrische Kreise, deren Abstand gleich der Wellenlänge ist. Für die Aufnahme (Abb. 4) wurde eine Frequenz  $f = 3,4$  kHz gewählt, wobei die Wellenlänge dann  $\lambda = 10$  cm beträgt.

Die Linien gleichen Schallpegels bilden zwar auch konzentrische Kreise, deren Abstand aber nicht konstant ist, sondern sich aus dem Ausbreitungsgesetz ergibt. In der Kugelwelle nimmt der Schalldruck immer – auch im Nahfeld – mit  $1/r$  ab. Die 6 Isobaren werden jeweils in 5 dB-Stufen des Schallpegels aufgezeichnet. Bezeichnet man die Isobaren so, daß dem relativen Schallpegel 0 dB die Isobare 1, dem Pegel 5 dB die Isobare 2 zugeordnet wird, so entspricht die Isobare 6 dem größten Pegel 25 dB. Für einen Kugelstrahler ergeben sich dann aus dem  $1/r$ -Gesetz die folgenden Aufpunktabstände:  $r_6, r_5 = 1,78 r_6, r_4 = 3,16 r_6, r_3 = 5,6 r_6, r_2 = 10,0 r_6$  und  $r_1 = 17,8 r_6$  (die Indizes entsprechen der Nummerierung der Isobaren).

Betrachtet man nun die Abb. 5, die die Schalldruckverteilung des Feldes bei einer Frequenz  $f = 4$  kHz wiedergibt, so sieht man in der Nähe des Strahlers die erwarteten konzentrischen Kreise. Mit zunehmendem Abstand verlieren die Kurven allmählich ihre Kreisform,



Abb. 4 Schallfeldaufnahme eines Kugelstrahlers. Phasendarstellung.  $f = 3,4$  kHz.

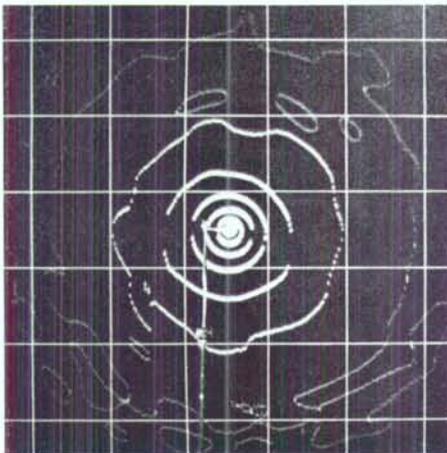


Abb. 5 Schallfeldaufnahme eines Kugelstrahlers. Amplitudendarstellung.  $f = 4$  kHz.

und es treten wellige Einbrüche auf. Außerdem bilden sich einzelne Inseln zwischen den konzentrischen Kurvenzügen.

Diese Abweichungen von der theoretisch zu erwartenden Kurvenform sind eine Folge von Reflexionen, die im Aufnahmeraum entstehen. Der Raum ist zwar stark schallgedämpft, jedoch nicht völlig reflexionsfrei. Die Auswertung dieser Aufnahme ergibt, daß die Welligkeit der Isobaren 1 und 2 durch Pegelschwankungen hervorgerufen werden, die  $\pm 0,8$  dB bzw.  $\pm 0,6$  dB betragen. Diese Störungen sind an und für sich geringfügig und dürften bei den meisten Meßaufgaben nicht stören. Daß sie in der Schallfeldphotographie so auffällig in Erscheinung treten, liegt einmal in der Natur des  $1/r$ -Abfalls und zum andern an der exakten Aufzeichnungsmethode, die jede Einzelheit des Feldes erkennen läßt. Bei der gewohnten graphischen Darstellung von Schallfeldern, die durch punktwises Ausmessen ermittelt wurden, können diese Feinheiten nicht zum Vorschein kommen. Die Auswertung von Abb. 5 zeigt ferner, daß der Schalldruck nicht genau mit  $1/r$  abfällt, sondern steiler. Die Differenz beträgt bei dem größten Abstand etwa 2 dB. Bei der vorliegenden Frequenz ist das Verhältnis  $D/\lambda = 1/4,25$ .

Ein weiterer Versuch wurde mit einer 6 mm starken Sonde durchgeführt: Auf der einen Seite des Rohres war ein Kleinhörer angekoppelt, an dem anderen Ende erfolgte die Schallabstrahlung. Bei gleicher Frequenz war hierbei das Verhältnis  $D/\lambda = 1/14,2$ . In diesem Fall ergab die Auswertung der Schallfeldaufnahme innerhalb der Meßunsicherheit keine Abweichung mehr vom  $1/r$ -Verlauf.

### 3.2. Die Gruppe von zwei Einzelstrahlern

In diesem Abschnitt sollen experimentell gewonnene Schallfeldaufnahmen graphischen Darstellungen berechneter Felder gegenübergestellt werden.

Eine Gruppe von zwei Einzelstrahlern ergibt im Nahfeld eine sehr komplizierte Feldstruktur. Bei der theoretischen Untersuchung des Feldes ist man gezwungen, eine Vielzahl von Punkten zu berechnen, um das gesamte Feld durch Interpolation übersehen zu können. Stenzel und Brosze [8] haben für einige spezielle Beispiele graphische Darstellungen berechneter Felder angegeben. Hierbei werden, wie bei den Schallfeldaufnahmen, die Felder durch Linien konstanter Schalldruckamplitude und gleicher Phase dargestellt, und zwar in der Strahlerebene, die durch die beiden Strahler und den Aufpunkt definiert ist. Es lassen sich also die Resultate der theoretischen Berechnung unmittelbar mit dem praktischen

Meßergebnis in Form der Schallfeldphotographie vergleichen.

Bei der Berechnung der Felder wurde vorausgesetzt, daß die beiden Strahler von nullter Ordnung und ihre Abmessungen klein zur Wellenlänge sind. Der Abstand der beiden Schallquellen beträgt  $d = 2\lambda$ . Der zwischen den beiden Strahlern bestehende Unterschied der Anfangsphasen wird mit  $\Psi$ , das Verhältnis der beiden Anfangsamplituden mit  $b$  bezeichnet.

Für die Aufnahmen der Schallfelder dienten zwei magnetische Kleinhörer als Strahler. Für die Phasendarstellung betrug die Frequenz  $f = 6,8$  kHz, bei der Amplitudenaufzeichnung  $f = 3,4$  kHz. Die Ausschnitte der Vergrößerungen wurden so gewählt, daß sie dem Maßstab der von *Stenzel* und *Brosze* angegebenen Schallfeldendarstellung etwa entsprechen.

Als Beispiel für die Gegenüberstellung ist folgender Fall angeführt: Beide Einzelstrahler haben gleiche Anfangsamplitude ( $b = 1$ ) und gleiche Anfangsphase ( $\Psi = 0$ ). Abb. 6 zeigt die Schallfeldaufnahme in der Phasendarstellung und Abb. 7 zum Vergleich die entsprechende graphische Darstellung nach *Stenzel* und *Brosze*. Die Amplitudendarstellung ist in den Abbildungen 8 (Schallfeldaufnahme) und 9 (graphische Darstellung) wiedergegeben. Vergleicht man die Schallfeldaufnahmen mit

den theoretisch ermittelten Feldbildern, so fällt eine gute Übereinstimmung auf. Dabei ist jedoch noch folgendes zu berücksichtigen: In der graphischen Darstellung des Phasenverlaufes sind die Linien konstanter Phase im Abstand von  $\pi/4$  gezeichnet, während bei der Photographie der Abstand  $2\pi$  beträgt. Bei den Linien gleicher Schalldruckamplituden besteht ebenfalls ein Unterschied. Während bei den Schallfeldaufnahmen der Abstand zwischen zwei Linien einer Schallpegeldifferenz von 5 dB entspricht, haben *Stenzel* und *Brosze* einen linearen Maßstab gewählt. Hier sind den Linien die Schalldruckamplituden  $0,25 p$ ,  $0,5 p$ ,  $0,75 p$ ,  $1,0 p$ ,  $1,5 p$  und  $2,0 p$  zugeordnet.

### 3.3 Untersuchung einer Modellglocke

Bei der Glocke spricht man von einem »Klang«. Die Frequenzanalyse ergibt ein Linienspektrum: Der Klang ist aus verschiedenen Teiltönen zusammengesetzt. Jedem dieser Teiltöne ist eine bestimmte Schwingungsform der Glocke zugeordnet und infolgedessen hat auch jede Eigenschwingung »ihr« Schallfeld. Das Schwingungsverhalten von Glocken wurde schon vor über 100 Jahren von *H. v. Helmholtz* [9] untersucht. Er stellte fest, daß bestimmte Kombinationen von Knotenlänglinien (-meridianen) und Knotenringen die Schwingungsformen bei den einzelnen Teiltönen bestimmen.

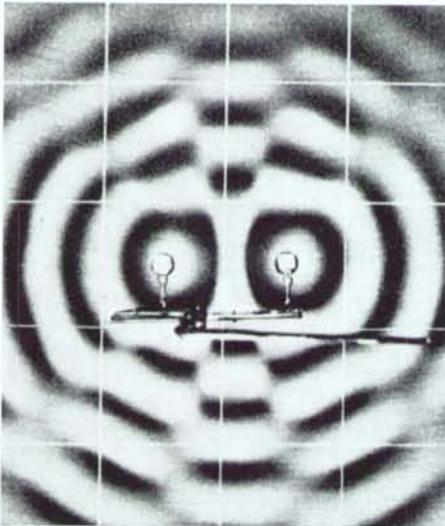


Abb. 6 Schallfeldaufnahme eines Gruppenstrahlers. Phasendarstellung.  $b = 1$ ;  $\Psi = 0^\circ$ ;  $f = 6,8$  kHz.

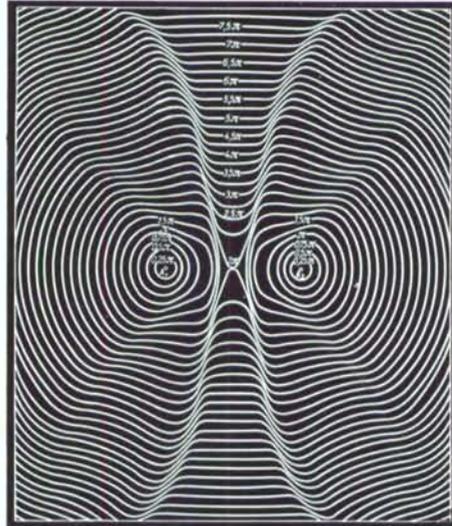


Abb. 7 Schallfeld eines Gruppenstrahlers in graphischer Darstellung. Linien konstanter Phase.  $b = 1$ ;  $\Psi = 0^\circ$ . (Entnommen aus [8].)

Die optische Schallfelddarstellung einer Glocke ist in zweifacher Hinsicht interessant: Einmal gibt sie Aufschluß über die Zusammensetzung des Gesamtschallfeldes aus den Schallfeldern der Teiltöne, zum andern läßt sich hieraus meist ohne Schwierigkeit auf das Schwingungsverhalten des Strahlers schließen.

### 3.3.1. Die Aufnahme der Schallfelder

Beim Läuten einer Glocke werden durch den Anschlag des Klöppels alle Teiltöne gleichzeitig angeregt und klingen dann entsprechend ihrer Dämpfung wieder ab. Aus zwei Gründen ist diese Anregungsart für die Aufnahme des Schallfeldes nicht geeignet: Erstens sind für die Dauer der Aufnahme die Schallfeldgrößen nicht konstant und zweitens entstehen dabei alle Teiltonfrequenzen, so daß man gezwungen wäre, die gewünschte Frequenz herauszufiltern. Hierdurch würden wegen der Einschwingzeiten der Filter leicht Fehler entstehen.

Diese Schwierigkeiten lassen sich dadurch vermeiden, daß man nur eine Eigenschwingung der Glocke anregt, und zwar mit einem elektromechanischen Wandler. Bei den Versuchen wurde ein Schallplattenschneidsystem verwendet, das, am Glockenmund angesetzt, einen Punkt zu sinusförmigen, radialen Schwingungen erregte.

Bei den Aufnahmen betrug der Abstand zwischen der Sondenspitze und dem Meßobjekt

etwa 1 cm, so daß, vom Betrachter aus gesehen, die Abtastungsebene unmittelbar hinter der Glocke lag.

### 3.3.2. Auswertung der Schallfeldaufnahmen

Im Hinblick auf die jeweilige Schwingungsform erfolgt die Auswertung nach folgendem Schema:

Die Aufsicht der Glocke, bzw. die Ansicht von unten (Abtastungsebene senkrecht zur Glockenachse) vermittelt ein Bild über die Lage und Anzahl der Knotenmeridiane. Diese lassen sich sowohl aus der Phasen- wie auch aus der Amplitudendarstellung entnehmen. Bei den Phasenbildern sind radial angeordnete Phasensprungzonen zu erkennen. Im Gebiet des Phasensprunges ist die Schalldruckamplitude gleich Null, da die maximale Schallabstrahlung über den Schwingungsbäuchen erfolgt. Die Linien gleichen Schallpegels ergeben daher ein Bild, das durch sternförmig angeordnete Keulen gekennzeichnet ist. Aus beiden Darstellungsarten lassen sich Lage und Anzahl der Knotenmeridiane ablesen. Beispiele für Schwingungsformen mit 4, 6, 8 und 10 Knotenmeridianen zeigen die Abb. 10 a, b, c und 11.

Aufschluß über die seitliche Schallabstrahlung und damit über die Existenz von Knotenringen geben die Schallfeldaufnahmen, die die Seitenansicht der Glocke zeigen. Hierbei ist die Auswertung etwas schwieriger. Man muß

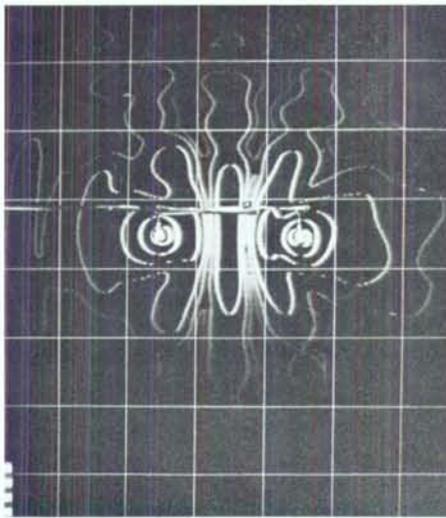


Abb. 8 Schallfeldaufnahme eines Gruppenstrahlers. Amplitudendarstellung.  $b = 1$ ;  $\Psi = 0^\circ$ ;  $f = 3,4$  kHz.

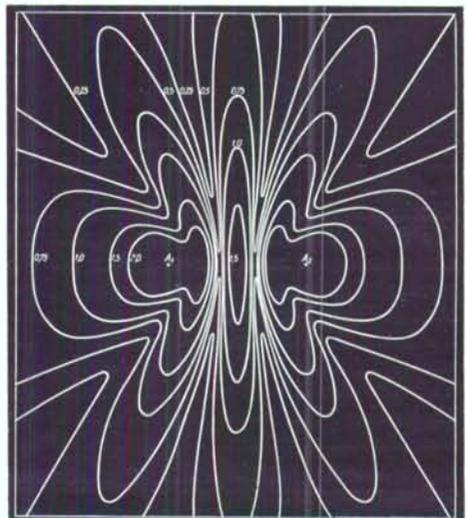
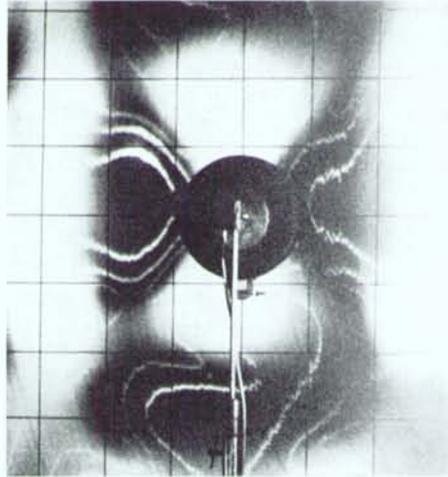


Abb. 9 Schallfeld eines Gruppenstrahlers in graphischer Darstellung. Linien konstanter Schalldruckamplitude.  $b = 1$ ;  $\Psi = 0^\circ$ . (Entnommen aus [8].)

Abb. 10 Schallfeldaufnahmen einer Modellglocke. Kombinierte Phasen- und Amplitudendarstellung bei Anregung verschiedener Eigenschwingungen. Frequenzen der Teiltöne:

- a) 1,4 kHz (4 Knotenmeridiane)
- b) 3,35 kHz (6 Knotenmeridiane)
- c) 6,0 kHz (8 Knotenmeridiane)



10 a

Abb. 11 Schallfeldaufnahme einer Modellglocke. Phasendarstellung bei Anregung der Eigenschwingung  $f = 9,0$  kHz (10 Knotenmeridiane).



11

Abb. 12 Schallfeldaufnahmen einer Modellglocke (Seitenansicht). Kombinierte Phasen- und Amplitudendarstellung bei Anregung der Eigenschwingungen

- a)  $f = 3,35$  kHz (kein Knotenring)
- b)  $f = 4,7$  kHz (ein Knotenring)

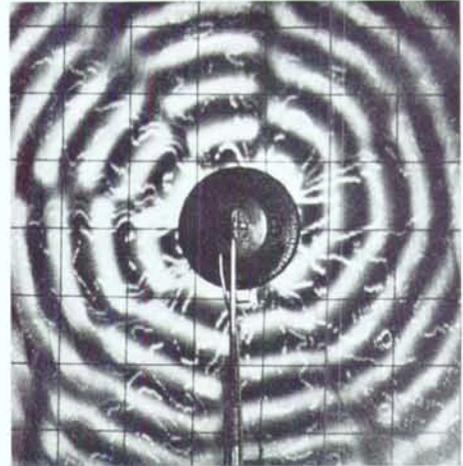
sich zunächst noch einmal vergegenwärtigen, daß die Schnittebene *hinter* der Glocke liegt und daß die Keulen, die radial von der Glocke ausgehen, also geschnitten werden. Bei der Schallabstrahlung sind zwei Anteile zu unterscheiden: Einmal der von dem schwingenden Glockenmantel nach *außen* abgestrahlte Schall, der in der Abtastungsebene in der Nähe der strahlenden Fläche aufgezeichnet wird (Abb. 12). Die Aufzeichnung ist zum Teil von der Glocke verdeckt. Zum andern findet eine Schallabstrahlung in Richtung auf das Glockeninnere statt. Durch die Öffnung des Glockenmundes gelangt dieser Schallanteil entweder direkt oder nach Reflexion an der gegenüberliegenden Wand nach außen. In den Schallfeldaufnahmen ist dieser Anteil vor dem Glockenmund zu erkennen. Für die Auswertung kommt in erster Linie

der vom äußeren Glockenmantel abgestrahlte Schall in Betracht. Wenn ein Knotenring existiert, muß in jedem Fall der Schalldruck hinter der Glocke auf einer zur Glockenachse senkrechten Linie Null werden. Dieses läßt sich aus der Lage der Isobaren ablesen (Abb. 12 a). Dagegen ist Abb. 12 b ein Beispiel dafür, daß kein Knotenring vorhanden ist. Das Phasenbild spielt für die Identifizierung keine so große Rolle wie bei den Feldbildern in der radialen Ebene.

Auf diese Weise lassen sich für alle Teiltöne die Schwingungsformen der Glocke ermitteln. Mit zunehmender Frequenz schwingt eine Glocke mit einer immer größer werdenden Anzahl unterteilter Elemente. Die Unterteilung erfolgt nach bestimmten Gesetzen durch neu hinzukommende Knotenmeridiane und -ringe [10, 11].



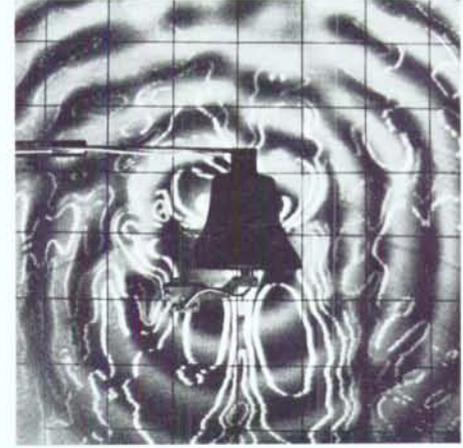
10b



10c



12a



12b

#### Literatur / Bibliography

- [1] Kock, W. E. and Harvey, F. K., Sound wave and microwave space patterns. *Bell Syst. Techn. J.* 30 (1951), 564.
- [2] Canac, F., Propagation, interférence, réflexion, absorption, diffusion des ondes sonores et ultrasonores visualisées par la méthode de stries. *Acustica* 4 (1954), 320.
- [3] Gavreau, V. et Calaora, A., Enregistreur automatique de lignes d'égal déphasage. *Acustica* 6 (1956), 539.
- [4] Hübner, G., Die Spiralaustastmethode zur Messung stationärer Schallfelder. *Acustica* 7 (1957), 191.
- [5] Jablonska, H., Eine photographische Methode zur Messung stationärer Schallfelder. *Acustica* 8 (1958), 63.
- [6] Schroeder, H. J., Ein optisches Verfahren zur amplituden- und phasengetreuen Darstellung stationärer Schallfelder. Dissertation TH. Braunschweig 1962.
- [7] Schroeder, H. J., Optische Schallfelddarstellung mit Phasen- und Amplitudenaufzeichnung. *Acustica* 13 (1963), 92.
- [8] Stenzel, H. und Brosze, O., Leitfaden zur Berechnung von Schallvorgängen. Springer-Verlag, Berlin 1958.
- [9] Helmholtz, H. v., Die Lehre von den Tonempfindungen. 6. Aufl. Vieweg und Sohn, Braunschweig 1913.
- [10] Stüber, C. und Kallenbach, W., Akustische Eigenschaften von Glocken. *Phys. Blätter* 5 (1949), 268.
- [11] Grützmaier, M., Über die Klänge von Glocken und Orgeln. *Proc. of the I. ICA Congr. Delft* (1953), 226.