

Technischer Bericht Nr. 55

Untersuchung von Richtcharakteristiken eindimensionaler
Strahler mit Anwendung auf die Entwicklung von zwei
Richtlautsprechern für das Gebiet um 4000 Hz

von

cand. ing. A. von MEIER
Dipl.-Ing. D. SCHWARZE

Berlin
1 9 6 1

Untersuchung von Richtcharakteristiken eindimensionaler
Strahler mit Anwendung auf die Entwicklung von zwei Richt-
lautsprechern für das Gebiet um 4000 Hz

Zusammenfassung

Ausgehend von der Theorie der Richtwirkung von eindimensionalen Strahlern und Strahlergruppen, wurde zum Anpeilen und Einstellen von Schallreflektoren ein Richtlautsprecher entwickelt. Für eine möglichst vielseitige raumakustische Anwendung wurde die Entwicklung mit dem Ziel einer Unterdrückung der "Nebenkeulen" im Richtdiagramm weitergeführt. Einige praktische Anwendungen erläutern den Wirkungsbereich des Richtlautsprechers.

Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung

Die Bearbeiter

gez. von Meier

(cand.ing.A. von Meier)

gez. Schwarze

(Dipl.-Ing. D. Schwarze)

Der Abteilungsleiter

gez. Cremer

(Prof.Dr.-Ing.L. Cremer)

Der Institutsdirektor

gez. Cremer

(Prof.Dr.-Ing.L. Cremer)

Berlin-Charlottenburg, den 27. September 1961

I. Problemstellung

Um Reflexionsverhältnisse in Räumen experimentell untersuchen zu können, wird ein Richtlautsprecher gefordert, der eine möglichst große Peilschärfe besitzt, um damit dem Bild eines Schallstrahles weitgehend nahe zu kommen. Die Strahlrichtung soll dabei mit einer optischen Anzeige verbunden sein.

Diese Aufgabenstellung hat sich besonders aus der Erfordernis ergeben, die Reflektoren im Großen Sendesaal des Sender Freies Berlin (SFB) akustisch anpeilen zu können, und sie in die vom Tonmeister erachtete optimale Stellung zu bringen. Dabei sollte im Sinne der möglichst einfachen Anwendung eines solchen Gerätes das Ohr als Indikator für den reflektierten Schallstrahl dienen. Somit fiel die Wahl der Sendefrequenz in das Gebiet der größten Hörempfindlichkeit auf 4 kHz, als Mittenfrequenz eines zumindest frequenzgruppenbreit abstrahlenden Sendegeräusches. Die Hauptabmessung des Strahlers war in eine Richtung zu legen und sollte möglichst klein sein. Die erste technische Lösung des Problems, eine scharfe Richtcharakteristik durch eindimensionale Strahler- bzw. Empfängerformen zu erzielen, gaben MASON u. MARSHALL mit ihrem Richtmikrophon, das aus mehreren verschieden langen Rohren bestand /1/. In neuerer Zeit ist die Entwicklung von KURTZE u. TAMM wieder aufgenommen und erweitert worden /2/, /3/.

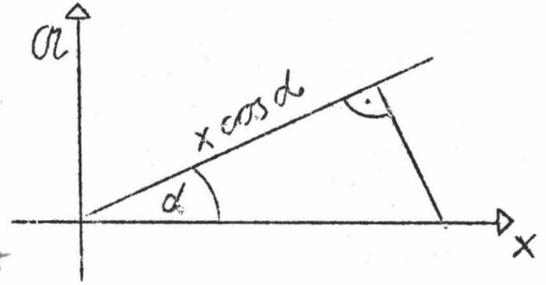
II. Theorie der Richtwirkung von eindimensionalen Strahlern

Zur Untersuchung der theoretischen Voraussetzungen für die Konstruktion des Richtsenders wird von der Frage ausgegangen, wie eine vorgegebene Richtcharakteristik durch Wahl einmal einer eindimensionalen kontinuierlichen Amplitudenbelegungsfunktion angenähert werden kann, zum anderen wie diese Approximation durch eine diskontinuierliche Amplitudenverteilung nach dem Gruppenstrahlerprinzip erreicht wird.

- a) Die geforderte Richtcharakteristik möge durch eine kontinuierliche Amplitudenbelegungsfunktion realisiert werden. Die Belegungsfunktion heiße $A(x)$ und der Anteil eines Linienelementes $A(x) dx$

Die Richtcharakteristik ergibt sich jetzt durch Addition der differentiellen Anteile im unendlich fernen Aufpunkt:

$$R(\alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{U}(x) e^{j k x \cos \alpha} dx \quad (1)$$



Im allgemeinen ist $\mathcal{U}(x)$ eine komplexe Funktion von x , also nach Betrag und Phase bestimmt. Ist nun $R(\alpha)$ gegeben, so ermittelt sich die Belegungsfunktion nach der Fourier-Transformation:

$$\mathcal{U}(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R(u) e^{-j x u} du \quad (2)$$

$$u = k \cos \alpha$$

Die Amplitudenverteilung ist danach aufzufassen als die Fourier-Transformierte der Richtcharakteristik /4/. Bei der Auswertung des Integrals ist zu beachten, daß $R(u)$ durch $|u| \leq k$ begrenzt ist, da die Richtcharakteristik ja nur für $|\cos \alpha| \leq 1$ definiert ist. Durch hinzugefügte beliebige Funktionsverläufe für $|u| > k$ unter der Bedingung, daß das Integral (2) zur Konvergenz gebracht werden kann, erhält man unendlich viele Belegungsfunktionen mit der gleichen Richtcharakteristik.

Zur Veranschaulichung dieser Mehrdeutigkeit⁺ der Belegungsfunktionen für ein und denselben Betrag der Richtcharakteristik sei folgendes Beispiel angeführt:

Gefordert sei eine kugelförmige Richtcharakteristik

$$R(u) = 1$$

$$-\infty \leq u < +\infty$$

Dann ist

$$\mathcal{U}(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j x u} du$$

$$\mathcal{U}(x) = \delta(x)$$

⁺) Die Mehrdeutigkeit gilt jedoch nicht für die vollständige Ortsfunktion des Wellenfeldes. Bei der vorangegangenen Darstellung sind auch nur reelle Werte für die Wellenzahl k herangezogen worden.

Sie wird also realisiert durch einen Punktstrahler.

Ist jedoch

für $R(u) = 1$
 $-k \leq u \leq k$ und wird unter beliebig vielen Möglichkeiten

für $R(u) = 0$
 $|u| > k$ gesetzt, so ist

$$\mathcal{R}(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-k}^{+k} e^{-ixu} du$$

$$\mathcal{R}(x) = \frac{1}{\pi} \frac{\sin kx}{x}$$

Dieselbe Richtcharakteristik wird also auch durch die Spaltfunktion verwirklicht.

Demnach kann nur mit (1) unter Vorgabe verschiedener Belegungsfunktionen die dazugehörige Richtcharakteristik berechnet werden. KURTZE und TAMM haben für ihr bereits zitiertes Richtmikrophon eine konstante durch die Länge l_0 begrenzte Belegungsfunktion vorgegeben, deren Phasenverlauf, entsprechend der Konstruktion eines längsgeschlitzten Rohres, dem einer fortschreitenden ebenen Welle entspricht.

$$\mathcal{R}(x) = \frac{A_0}{I_0} e^{-jkx}$$

$$0 \leq x \leq l_0$$

Der konstante Betrag $\frac{A_0}{I_0}$ wird durch eine Schlitzabdeckung mit zum Ende des Rohres abnehmenden Strömungswiderstand erreicht.

Mit (1) erhält man die Richtcharakteristik zu:

$$\mathcal{R}(\alpha) = \frac{A_0}{I_0} \int_0^{l_0} e^{jkx(\cos \alpha - 1)} dx$$

$$\mathcal{R}(\alpha) = A_0 \frac{e^{jkl_0(\cos \alpha - 1)} - 1}{jkl_0(\cos \alpha - 1)} \quad (3)$$

In Bild 1a ist die Ortskurve von (3) aufgetragen. Darunter in 1b der Betrag von (3) als Richtcharakteristik.

Aus Bild 1a lassen sich einige grundlegende Eigenschaften dieses Strahlertyps festlegen:

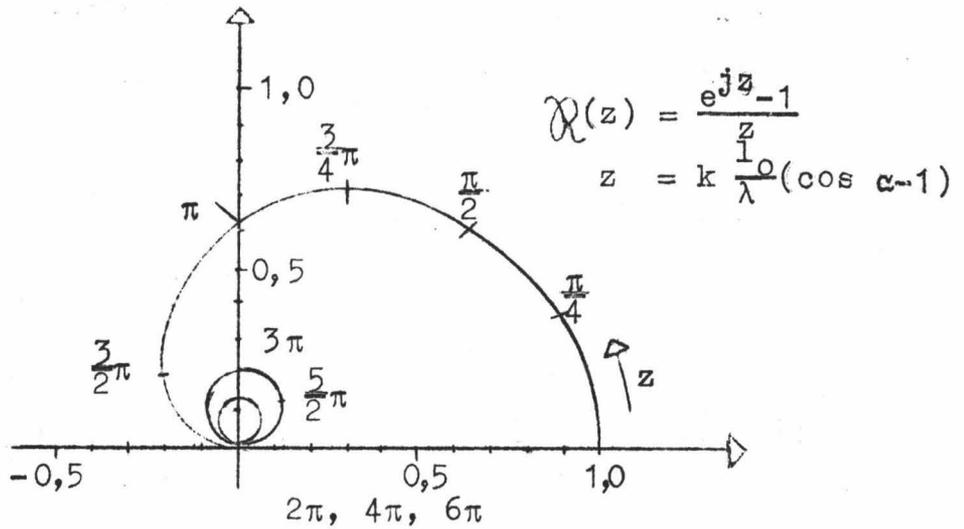


Bild 1a: Ortskurve von (3). Nach /2/

1. Die Nebenkeulendämpfung, d.h. die Größe des ersten Nebenmaximums, ist konstant ($D_N = 13,5$ dB).
2. Die Halbwertbreite oder Peilschärfe wird um so günstiger, je größer das Verhältnis $\frac{l_0}{\lambda}$ ist. Die quantitative Beziehung folgt aus (3):

$$|R(\alpha)| = R(\alpha) = A_0 \frac{\sin \frac{kl_0}{2} (\cos \alpha - 1)}{\frac{kl_0}{2} (\cos \alpha - 1)}$$

$$R(\alpha) = A_0 \frac{\sin u}{u}$$

Für die Halbwertsbreite gilt

$$\frac{\sin u}{u} = \frac{1}{2} \sqrt{2}$$

$$u \approx \pm 1,4 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{l_0}{2} (\cos \alpha - 1)$$

$$\cos \alpha_H \approx \pm 1,4 \frac{\lambda}{\pi l_0} + 1$$

$$\alpha_H \approx \pm \sqrt{0,9 \frac{\lambda}{l_0}} \tag{4}$$

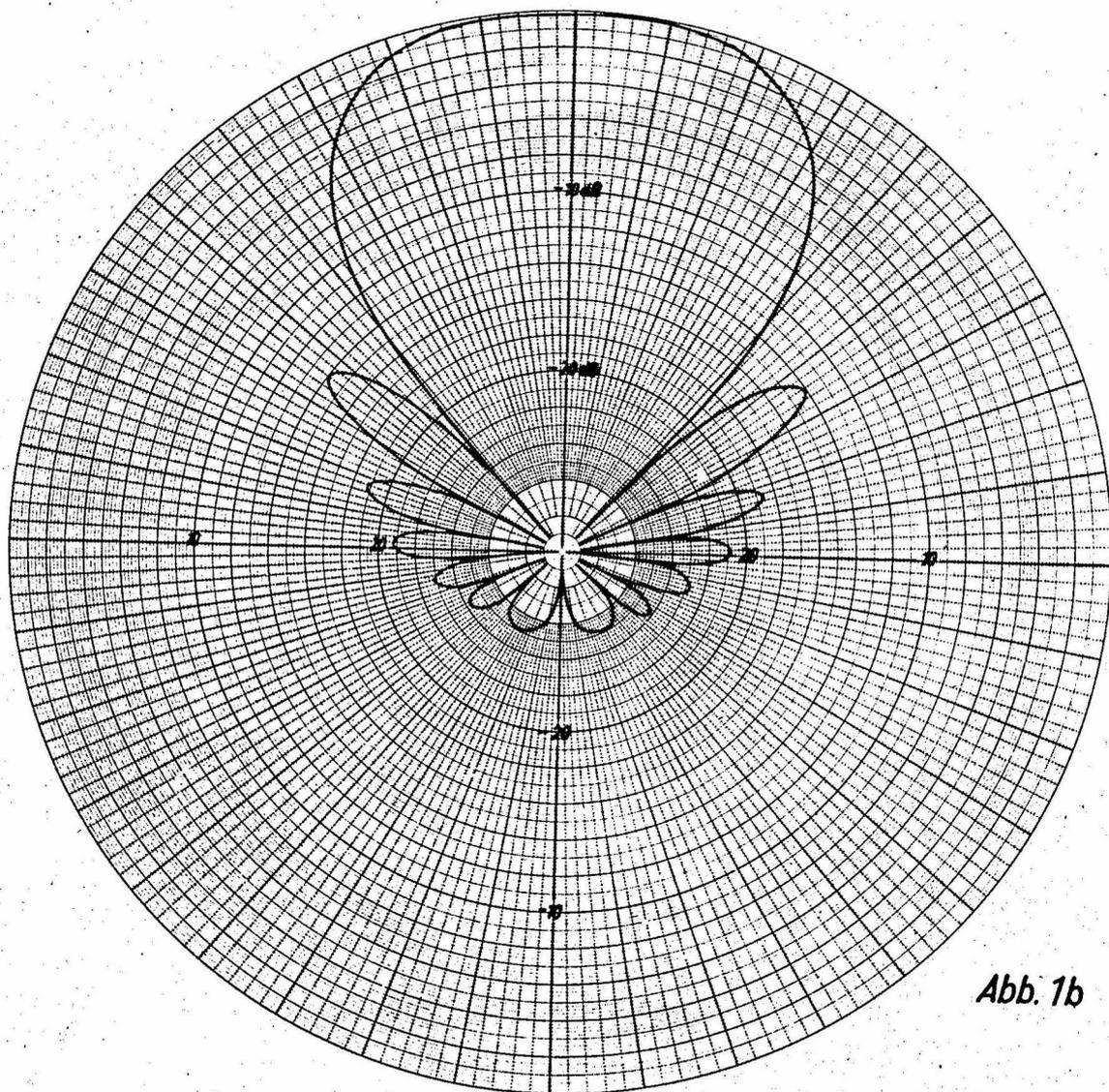


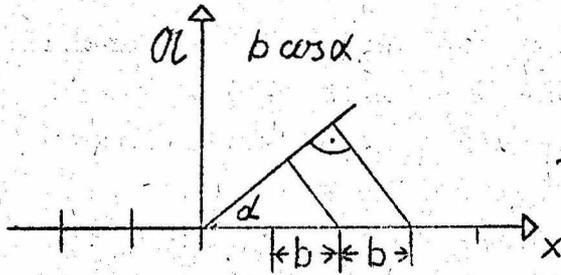
Abb. 1b

Bild 1b: Richtcharakteristik von (3) $\frac{l_0}{\lambda} = 3,5$

3. Die Anzahl der Nebenkeulen wächst mit der Strahlerlänge L gemäß dem auf der Ortskurve aufgetragenen z -Maßstab.

Mit einem Schlitzrohr von 1 m Länge nach KURTZE-TAMM wurden die ersten Versuche der Verfasser durchgeführt. Es war an ein Druckkammersystem angeschlossen worden, das mit Gauß-Tönen /5/ verschiedener Trägerfrequenz beschickt wurde.

- b.) Eine geforderte Richtcharakteristik möge durch eine diskontinuierliche Amplitudenfunktion (Gruppenstrahler) realisiert werden /6/:



b = Abstand der Einzel-
elemente

α_n = Anteil des Einzelstrah-
lers

Die Richtcharakteristik ergibt sich durch die Summation der Anteile aller Einzelpunktstrahler im Fernfeld:

$$R(\alpha) = \sum_{-\infty}^{+\infty} \alpha_n e^{jn b k \cos \alpha}$$

Die gegenseitige Phasenlage der Einzelstrahler soll sich entsprechend zum Schlitzrohr aus der Bedingung ergeben, daß sich in einem Rohr mit seitlichen Oeffnungen eine ebene Welle fortbewegt.

$$\alpha_n = a_n e^{-jnk b}$$

Damit ist

$$R(\alpha) = \sum_{-\infty}^{+\infty} a_n e^{jnk(\cos \alpha - 1)b} \quad (5)$$

$$k(\cos \alpha - 1) = u$$

$$R(u) = \sum_{-\infty}^{+\infty} a_n e^{jnub}$$

Es sei $R(u)$ eine periodische Funktion von u , dann ist nach Fourier:

$$a_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} R(u) e^{-jnub} du$$

im Vergleich zu

$$a_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} f(t) e^{-jnt} dt$$

Auch hier muß der beschränkte Bereich von $R(u)$ berücksichtigt werden: Da $-2k \leq u \leq 0$ ist, muß $bu \leq \pi$ gelten. Damit ist

$$b 2k \leq \pi$$

und

$$b \leq \frac{\lambda}{4}$$

Ist $b < \frac{\lambda}{4}$, so lassen sich für das Gebiet $k \dots \frac{\pi}{2b}$ unendlich viele Funktionsverläufe denken, die unendlich viel a_n -Werte ergeben. Das bedeutet, daß verschiedene Amplitudenverteilungen den gleichen Betrag der Richtcharakteristik ergeben. Ist der Abstand $b = \frac{\lambda}{4}$, so ergibt sich eine eindeutige Zuordnung gemäß der Fourier-Reihenentwicklung. Ist $b > \frac{\lambda}{4}$, dann wird auch $bu > \pi$ und die Fourier-Reihenentwicklung gilt nicht mehr. Physikalisch zeigt sich das durch zwangsläufiges Auftreten von mehreren Hauptmaxima /4/.

Es müssen also wieder beliebige Amplitudenverteilungen vorgegeben werden, womit nach (5) die dazugehörigen Richtcharakteristiken berechnet werden können, so z.B. für die Strahlergruppe mit

$$\alpha = a_0 e^{-jnk b}$$

Durch Umformungen wird damit aus (5):

$$R(\alpha) = \frac{a}{n+1} \frac{1 - e^{j(n+1)kb(\cos \alpha - 1)}}{1 - e^{jkb(\cos \alpha - 1)}} \quad (6)$$

$$kb(\cos \alpha - 1) = \psi$$

$$(n+1) = N \quad (\text{Anzahl der Elemente})$$

$$R(\psi) = \frac{a_0 \sin \frac{N}{2} \psi}{N \frac{\psi}{2}} \quad (7)$$

$R(\psi)$ ist für $N = 8$ in Bild 2 aufgetragen.

Es sei erwähnt, daß durch einfachen Grenzübergang $b \rightarrow 0$, $N \rightarrow \infty$ mit $Nb = 1_0$ der Ausdruck (6) in (3) übergeht.

Aus (7), zusammen mit Bild 2, lassen sich auch hier einige wesentliche Merkmale für die Richtcharakteristik dieses Strahlertyps angeben:

1. Für eine große Anzahl von Strahlerelementen strebt die Größe des ersten Nebenmaximums einem konstanten Wert zu.

Aus (7) folgt für $N \rightarrow \infty$

und für

$$\psi = \frac{3\pi}{N}$$

$$R(\psi) \rightarrow \frac{2}{3\pi} = -13,5 \text{ dB}$$

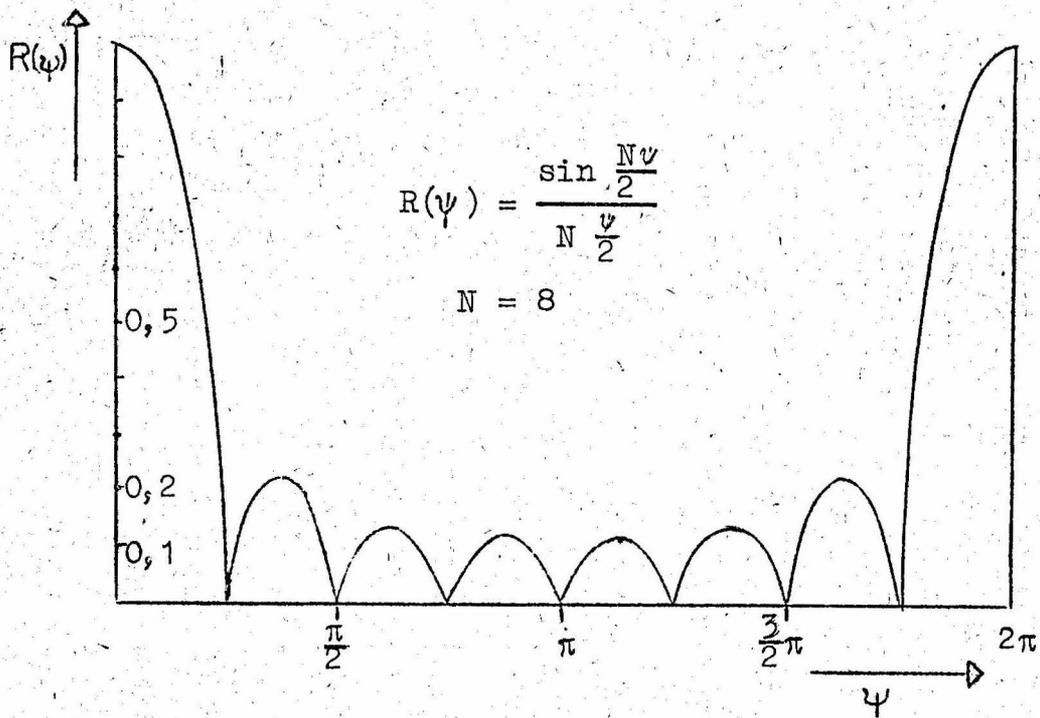


Bild 2: $R(\psi)$ für 8 Elemente

2. Die Peilschärfe nimmt bei gleicher Frequenz mit der Strahlerlänge zu:

$$R_H = \frac{\sin \frac{N\psi}{2}}{N \frac{\psi}{2}} = \frac{1}{2} \sqrt{2}$$

Die gleiche Rechnung wie bei der gleichmäßig belegten, strahlenden Linie liefert

$$\alpha_H \pm \sqrt{0,9 \frac{\lambda}{l_0}}$$

3. Die Anzahl der Nullstellen zwischen zwei Hauptmaxima beträgt $N-1$.

c) Jetzt lassen sich die Anwendungsmöglichkeiten beider Strahlertypen, des mit kontinuierlicher Amplitudenbelegung und des Gruppenstrahlers, gegeneinander abwägen:

Während der kontinuierlich belegte Strahler bei allen Frequenzen ein und dieselbe Hauptstrahlrichtung beibehält, ändert der Gruppenstrahler für $b > \frac{\lambda}{4}$ stark seine Richtwirkung, da mehrere Hauptmaxima auftreten. Die Peilschärfe sowie die Nebenkeulendämpfung sind für große Elementanzahl beim Gruppenstrahler gleich der des anderen Typs. Demnach ist der kontinuierlich belegte Strahler für breitbandige Anwendung

geeigneter. Für den Betrieb des Gruppenstrahlers bei einer festen Frequenz kann, wenn die praktische Anwendung eine spiegelsymmetrische Abstrahlung nach hinten zuläßt, bei gleicher Strahlerlänge die Peilschärfe erheblich verbessert werden, wie aus Bild 2 hervorgeht. Es werden dabei dem Ψ -Maßstab die α -Werte so zugeordnet, daß bei

$$\begin{aligned}\Psi &= 2\pi \\ \alpha &= \pi \text{ ist.}\end{aligned}$$

Für den Elementeabstand ergibt sich damit

$$\begin{aligned}kb(\cos \alpha - 1) &= \Psi \\ kb(\cos \pi - 1) &= 2\pi \\ b &= \frac{\lambda}{2}\end{aligned}$$

Das dazugehörige Richtdiagramm ist in Bild 3 aufgetragen. Im Hinblick auf die Aufgabe, Reflektoren im Konzertsaal anzupeilen, kann eine zweite rückwärtige spiegelsymmetrische Abstrahlung zugelassen werden. Der rückwärtige Schallweg nimmt bestimmt einen anderen Verlauf als der vorwärts gerichtete und findet zudem durch die vorderen Parkettplätze eine starke Dämpfung. Fehlortungen des von den Reflektoren umgelenkten Strahles sind also nicht zu erwarten. Für eine Strahlerausführung wurde von dieser Möglichkeit Gebrauch gemacht.

III. Anwendungen

1. Messung des Reflexionsfaktors der Rasterdecke im großen Sendesaal des Haus des Rundfunks

a) Veranlassung der Untersuchung

In akustisch behandelten Räumen begegnet man immer wieder an Decken und an Seitenflächen Gebilden, die eine Gitterstruktur aufweisen. Diese können die Aufgabe einer optischen Abdeckung übernehmen, akustisch hingegen transparent sein.

In dem von Hans P ö l z i g in den zwanziger Jahren erbauten Haus des Rundfunks in Berlin befindet sich in der Mitte, als Herzstück des Gebäudekomplexes, ein großer Sendesaal, der sowohl als Konzertsaal, wie als Aufnahmesaal großer Orchester gedacht ist. Dieser Saal wurde im Jahre 1958/59 von der Sondervermögens- und Bauverwaltung und der akustischen Beratung durch Prof. C r e m e r nach dem neuesten Stand der Technik

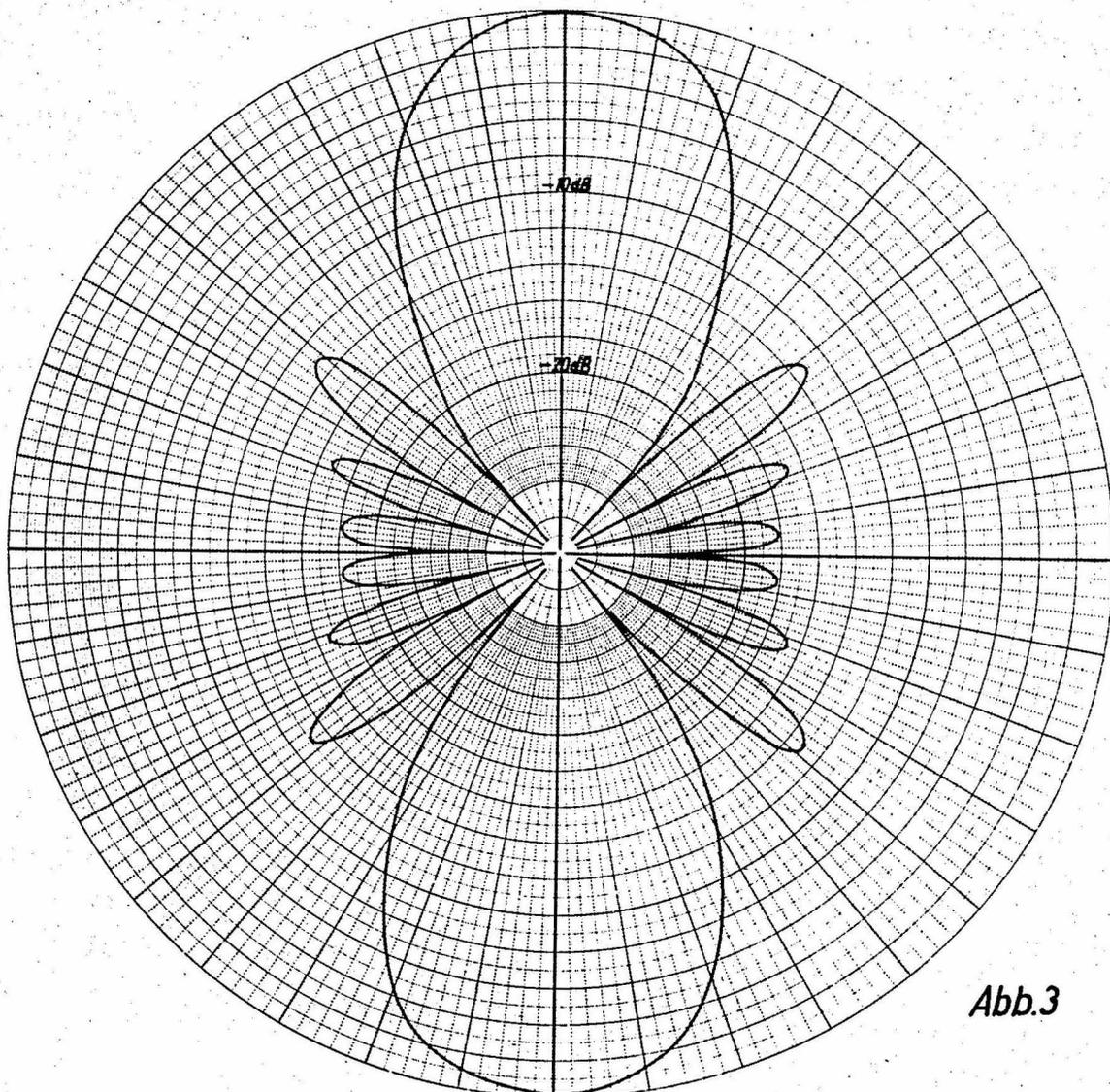


Bild 3: Richtdiagramm des Gruppenstrahlers mit acht Elementen im Abstand $\frac{\lambda}{2}$

und Wissenschaft wiederhergestellt.

Bei der Wiederherstellung wurde die alte Konzeption des Saales beibehalten und somit auch die unter der Hauptdecke liegende Rasterdecke, die eine optische Decke ist, hängen gelassen. Zwischen Haupt- und Rasterdecke befinden sich große Lüftungskanäle und einige Reflektoren, die der Schallzerstreuung dienen.

Es ist nun zu fragen, inwieweit ist diese Rasterdecke akustisch transparent. Oder anders ausgedrückt, welche Frequenzgebiete werden von der Rasterdecke durchgelassen und erst von der Haupt-

decke reflektiert und welche werden schon an der Rasterdecke reflektiert. Andererseits würde dies auch heißen, für welche Frequenzgebiete ist bei einer Nachhallberechnung die Höhe bis zur Hauptdecke und bei welchen nur bis zur Rasterdecke einzusetzen.

Die Rasterdecke würde im elektrischen Sinne die Aufgabe einer Frequenzweiche übernehmen.

b) Durchführung der Versuche

Für die Messung bieten sich Kurztöne oder Impulse an, die ein Lautsprecher gegen die Decke strahlt und die ein Mikrophon aufnimmt. Um eine Frequenztrennung in hinreichend schmalen Bereichen vorzunehmen, konnten keine rechteckig modulierten Kurztöne verwendet werden. Wir bedienten uns Kurztönen als Schallsignale, die nach einer Gauß'schen Fehlerkurve moduliert waren. Diese "Gaußtöne", wie wir sie genannt haben, weisen im Spektrum ebenfalls eine Gaußverteilung um die Trägerfrequenz auf. Der Vorteil dieser Gaußtöne ist neben ihres schmalen Spektrums die Tatsache, daß Lautsprecher sie unverzerrt wiedergeben. In der Bandbreite entsprachen die für die Messung verwendeten Gaußtöne den nach FELDTKELLER und ZWICKER ermittelten Frequenzgruppenbreiten und waren mit der Mittenfrequenz der zugehörigen Frequenzgruppe moduliert.

Die Abbildung 4 zeigt einmal eine Frequenzgruppe im Bereich von 295-395 Hz ($f_m = 341$ Hz) und eine im Bereich von 2670 Hz und 3120 Hz ($f_m = 2885$ Hz); links der Lautsprecherstrom und rechts aufgenommen mit einem Mikrophon in 1 m Abstand. Die so vorgenommene frequenzmäßige Unterscheidung erlaubt festzustellen, inwieweit die Anordnung eines transparenten Gebildes als Frequenzweiche anzusehen ist.

H. J. Z e m k e führte erste Untersuchungen an einem Modell im schalltoten Raum des Instituts für technische Akustik durch. Bei tiefen Frequenzen war die Modellversuchsanordnung absolut schalldurchlässig, bei hohen Frequenzen bildete der verwendete Lattenzaun jedoch eine reflektierende Wand. Etwas ähnliches war für die Rasterdecke im Sendesaal des Haus Rundfunks zu erwarten.

c) Die Messung mit den Ergebnissen

Von einem Magnetongerät wurden die Gaußtöne einem Endverstärker zugeführt und von dort an einen Richtsender weitergegeben. Als weitbandiger Richtsender diente die Umkehrung des von KURTZE-TAMM entwickelten Richtmikrophons, also ein Sender, bei dem die Richtcharakteristik durch eine kontinuierliche Amplitudenbelegungsfunktion realisiert wurde. Der Richtsender strahlte senkrecht gegen die Decke. 1,4 m unter der Rasterdecke hing ein Mikrophon mit einer Achter-Charakteristik. Ueber einen Spannungsverstärker wurde das Signal einem Oszillographen zugeführt. Um das Raumgrundgeräusch nicht zur Anzeige zu bringen, wurde von dem Oszillographen noch ein Hochpass geschaltet, der alle Frequenzen unterhalb von 300 Hz wegschnitt.

Die Versuche wurden an einer Stelle durchgeführt, wo zwischen der Rasterdecke und der Hauptdecke sich keine schallzerstreuenden Elemente befinden, so daß nur Reflexionen von der Rasterdecke und der Hauptdecke zu erwarten waren. Die Rasterdecke wurde mit Frequenzgruppenbreiten Gaußtönen im Bereich von 561 Hz - 5000 Hz bei senkrechtem Einfall untersucht. Angegeben wird jeweils die Trägerfrequenz des zugehörigen Gaußtönes.

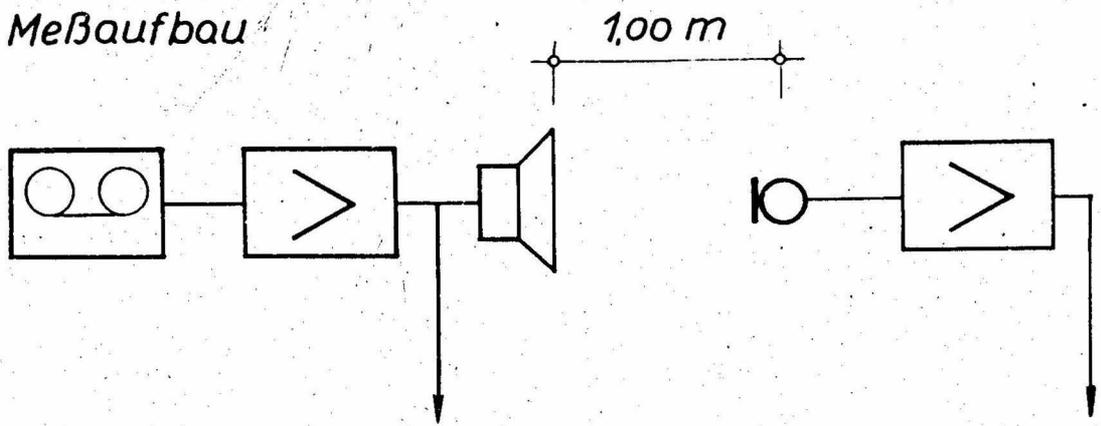
In Abbildung 5 ist der Reflexionsfaktor der Rasterdecke in Abhängigkeit von der Trägerfrequenz aufgetragen.

d) Diskussion der Ergebnisse

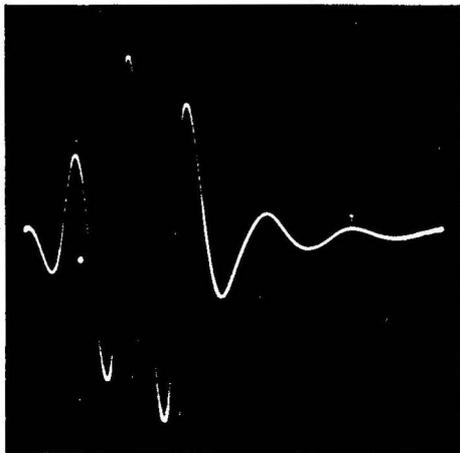
Wie eingangs schon gesagt, wurde vermutet, daß bei tiefen Frequenzen der Rasterdecke als transparent und bei hohen Frequenzen reflektierend anzusehen ist. Für den Raum würde dies bedeuten, daß er bei tiefen Frequenzen raumakustisch größer ist, als bei hohen Frequenzen.

Aus der Abbildung 5 ist dies nur in erster Annäherung zu folgern. Die Reflexionsverhältnisse scheinen doch wesentlich komplizierter zu sein. Es ist nicht das Erwartete eingetreten, daß nämlich der Reflexionsfaktor der Rasterdecke mit der Frequenz stetig ansteigt.

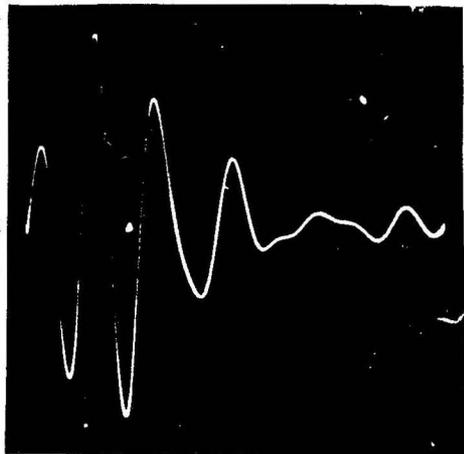
Meßaufbau



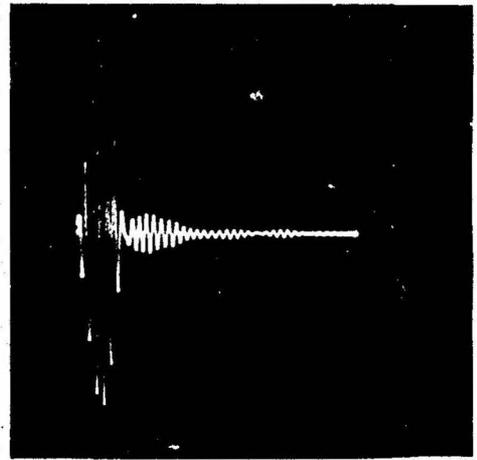
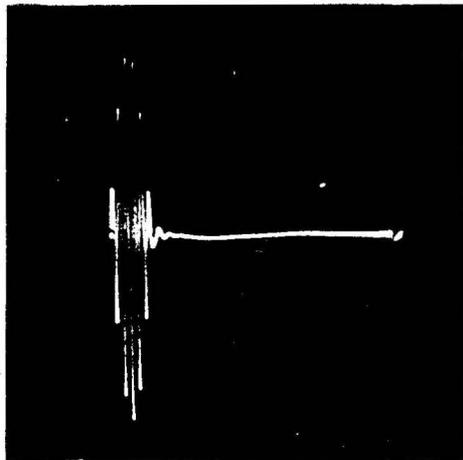
Lautsprecherstrom



Mikrophonstrom



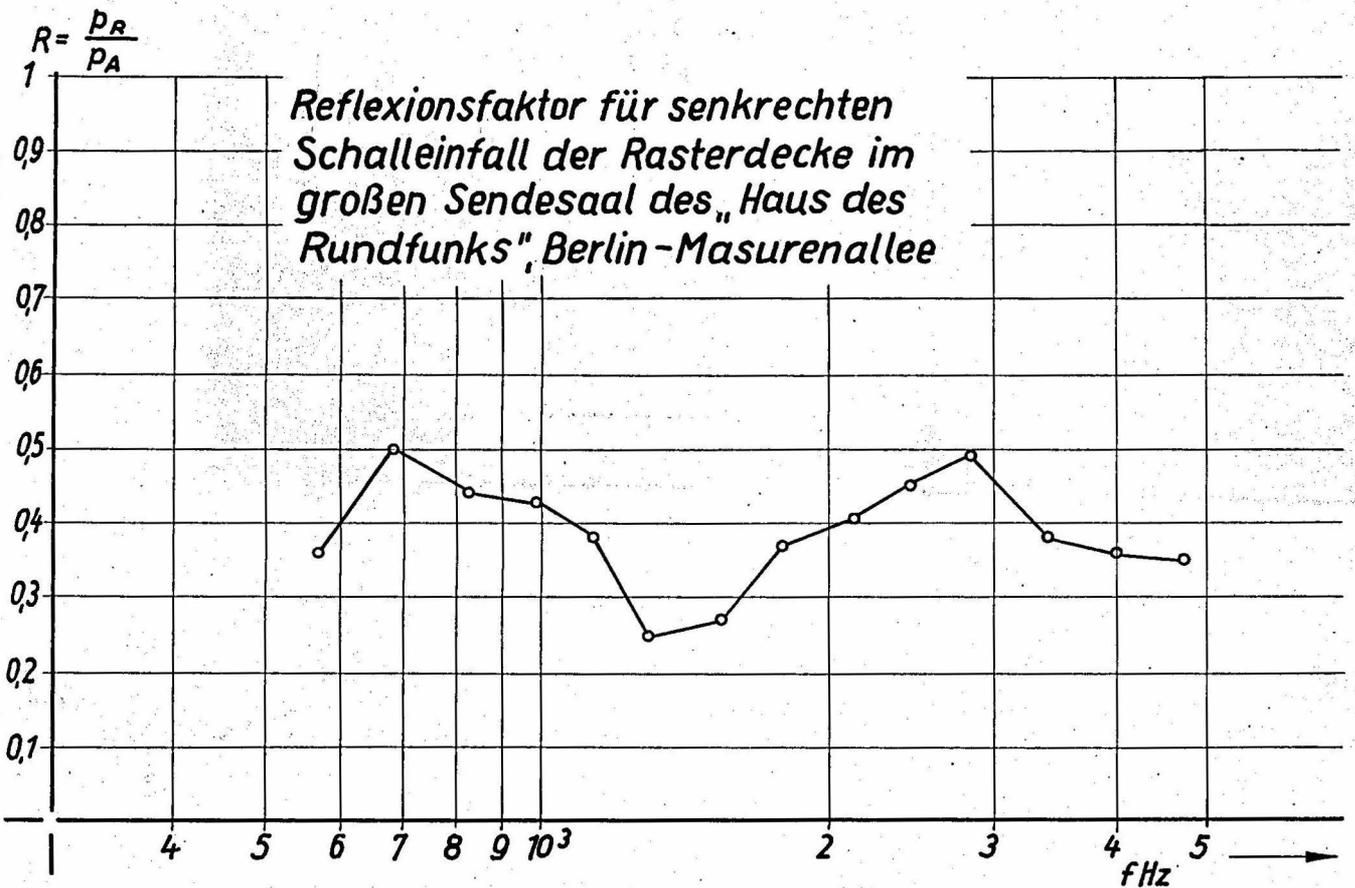
$$f_m = 341 \text{ Hz}, \Delta t = 10 \text{ ms}$$



$$f_m = 2885 \text{ Hz}, \Delta t = 2,2 \text{ ms}$$

Gaußtöne": links Lautsprecher-
strom, rechts Mikronaufzeichnung
im reflexionsarmen Raum.

Abb.4



2. Strahlerausführung zum Anpeilen der Reflektoren

a) Für eine feste Sendefrequenz von 4000 Hz wurde ein Richtsender zum Anpeilen und Einstellen der Reflektoren im Großen Sendesaal aufgebaut.

Das Isophon-Druckkammersystem DK-2T ist an ein Aluminiumrohr angeschlossen, dessen Länge 54 cm, dessen Durchmesser 4 cm beträgt und das mit einem Keil reflexionsfrei abgeschlossen ist. Bei diesen Abmessungen ist die Rohrdämpfung zu vernachlässigen. Ebenso ist die Phasengeschwindigkeit im Rohr gleich der im freien Raum /7/. Die Größe des Rohrdurchmessers ermöglicht stehende Wellen quer zur Fortschrittsrichtung. Sie sollten durch ein längs eingeschobenes Pertinaxstück von 4 mm Dicke unterbunden werden. Wenn das Stück herausgenommen wurde, zeigte sich jedoch auch beim Senden reiner Sinustöne keine Beeinträchtigung der Wirkungsweise. Das Rohr ist mit acht schmalen Querschlitten im Abstand von 4,3 cm versehen, was bei 4 kHz einem Elementeabstand von $\frac{\lambda}{2}$ entspricht. Wenn die Abmessungen der Schlitz die Bedingung erfüllen, daß pro Schlitz jeweils der gleiche Schallfluß austritt, so ist eine Richtcharakteristik nach Bild 3 zu erwarten.

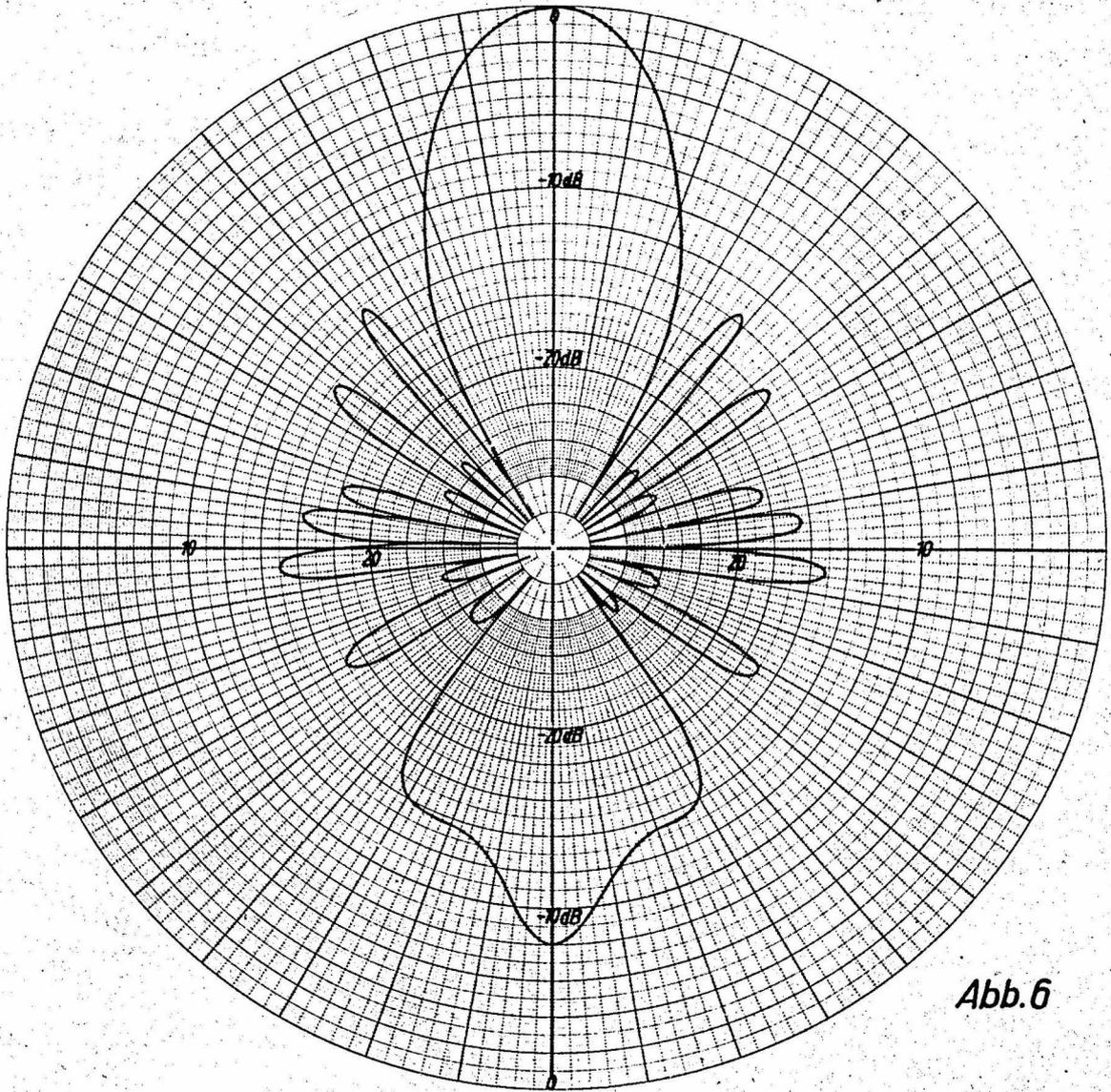


Abb.6

Bild 6: Aufgenommenes Richtdiagramm des Senders bei 4 kHz

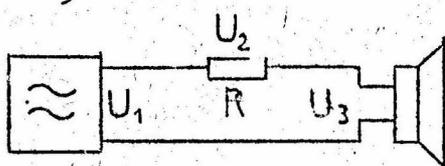
Der Berechnung der Schlitzabdeckung lag die Theorie des Schalldurchgangs durch Löcher in dünnen Wänden zugrunde /8/. Nach den Erfahrungen mit einer Versuchsausführung schien der Schalldurchgang durch einen rechteckigen Schlitz kleiner zu sein als durch ein rundes Loch gleicher Fläche, was bei der endgültigen Ausführung Berücksichtigung fand. Im Rohrende befindet sich eine "Lichtkanone", mit der der Auftreffpunkt des Schallstrahles kenntlich gemacht werden kann. Das Lautsprecherchassis wurde mit einer schallschluckend ausgekleideten Kapsel umgeben, die neben der Abschirmung der Störstrahlung auch die rückwärtige Abstrahlung etwas abschattete. Damit ist das Richtdiagramm in Bild 6 aufgenommen worden. (Dieses, wie auch die fol-

genden Richtdiagramme, wurden mit dem Pegelschreiber aufgenommen und dann auf Polarkoordinatenpapier übertragen.)

Hierbei fällt die gegenüber Bild 3 größere Peilschärfe auf. Das rührt daher, daß die Schlitze wegen ihrer Abmessung quer zur Rohrachse ebenfalls eine Richtcharakteristik haben, die sich mit der von Bild 3 multipliziert. Wenn man die Richtwirkung eines gleichphasig schwingenden Kreisringes in unendlich ausgedehnter starrer Wand berechnet, so hat sie für einen Ringdurchmesser von $\frac{\lambda}{2}$, was dem hier vorliegenden Fall ungefähr nahekommt, eine Halbwertsbreite von $\alpha_H = \pm 46^\circ$. So ist die Peilschärfe in Bild 3 von $\alpha_H = \pm 17^\circ$ in der praktischen Ausführung auf $\alpha_H = \pm 11^\circ$ verbessert.

b) Der akustische Wirkungsgrad des Strahlers. Die Meßmethode sei kurz skizziert. /9/

Zur Bestimmung der elektrischen Wirkleistung wird U_1 , U_2 und U_3 bei bekanntem R gemessen.



$$N_{el} = U_3 \frac{U_2}{R} \cos \varphi$$

$$U_3 U_2 \cos \varphi = \frac{1}{2} (U_2^2 + U_3^2 - U_1^2)$$

$$N_{el} = \frac{1}{2R} (U_2^2 + U_3^2 - U_1^2)$$

Die abgestrahlte akustische Leistung ist aus dem Richtdiagramm zu ermitteln:

$$N_{ak} = \frac{2\pi r^2}{\rho c} \sum_{\nu=0}^{36} P_{\nu}^2(\alpha) \sin \alpha_{\nu} \Delta \alpha$$

Hier ist $\Delta \alpha$ zu 5° gewählt. Aus der Empfindlichkeit des Meßmikrophons und der Mikrofonspannung ist $P_{\alpha=c}$ bekannt.

Der Wirkungsgrad ist $\eta = \frac{N_{ak}}{N_{el}} 100 \%$

Die Messung ergab $\eta = 1 \% \pm 0,2 \%$

c) Von den Versuchen und Messungen, die mit diesem Strahler durchgeführt wurden, sei zunächst ein subjektiver Versuch angeführt, der feststellen sollte, ob bei der Halbwertsbreite von $\pm 11^\circ$ die Sicherheit der Ortung eines reflektierten Strahles gewährleistet ist.

Eine drehbar aufgestellte Wand mit den Abmaßen von 1,5 m x 1,5 m wird gemäß nebenstehender Skizze angestrahlt.

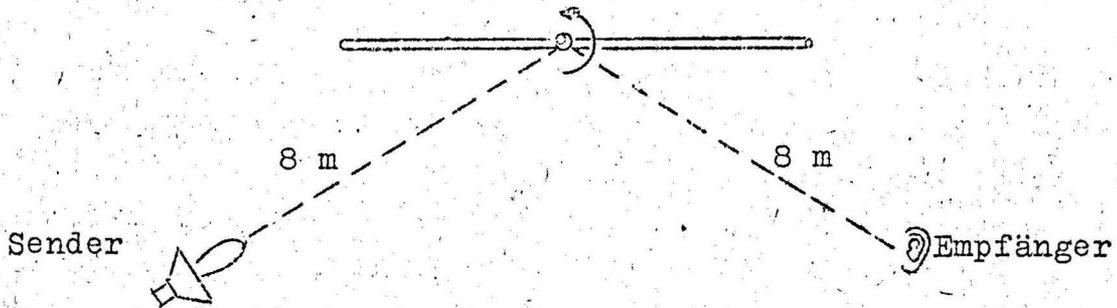


Bild 7

Der Empfänger (Versuchsperson) hat auf den jeweils markierten Standpunkten die Möglichkeit, die reflektierende Wand soweit zu drehen, bis er den reflektierten Strahl wahrnimmt. Diese Stellung der Wand wird an einer Skala abgelesen und mit dem Wert verglichen, der nach dem Reflexionsgesetz zu erwarten wäre. Es standen elf Versuchspersonen zur Verfügung, mit denen je 10 Meßpunkte aufgenommen wurden. Die Häufigkeitsverteilung der Meßpunkte um den erwarteten Wert ist in Bild 8 aufgetragen, wobei $\pm 0,5^\circ$ schon die Grenze der Ablesegenauigkeit darstellt. Die Peilschärfe ist also weit ausreichend.

d) Seine praktische Bedeutung findet der Richtsender bei der optimalen Einstellung der Reflektoren des Großen Sendesaales. Die Reflektoren werden mit terzbandbreitem Rauschen der Mittenfrequenz 4000 Hz angestrahlt. Der Auftreffpunkt des reflektierten Strahles läßt sich mit dem Ohr wahrnehmen. Ebenso können Reflexionen an Wänden und Decken verfolgt werden. (s. Abb. 9)

Der Einfluß der Reflektorstellungen an verschiedenen Plätzen des Saales ist quantitativ untersucht worden.

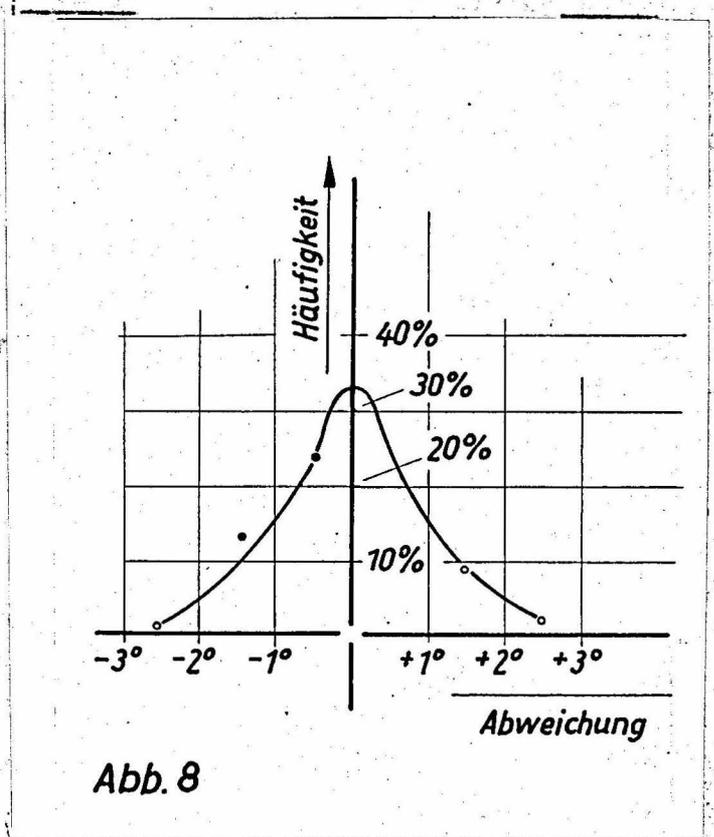


Abb. 8

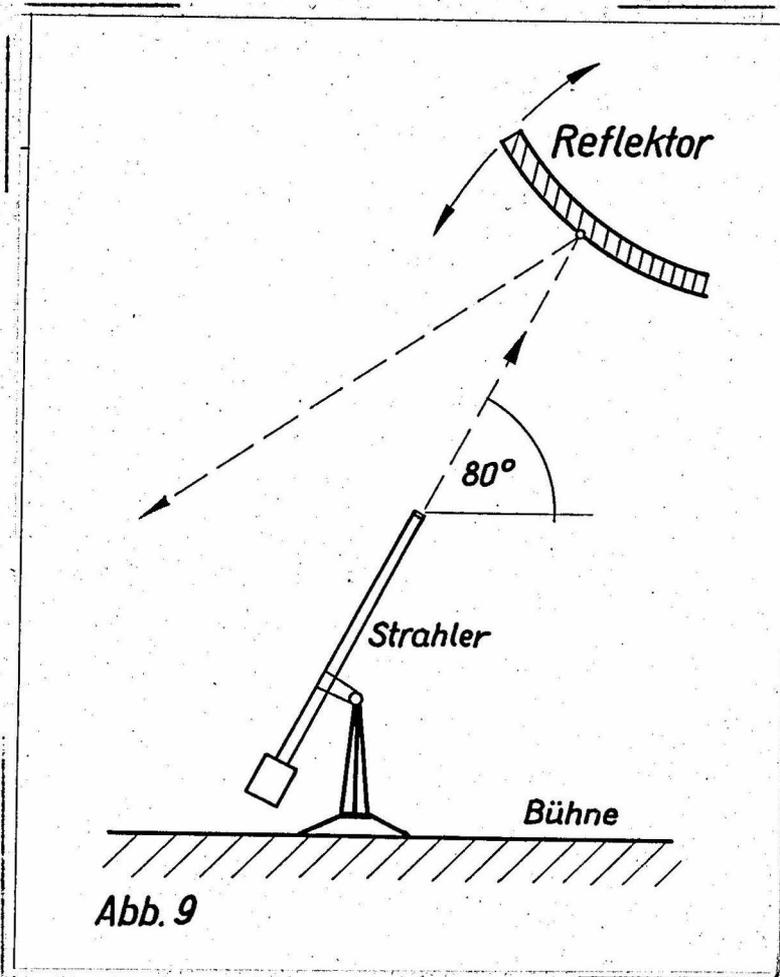


Abb. 9

Der Richtsender strahlt die Reflektoren unter einem Winkel von 80° an. Der Empfänger (EZGN von Rohde u. Schwarz) mißt dabei in der ersten Meßreihe den maximalen Pegelgewinn, der auftritt, wenn die Reflektoren aus ihrer waagerechten Stellung herausgedreht werden. Die Höhe der Reflektoren über der Bühne betrug 3-4 m. Der Empfänger wurde an folgenden Plätzen aufgestellt:

- | | | |
|---|-------------------|-------------------|
| 1 | Parkett Mitte | 3. Reihe |
| 2 | " | " 8. " |
| 3 | " | " 16. " |
| 4 | Hochparkett Mitte | |
| 5 | Rang Mitte | drittletzte Reihe |
| 6 | Seitenrang vorn | |
| 7 | " | hinten |

Die Meßergebnisse sind in Abb. 10a aufgetragen. Für die Meßpunkte 6 und 7 beträgt der Pegelanstieg beim Anstrahlen der vorderen Reflektoren 2 dB, beim Anstrahlen der hinteren 1 dB.

In der zweiten Meßreihe sind die Reflektoren so gestellt, daß der Reflektierte Strahl auf die Rangplätze gerichtet ist. Der Pegelgewinn gegenüber der waagerechten Reflektorstellung wurde an den gleichen Empfängerorten gemessen. Für die Meßpunkte 6 und 7 beträgt der Pegelanstieg bei den vorderen Reflektoren 2 dB und bei den hinteren ist keine Pegelzunahme festzustellen. Die Meßergebnisse sind in Bild 10b dargestellt.

Pegelgewinn bei optimaler Stellung der Reflektoren für jeden Empfängerort gegenüber der waagerechten Stellung

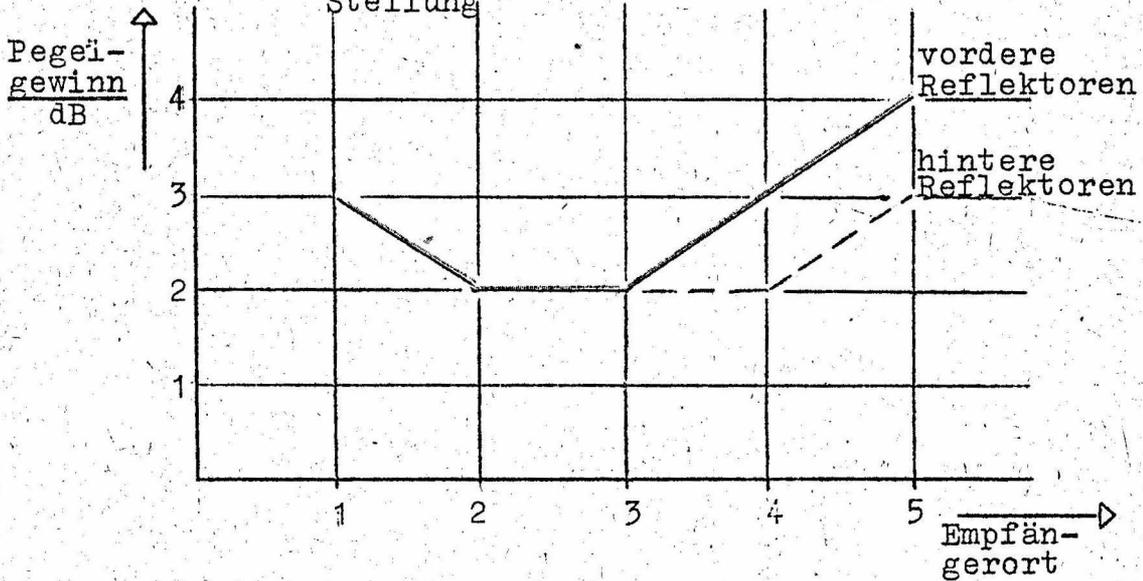


Bild 10a: Einfluß der Reflektorstellungen an verschiedenen Plätzen
Eine Untersuchung des Laufzeitunterschieds zwischen direktem und reflektiertem Schallweg war nicht durchführbar

Pegelgewinn bei optimaler Stellung der Reflektoren für die hinteren Plätze gegenüber der waagerechten Stellung

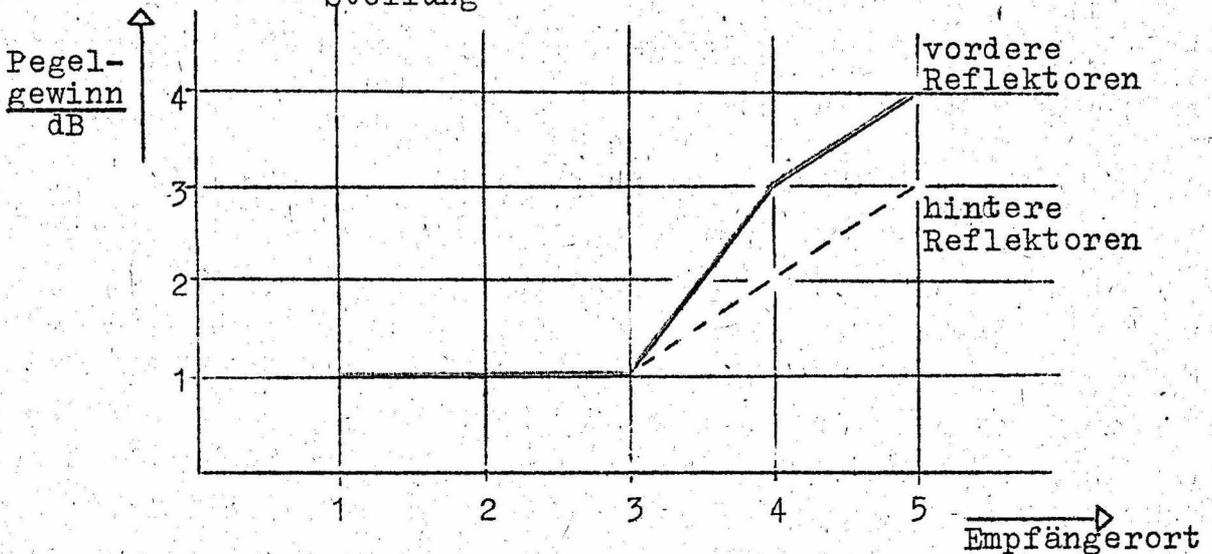


Bild 10b: Einfluß der Reflektorstellungen an verschiedenen Plätzen

e) Qualitative Versuche im Konzertsaal der Hochschule für Musik und in der Königin-Louise-Gedächtniskirche sollten das Verhalten reflektierender Decken und Wände feststellen. Im Konzertsaal strahlte der Sender vom Podium aus die Deckenflächen an. Dabei wurde festgestellt, daß nur die Deckenpartien der

Saalmitte den wesentlichen Gewinn für einmal reflektierte Schallanteile bringen. Er wirkt sich auf den Rang und auch auf die hinteren Parkettplätze aus. Die Partien über dem Podium zeigten nur einen schwachen Gewinn für die Rangplätze und von den Deckenflächen des letzten Saaldrittels war überhaupt kein Einfluß festzustellen.

Die Reflexionen eines Schallstrahles in einem Kuppelbau wurden in der Königin-Louise-Gedächtniskirche untersucht. Sie konnten sehr genau in Uebereinstimmung mit der Geometrie des Raumes verfolgt werden.

Ein Versuch in der Kirche am Lietzensee zeigte, daß der Sender in der vorliegenden Art nicht für alle Räume geeignet war. Dieser Raum hat bei einem Volumen von 3200 m^3 bei 4 kHz eine Nachhallzeit von 2,1 sec im unbesetzten Zustand und ist durch groÙe, windschief zueinander stehende, gut reflektierende Flächen begrenzt (vgl. Bild 15). Die rückwärtige Abstrahlung sowie die Nebenmaxima verwischten hier den Eindruck des reflektierten Hauptstrahles.

Für eine vielseitigere raumakustische Anwendung ergab sich damit die Aufgabe, einen Strahler zu entwickeln, der einmal nur eine Hauptstrahlrichtung zuläßt, und bei dem zum zweiten die Nebenmaxima unterdrückt sind.

IV. Theoretische Möglichkeiten zur Verbesserung des Richtstrahlers und Aufbau einer zweiten Ausführung

1. Unter Beibehaltung des Gruppenstrahlerprinzips wird von Gleichung (5) ausgegangen. Sie läßt sich folgendermaßen umschreiben:

$$R(z) = |a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + z^n| \quad (8)$$

wobei $z = e^{jkb(\cos \alpha - 1)}$ ist.

Gleichung (8) stellt ein Polynom n-ten Grades dar, dessen Betrag gleich der Richtcharakteristik eines Gruppenstrahlers mit (n+1) Elementen ist.

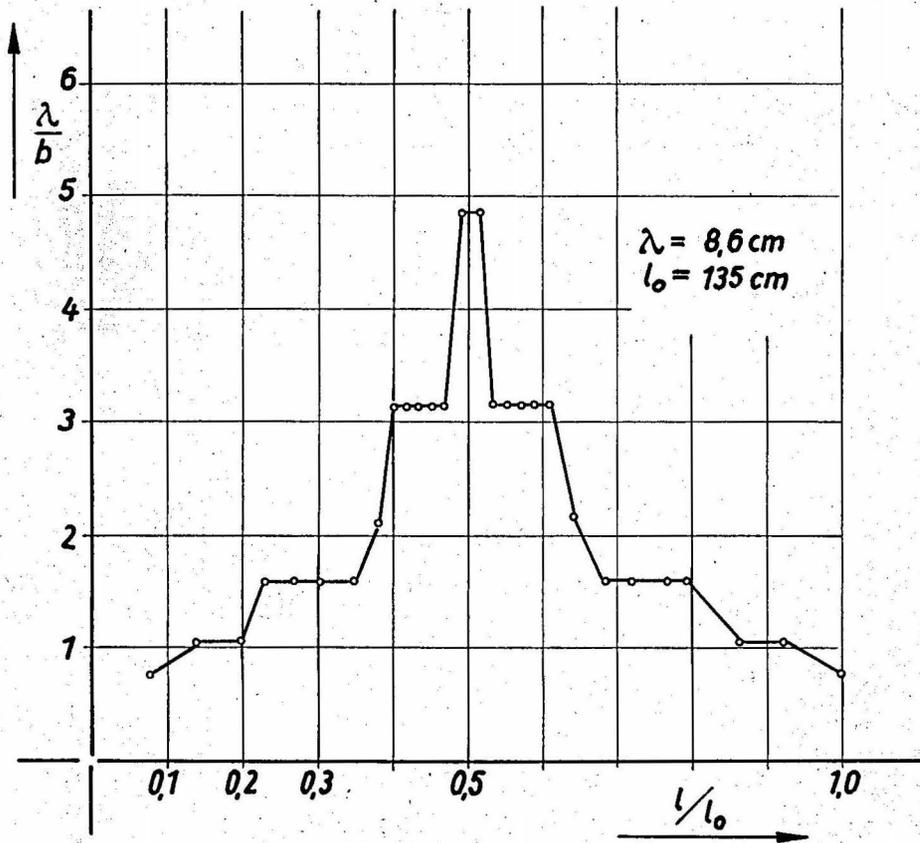
Die Richtcharakteristik kann einmal durch freie Wahl der Koeffizienten a_k , also der Intensität der Einzelstrahler, verändert werden, wobei große Peilschärfe und niedrige Nebenmaxima anzustreben sind /10/

Gemäß der Theorie der algebraischen Funktionen hat jedoch eine gleichmäßige Absenkung der Nebenmaxima eine Verbreiterung der Hauptkeule zur Folge. Bei DOLPH /11/ wird der Beweis geführt, daß (8) in Form eines Tschebyscheffschen Polynoms ein optimales Verhältnis zwischen Halbwertsbreite und Nebenkeulendämpfung liefert. Bei diesem Polynom haben alle Nebenmaxima die gleiche Höhe. Durch eine energetische Betrachtung ist das leicht zu veranschaulichen: Für eine Strahlergruppe mit beliebiger Intensitätsverteilung ist der Flächeninhalt des Richtdiagrammes genau so groß wie der des Richtdiagramms der gleichen Strahlergruppe mit gleichmäßiger Intensitätsverteilung, wenn die Summe der Einzelintensitäten der Gruppe beide Male konstant bleibt. Ebenfalls behält dann das Hauptmaximum die gleiche Größe. Unter Beibehaltung des konstanten Flächeninhalts des Richtdiagramms ist das optimale Verhältnis zwischen kleiner Halbwertsbreite und möglichst hoher Nebenkeulendämpfung nur dann denkbar, wenn alle Nebenzipfel auf die gleiche Größe gebracht werden.

Angeregt durch eine Arbeit von BAUR /12/ wurde hier versucht, eine Richtwirkung im Tschebyscheffschen Sinne durch alleinige freie Wahl des Elementenabstandes b zu erreichen und dabei die Einzelintensitäten a_k konstant zu lassen. Ausgehend von Gl.(8) wäre das Problem mathematisch wie folgt zu formulieren:

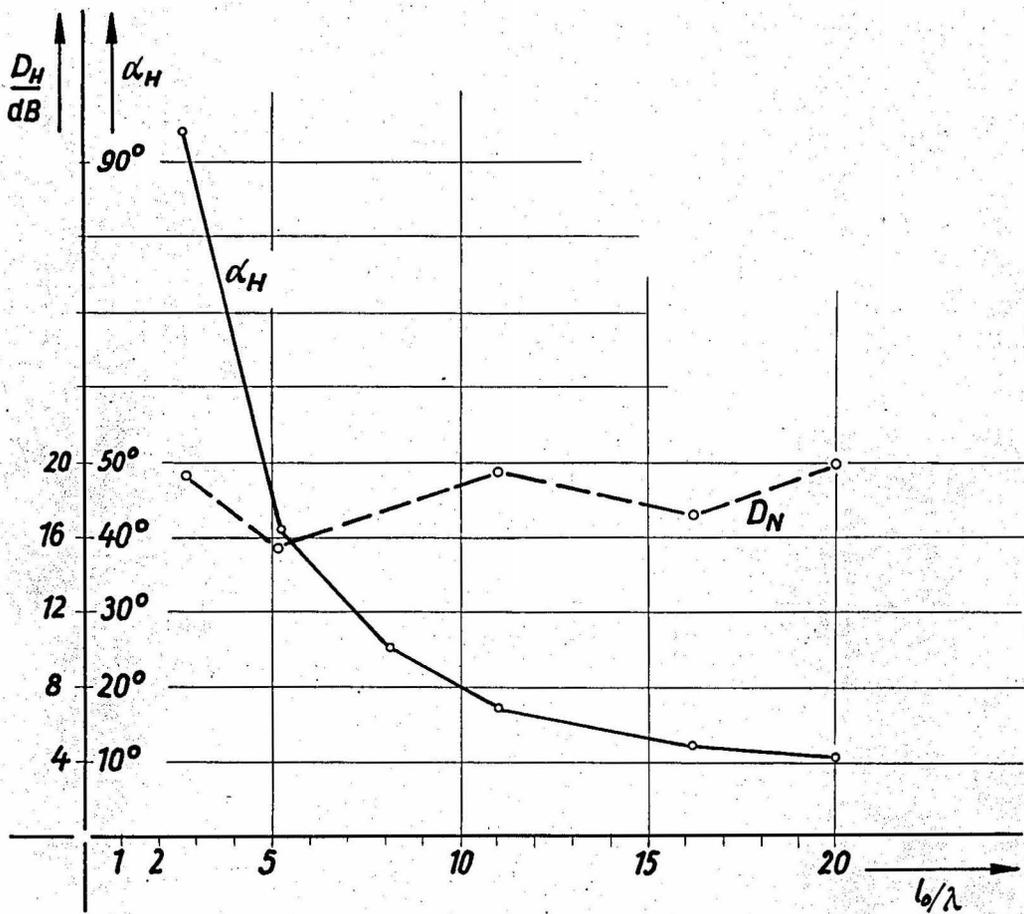
Für die Koeffizienten gilt $a_u = 1$
 $a_v = 0$, das heißt, es dürfen aus (8) nur die a_v verschwinden, die übrigen haben alle den Wert 1. Es sollen nun die a_u und a_v gefunden werden, die dem Polynom (8) die Eigenschaft geben, daß der Betrag aller seiner Nebenmaxima um einen konstanten vorgegebenen Wert in beliebig kleinen Abweichungen schwankt, wobei der Grad n des Polynoms beliebig hoch sein kann.

Zur Lösung des Problems wurde der experimentelle Weg eingeschlagen. Es wurden die Richtcharakteristiken verschiedener Abstandsverteilungen der Einzelstrahler (das ist identisch mit verschiedenen Abstandsverteilungen der Querschlitze im Rohr) gemessen. In Bild 11 ist die Abstandsverteilung aufgetragen, die den geforderten Bedingungen am besten entsprach.



Abstandsverteilung der Schlitze über der Rohrlänge

Abb. 11



Eigenschaften der Richtdiagramme für die Abstandsverteilung

Abb. 12

Für verschiedene Frequenzen ist dann für diese Abstandsverteilung das Richtdiagramm aufgenommen worden. Die wesentlichen Eigenschaften dieser Diagramme, also Halbwertsbreite und Nebenkeulendämpfung sind in Bild 12 aufgetragen.

2. Aufbau und Anwendungen

a) Für den betriebsfertigen Aufbau des Richtstrahlers wurde aus diesen Messungen ein Verhältnis $l_0/\lambda = 16$ gewählt. Hierbei beträgt die Halbwertsbreite $\pm 12^\circ$ und die Nebenkeulendämpfung 17 dB. Für eine Betriebsfrequenz von 4 kHz erfordert das eine Strahlerlänge l_0 von 135 cm. Für jede andere Betriebsfrequenz läßt sich die Halbwertsbreite und die Nebenkeulendämpfung aus Bild 12 ablesen. Es gilt z.B. für 6 kHz $\alpha_H = \pm 11^\circ$ u.

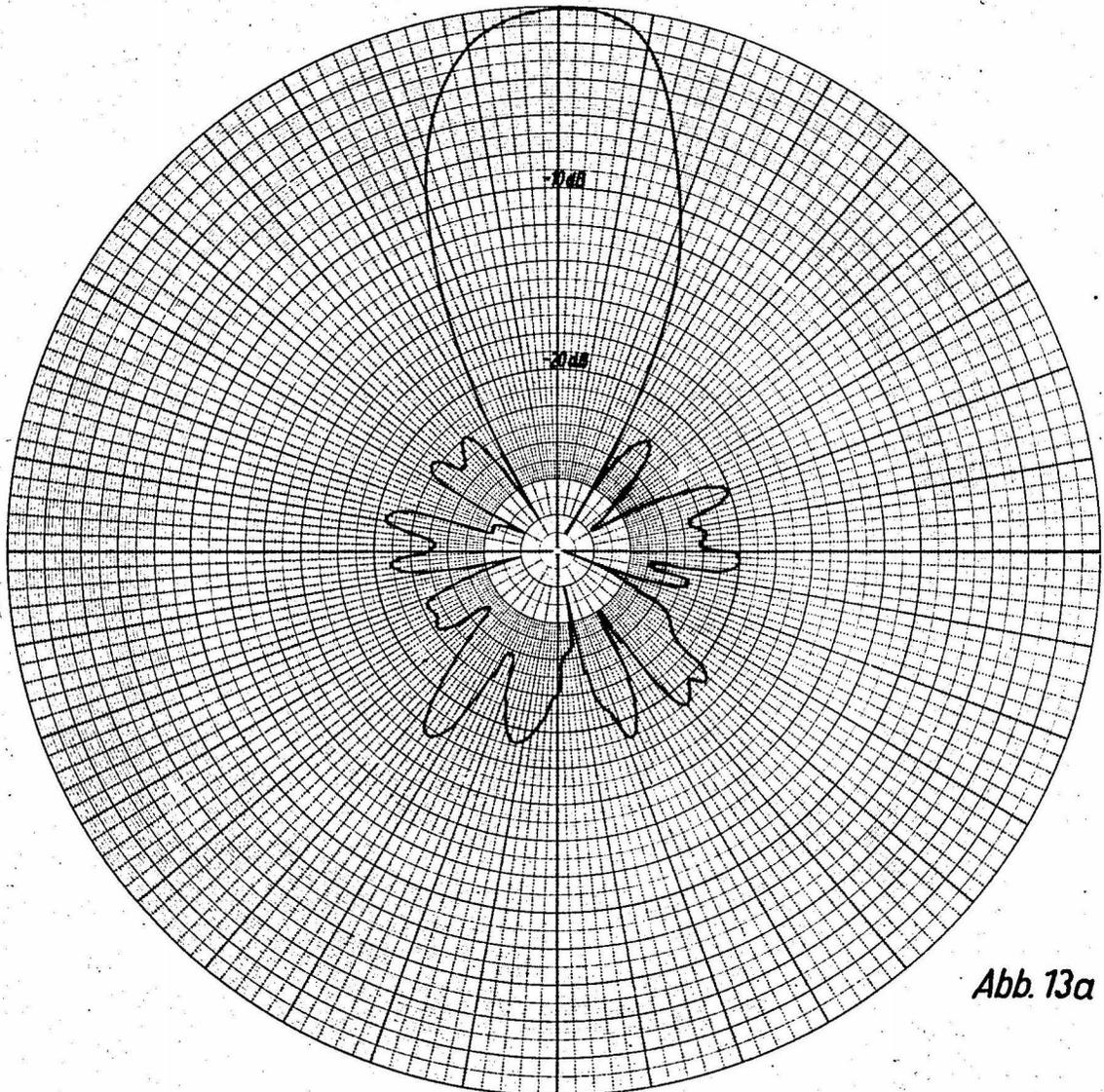


Bild 13a: Richtdiagramm des Strahlers bei 4 kHz

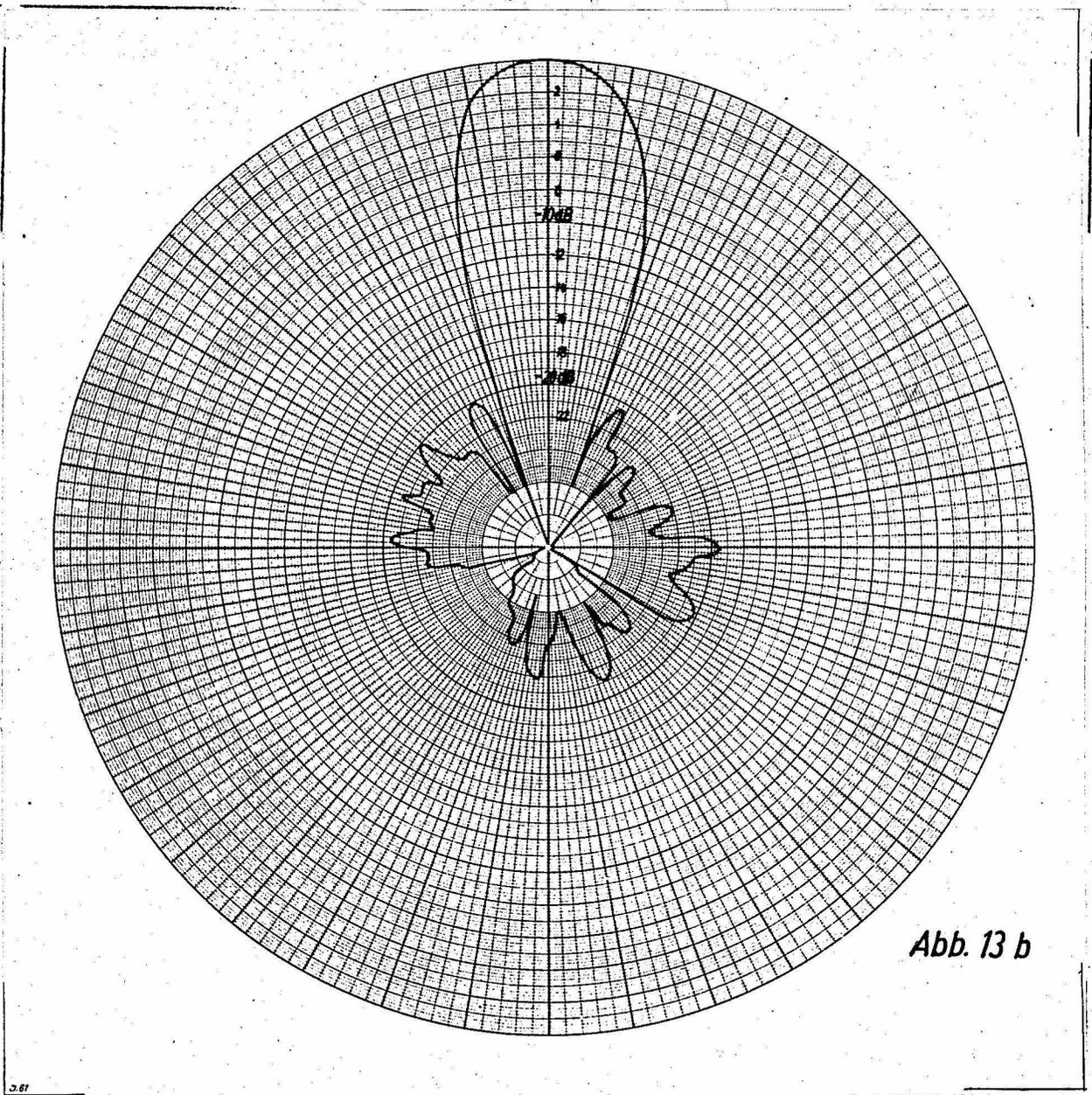


Abb. 13 b

Bild 13b: Richtdiagramm des Strahlers bei 6 kHz

$D_N = 20$ dB. Für beide Frequenzen ist das Richtdiagramm in Bild 13a und 13b gezeichnet.

Hierbei ist ein Vergleich mit der Halbwertsbreite eines Strahlers mit kontinuierlicher und konstanter Amplitudenbelegung aber gleicher Länge interessant: Nach Gl.(4) ist für 4 kHz und für eine Länge $l = 135$ cm

$$\alpha_H \pm 14^\circ$$

und für 6 kHz

$$\alpha_H \pm 11^\circ$$

Die Halbwertsbreite ist also ungefähr gleich der des hier entwickelten Strahlers.

Die Bemessung der einzelnen Schlitzte wurde wie bei der ersten Strahlerausführung vorgenommen. Das Rohr ist aus Pertinax, es hat einen Durchmesser von 4 cm und ist wieder mit einem Keil reflexionsfrei abgeschlossen. Hinter dem Keil am Rohrende ist die "Lichtkanone" untergebracht. Zur mechanischen Versteifung ist das Rohr mit einem U-Profil aus Aluminium gesichert. Gespeist wird der Strahler mit einem nach außen abgeschirmten Druckkammersystem, das bis zu 10 W belastbar ist. Die Montage auf einem Stativ gestattet eine Bewegung in allen Richtungen oberhalb der Horizontalen. Der gesamte Aufbau ist in Bild 14 zu erkennen.



Bild 14: Aufbau des Richtstrahlers

b) Zur Erprobung des so aufgebauten Richtsenders wurde der Versuch in der Kirche am Lietzensee wiederholt. Bei allen Senderstellungen war der Verlauf des einmal reflektierten Strahles jetzt eindeutig mit dem Ohr festzustellen. Gesendet wurde Terzbandrauschen der Mittenfrequenz von 4 kHz. Eine Versuchsstellung ist im Bild 15 gezeigt.

Der Lichtfleck aus der "Lichtkanone" kennzeichnet den Auftreffpunkt des primären Strahles und ist im Bild durch + markiert. Der reflektierte Strahl wird von der Versuchsperson wahrgenommen.

Zum Abschluß der Arbeit danken die Verfasser Herrn Prof. CREMER für Aufgabenstellung und für die wertvollen Anregungen, ebenso dem Bundesverkehrsministerium für die Bereitstellung der finanziellen Mittel und der Werkstatt des Instituts, insbesondere Herrn WARMBIER, für die sorgfältige Ausführung der mechanischen Arbeiten.



Bild 15: Erprobung des Senders in der Kirche am Lietzensee

LITERATURHINWEISE

- /1/ W.P. MASON
R.N. MARSHALL "A Tubular Directional Microphon"
JASA Vol. 10, 39, Seite 206 ff.
- /2/ G. KURTZE "Untersuchungen zur Konstruktion
eines eindimensionalen Richtmi-
krophones"
Sonderdruck aus "Technische Mittei-
lungen PTT", Nr. 1, 1954
- /3/ K. TAMM u. G. KURTZE "Ein neuartiges Mikrophon großer
Richtungsselektivität"
Acustica Vol. 4, 1954, S. 469 ff.
- /4/ F.A. FISCHER "Ueber den Zusammenhang von Richt-
charakteristik und Amplitudenver-
teilung, bei linearen und ebenen
Strahlergruppen"
Akustische Beihefte 1, 1951, S.9 ff.
- /5/ H. BERTULEIT "Die Vorzüge der Gaußfunktion gegen-
über anderen selbstreziproken Funk-
tionen"
Techn. Bericht Nr. 44 des Heinrich-
Hertz-Instituts
- /6/ H. STENZEL "Leitfaden zur Berechnung von
Schallvorgängen"
Springer Verlag, Berlin 1958

- /7/ F.B. DANIELS "On the Propagation of Sound Waves in a Cylindrical Conduit"
JASA Vol.22, 1950, S. 563 ff.
- /8/ L. CREMER "Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik" Band II
Verlag S. Hirzel, Stuttgart 1961
- /9/ "Lautsprechermessung im Watteraum"
Laboratoriumsübungen zur Technischen Akustik an der TU Berlin, Aufgabe Nr.14
- /10/ SCHELKUNOFF "A Mathematical Theory of Linear Arrays"
Bell Syst. Techn. Journ., Vol.22,
S. 80 ff.
- /11/ C.I. DOLPH "ACurrent Distribution for Broadside Arrays which Optimizes the Relationship Between Beam Width and Side-Lobe Level"
Proc. of the IRE, Vol.34, S. 335 ff.
- /12/ K. BAUR "Antennenzeilen mit gedämpften Nebenzipfeln"
Elektronische Rundschau 6, 1960