

Junger

Technischer Bericht Nr. 60

Entwicklung eines Richtlautsprechers
nach dem Interferenz-Röhren-Prinzip

von

Dipl.-Ing. D. SCHWARZE

Berlin
1 9 6 2

Entwicklung eines Richtlautsprechers nach dem
Interferenz-Röhren-Prinzip.

Zusammenfassung.

Auf Anregung des Bundesbahn-Zentralamtes wurde ein Richtstrahler entwickelt, der nach dem Interferenzröhrenprinzip arbeitet. Die hier beschriebene Beschallungsanlage stellt die Kombination eines solchen Gruppenstrahlers mit einem Rohr als Verzögerungsleitung dar.

An einem Versuchsmodell, einem kreisrunden Rohr mit 3 Gruppen seitlicher Öffnungen, wurden systematische Untersuchungen über den Schallfluß im Rohr und vor der Öffnung angestellt. Hier-nach wird eine betriebsfähige Anlage für Bahnsteige, die in Form eines sich stetig erweiternden Rechteckkanals mit 3 Lochgruppen ausgeführt ist, aufgebaut und untersucht.

Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung

Der Bearbeiter

gez. D. Schwarze

(Dipl.-Ing. D. Schwarze)

Der Abteilungsleiter,

Der Institutsdirektor

gez. L. Cremer

gez. Gundlach

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

(Prof.Dr.-Ing. F.W. Gundlach)

Berlin-Charlottenburg, den 16. Februar 1962

Lineare Schallstrahlergruppen mit natürlicher Laufzeitdifferenz.

I. Einleitung

Vom Bundesbahn-Zentralamt München wurde eine Untersuchung angeregt, mit dem Ziel, einen Richtstrahler zur Beschallung von Bahnsteigen der Bundesbahn zu entwickeln, der eine einseitige Richtcharakteristik aufweist, wobei insbesondere ein Gruppen-Strahler entwickelt werden sollte, der nach dem Interferenzröhren-Prinzip arbeitet. Empfänger nach diesem Prinzip wurden in praktischen Ausführungen bereits erprobt /1/.

Die bisherigen Beschallungsmethoden von Bahnsteigen der Bundesbahn sind sehr verschieden. Mittels linearer Schallstrahlergruppen, worunter man eine Reihe von Schallstrahlern versteht, die längs einer geraden Linie angeordnet sind, lassen sich Richtcharakteristiken erzeugen, die nur die auf dem Bahnsteig wartenden Reisenden oder tätigen Beamten mit der durchgegebenen Nachricht versorgen, dagegen nicht die sich in einiger Entfernung befindenden Wohnhäuser.

Die gewünschte Bündelung in der horizontalen Ebene wird erreicht, in dem alle Lautsprechersysteme gleichphasig erregt werden und die Strahlergruppe quer zur Bahnsteigrichtung montiert wird. Will man auch in vertikaler Richtung eine Bündelung erreichen, dann ordnet man die einzelnen Lautsprechersysteme in Form eines Schildes an, wobei die Erregung der Systeme gleichphasig erfolgt.

Da aber Bahnsteige eine Länge von 300 m besitzen, ist es praktisch nicht möglich, mit einer einzigen Strahlergruppe (zentrale Beschallung) einen ganzen Bahnsteig akustisch zu beherrschen. Es ist deshalb heute üblich, weniger gerichtete beiderseitig strahlende kleine Lautsprechersysteme, die meist als Exponentialtrichter ausgebildet sind, in größeren Abständen anzubringen, so wie es die Abb. 1 zeigt.

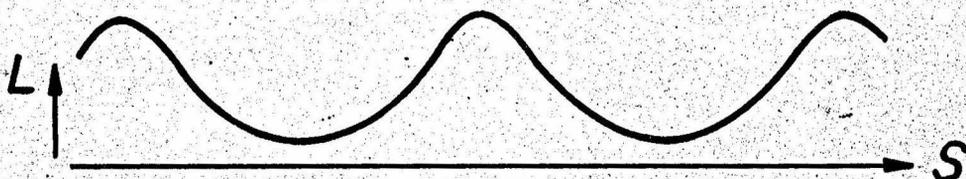
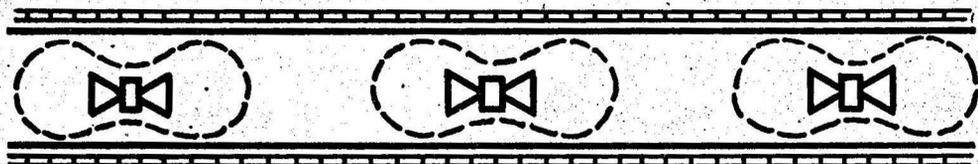


Abb. 1

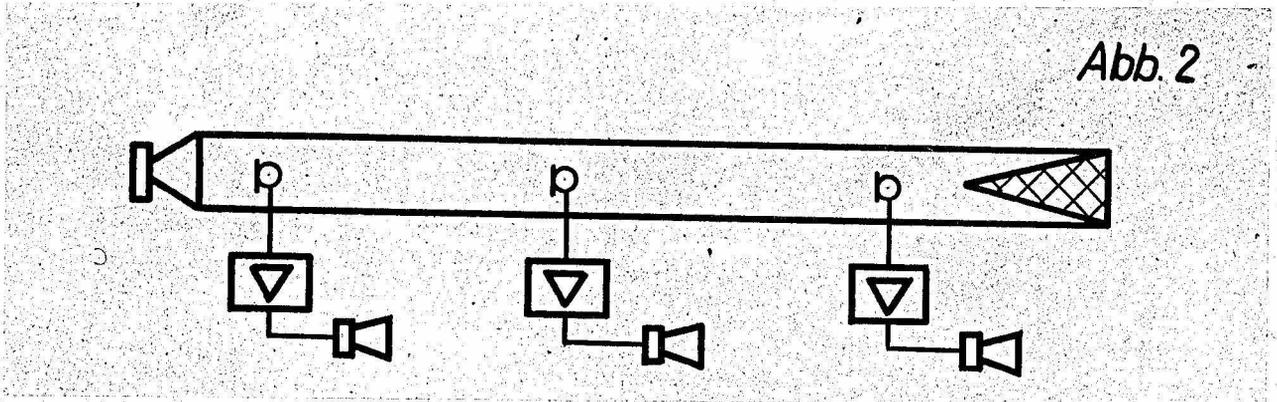
Neben der ungenügenden Richtwirkung hat diese Anordnung den Nachteil, dass der Schallpegel mit der Entfernung vom Lautsprecher stark abnimmt. In der Mitte zwischen zwei Lautsprechern ist der kleinste Schallpegel zu erwarten. In diesen Gebieten minimaler Lautstärke werden aber auch die entfernteren Lautsprecher hörbar, was zu störenden Echos führt, die die Nachricht schwer verständlich machen können.

Um diese Echowirkung auszuschliessen, kann man künstliche Laufzeitverzögerungen in Form von Magnetbandschleifen einführen. Diese Art der Laufzeitverzögerung ist jedoch mit hohen Anschaffungskosten und einer beträchtlichen Wartung verknüpft. Die Laufzeiteinrichtung speist die längs eines Bahnsteiges nach der Art der Abb. 1 verteilt aufgestellten Lautsprecher entsprechend dem Schallweg nacheinander. Es dürfen jedoch die Lautsprecher nicht wie die Abb. 1 zeigt nach beiden Seiten abstrahlen, sondern sie müssen einseitig gerichtet sein, da sonst die Laufzeitunterschiede in der entgegengesetzten Richtung verdoppelt werden würden.

Da aber bei der Beschallung von Bahnhöfen nur Sprache übertragen werden soll und nicht hochwertige Musik, bietet sich die natürliche Schallverzögerung mittels eines Rohres an, bei der zur Verzögerung der Luftweg im Rohr benutzt wird.

Auf der einen Seite des Rohres befindet sich ein Lautsprecher, die andere Seite ist reflexionsfrei abgeschlossen. Jeweils nach bestimmten Laufwegen des Schalles befindet sich ein Mikro-

phon im Rohr, an das ein Verstärker mit nachfolgendem einseitig gerichteten Lautsprecher angeschlossen ist (Abb. 2).



In ähnlicher Form wurde im Jahre 1936 im Berliner Poststadion ein Rohr als reine Verzögerungsleitung verwendet. Es diente der Versorgung einer Gruppe von Schallzeilen, die unter Berücksichtigung des Verfahrens von Gladenbeck und Flanze /2/ zur Beschallung von grossen Flächen entsprechend erstellt waren. Das eine Ende des Rohres war mit einem Lautsprecher, das andere Ende reflexionsfrei abgeschlossen. Etwa 1 m vor dem reflexionsfreien Abschluss befand sich ein Mikrofon, das einen Verstärker mit anschliessender Lautsprecherzeile speiste. Das Rohr hatte einen Durchmesser von 7,5 cm (Rohrpostrohr) und eine Länge von 50 m. Es war 50 cm tief im Boden verlegt und mit Dämpfungstoffen zur Vermeidung von Körperschallübertragung umwickelt.

Nun beruht das eingangs erwähnte Interferenzröhrenprinzip ebenfalls auf Laufzeitunterschiede zwischen benachbarten, in diesem Falle dichtbenachbarten Schallstrahlern. Es führt also bereits bei der einzelnen Gruppe auf eine Erstreckung in Bahnsteigrichtung. Eine solche Ausdehnung der Strahlergruppe ist den räumlichen Verhältnissen eines Bahnsteiges angemessener als Querzeilen oder Lautsprecherschilde.

Die Abb. 3 zeigt ein Rohr, das an einem Ende einen Lautsprecher besitzt, am anderen Ende reflexionsfrei abgeschlossen ist und in seiner Wandung Löcher aufweist, die als Punktstrahler mit natürlicher Laufzeitverzögerung wirken. Ein solches System besitzt eine einseitige Richtcharakteristik in Rohrrichtung.

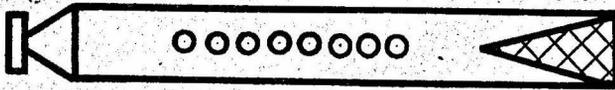


Abb. 3

Eine Richtwirkung und Echogefahren berücksichtigende Lösung des Beschallungsproblems von Bahnsteigen ist die Kombination des in Abb. 3 gezeigten Sendesystems mit dem in Abb. 2 gezeigten Rohr als Verzögerungseinrichtung. Dazu wird ein langes Rohr verwendet, das an einem Ende durch einen kräftigen Lautsprecher, am anderen Ende reflexionsfrei abgeschlossen ist und das Gruppen von Bohrungen aufweist, die durch grössere Zwischenräume unterbrochen sind. Die Länge der Gruppe richtet sich nach der unteren Grenzfrequenz, bei der noch hinreichende Richtwirkung erzielt werden soll. Der Abstand der Gruppen wird zweckmässig kleiner als 17 m gewählt, damit auch die geringen rückwärts laufenden Schallanteile der nächsten Lochgruppe mit Sicherheit kein Echo erzeugen können. Das Prinzip dieser Anordnung zeigt Abb. 4.

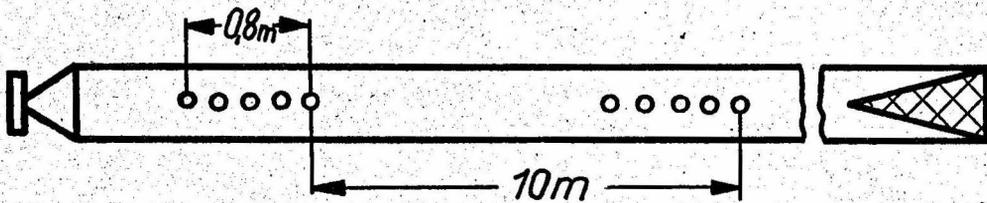


Abb. 4

Der Abstand zwischen den einzelnen Gruppen darf andererseits nicht zu gering werden, da sonst die Strahlungsverluste zu gross werden. Im Interesse gleichmässiger Energieverteilung liegt es auch, wenn die dem Sender nahegelegenen Gruppen kleine Bohrungen und die späteren grössere Bohrungen aufweisen. Zur Vermeidung von Reflexionen an den Übergängen zwischen angebohrten und nicht angebohrten Rohrabschnitten ist es zweckmässig, in jeder Gruppe mit kleinen Bohrungen zu beginnen und mit kleinen Bohrungen wieder auszulaufen. Es ist natürlich auch möglich, statt der einzelnen Bohrungen einen kontinuierlich sich erweiternden Schlitz zu verwenden, der gegebenenfalls zur Erhöhung des Reibungswiderstandes mit einem Stoff oder einer Gaze abgedeckt werden kann /1/.

II. Wahl des Rohrdurchmessers

Wie in Abb. 2 und Abb. 4 dargestellt, wird ein Rohr als Verzögerungsleitung benutzt, das an einer Seite mit einem kräftigen Lautsprecher und an der anderen Seite reflexionsfrei abgeschlossen ist. Dieses Rohr bringt wegen der frequenzabhängigen Vernichtung von Schallenergie vor allem durch Reibung an den Rohrwandungen einige Besonderheiten der Schallfortpflanzung mit sich. Die Ausbreitung läßt sich nach der von Kirchhoff /3/ geschaffenen Behandlungsweise für im Verhältnis zur akustischen Grenschichtdicke weite Rohre als eindimensionales Problem rechnen. Im größten Teil des Rohres schwingt die Luft als zylindrischer Kern mit nahezu ebener Wellenfront. Nur in einer schmalen Randzone, die bei weiten Rohren gegen den Radius vernachlässigbar klein ist, sinkt die Schnelle ab, um an der Wand dann zu verschwinden. Das Dämpfungsmass errechnet sich nach den Untersuchungen von Kirchhoff /3/ zu

$$\beta/\text{cm} = 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{U/\text{cm}}{F/\text{cm}^2} \cdot \sqrt{f/\text{Hz}} \quad (1)$$

U = Umfang des Rohres in cm

F = Rohrquerschnitt in cm²

f = Frequenz in Hz

Demnach steigt das Dämpfungsmaß mit der Wurzel der Frequenz an. Für ein kreisrundes Rohr geht Gl. (1) über in

$$\beta/\text{cm} = 6,0 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{\sqrt{f/\text{Hz}}}{d/\text{cm}}$$

Mit steigendem Rohrdurchmesser wird das Dämpfungsmass geringer. Es beträgt beispielsweise für einen Rohrdurchmesser von 4 cm die Dämpfung auf 10 m für 200 Hz 2,0 dB, für 12800 Hz aber bereits 16,0 dB. Bei einem Rohrdurchmesser von 20 cm dagegen beträgt die Dämpfung auf 10 m für 200 Hz 0,4 dB und für 12800 Hz nur 3,2 dB. Man sieht daraus schon, dass man aus Energierücksichten bei grösseren Rohrlängen zu grösseren Rohrdurchmessern übergehen muss.

Voraussetzung für eine störungsfreie Schallfortpflanzung im Rohr ist jedoch, dass der am Rohranfang auftreffende Schall sich im Rohr als ebene Welle fortsetzt. Nach Rayleigh /4/ ist diese Forderung immer dann erfüllt, wenn der Rohrdurchmesser klein zur Wellenlänge ist. Es gilt

$$\lambda > 3,413 r \quad (2)$$

Dies bedeutet z.B., dass bei einem Rohr von 6 cm Radius, oberhalb von 1700 Hz die ebene fortschreitende Welle nicht allein erzeugt werden kann, wenn irgend eine Abweichung von einer über den Querschnitt gleichen Anregung am Eingang des Rohres vorliegt.

Um dies mit nichtstationären Schallereignissen nachzuprüfen, wurden an einem 25 m langen Rohr, dessen Durchmesser 12 cm betrug, Untersuchungen mit Frequenzgruppenbreiten Gaußtönen /5, 6/ angestellt. Gaußtöne sind Tonimpulse, die nach einer Gauß'schen Fehlerkurve moduliert sind. Nach der Rayleigh'schen Beziehung (2) war zu erwarten, dass oberhalb von 1700 Hz auch ungleichmässige Querverteilungen auftreten, denen eine andere Phasengeschwindigkeit und Dämpfung zukommt.

Die Untersuchungen mit Gaußtönen hatten zum Ergebnis, dass erst dann Querresonanzen auftreten, wenn die Wellenlänge kleiner als der Rohrdurchmesser wird. Bei symmetrischer Anregung enthält damit das Wellenfeld nur solche Querverteilungen, die keine Knoten in der Mitte haben (Ungeradzahlige Moden). Bürck und Lichte /7/ kamen mit getasteten Sinustönen zum selben Ergebnis..

Die für die ungleichmässigen Querverteilungen möglichen Querresonanzen wirken sich sehr störend auf die Sprachübertragung aus. Aus diesem Grunde sind den Rohrabmessungen nach oben Grenzen gesetzt.

Aus diesen Voruntersuchungen ist zu folgern, dass man bezüglich der Rohrabmessungen, den Rohrdurchmesser nicht zu klein wählt, um die Dämpfung nicht zu gross werden zu lassen, andererseits aber den Durchmesser nicht zu gross wählt, damit sich keine höheren Moden im interessierenden Sprachübertragungsbereich ausbilden können.

und

3. einem Strahlungswiderstand, der sich bei dem gegebenen Schallfluß ($\pi a^2 \cdot v$) und unter der Annahme einer allseitig gleichmässigen Abstrahlung in den Raum, errechnet zu

$$w_{\text{Str.}} = \zeta c \cdot \left(\frac{\omega a}{2 c} \right)^2 \quad (3c)$$

Somit ergibt sich:

$$v = \frac{p_0}{j\omega \zeta (l_0 + 1,6 a) + r_L + \zeta c \cdot \left(\frac{\omega a}{2 c} \right)^2} \quad (4)$$

Von diesen Widerständen überwiegt unterhalb von 5000 Hz, also in dem hier interessierenden Frequenzbereich, der Massenwiderstand bei weitem, so dass man aus Gl. (4) erhält:

$$v = \frac{p_0}{j\omega \zeta 1,6 a} \quad (4a)$$

Aus der Schnelle v ergibt sich der Schalldruck eines Punktstrahlers im Fernfeld zu:

$$p_1 = \frac{j\omega \zeta \pi a^2}{4 \pi r} \cdot v \quad (5)$$

und somit wird mit Gl. (4a)

$$p_1 = \frac{a}{4 r 1,6} \cdot p_0 \quad (6)$$

Die Gl. (6) sagt aus, dass im betrachteten Frequenzbereich sowohl der Radius a der Öffnung als auch der Schalldruck im Rohr p_0 dem Schalldruck im Fernfeld p_1 proportional ist. In Abb. 6 ist das Verhältnis der Schalldrücke vor einer kreisrunden Öffnung mit dem Durchmesser d zu einer Öffnung mit dem Durchmesser $d = 3$ mm aufgetragen. Wie man sieht, steigen die Schalldrücke mit wachsendem Lochdurchmesser an, doch nicht so stark, wie es die Rechnung nach Gl. (6) ergab. Für die vorliegende Untersuchung ist die Übereinstimmung aber genau genug. Die Abweichung von dem eingetragenen theoretisch erwarteten Verlauf ist bei der Unsicherheit derartiger Messungen und den vorgenommenen Vereinfachungen in Gl.(4) erklärlich.

In Abb. 7 ist die Differenz der beiden Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Frequenz aufgetragen. Der Radius der seitlichen Öffnung betrug 1,2 cm und der Mikrofonabstand $r = 33$ cm. Im Bereich zwischen den Meßfrequenzen 100 Hz und 2000 Hz ist der Zusammenhang des Schalldruckes im Rohr p_0 und des Schalldruckes vor der Öffnung p_1 nahezu frequenzunabhängig. Oberhalb 2000 Hz wird jedoch der Unterschied beider Schalldruckpegel mit steigender Frequenz geringer. Nach Gl. (6) wurde eine Pegeldifferenz von 44,8 dB errechnet; die Messung dagegen ergab 42,5 dB, so dass von einer guten Übereinstimmung gesprochen werden kann.

Es muss weiterhin gefragt werden, ob die an einer Austrittsöffnung auftretenden Reflexionen zu vernachlässigen sind. Der Schallfluss setzt sich, wie es in Abb. 5 skizziert ist, an der Öffnungsstelle aus folgenden Gliedern zusammen.

$$q_{1+} + q_{1-} = q_2 + q_3 \quad (7)$$

Es beträgt der Schalldruck im Rohr:

$$p_0 = \frac{\rho c}{S} (q_{1+} - q_{1-}) = \frac{\rho c}{S} q_2 = \frac{q_3}{S} \quad j\omega m \quad (8)$$

wobei $S = \pi A^2$ Rohrquerschnittsfläche ($A = 6$ cm)

$$s = \pi a^2 \text{ Öffnungsfläche} \quad (0,1 \leq a \leq 1 \text{ cm})$$

$$m = 1,6 a \rho \text{ Massenwiderstand}$$

Aus Gl. (8) ergibt sich

$$q_3 = \frac{\pi a c}{j\omega 1,6 S} \cdot q_2 \quad (9)$$

$$\text{abgekürzt: } q_3 = -j \xi q_2 \quad (9a)$$

Aus Gl. (7) und (8) ergibt sich dann

$$\frac{q_1}{q_{1+}} = \frac{(\xi/2)^2}{1 + (\xi/2)^2} - j \frac{\xi/2}{1 + (\xi/2)^2} \quad (10)$$

Die hier in Betracht kommenden Lochdurchmesser sind stets ≤ 1 cm, so dass ξ oberhalb 100 Hz ebenfalls < 1 wird, bei dem oben angegebenen Rohrradius. Das Verhältnis der Beträge von

rückeilem und hineilem Schallfluß ist

$$\left| \frac{q_{1-}}{q_{1+}} \right| \approx \frac{\xi}{2}$$

ξ wird nach Gl. (9) mit wachsender Frequenz stetig kleiner und zwar so, dass die Amplitude des an der seitlichen Öffnung reflektierten Schallflusses mit $1/\omega$ gegenüber dem hineilem Schallfluß abnimmt. Diese Anordnung hat den Charakter eines Hochpasses.

Nun interessieren für Sprachübertragungen nur Frequenzen über 300 Hz; man kann sogar sagen, dass eine Beschneidung der tieferen Frequenzen, die zweckmäßigerweise schon im Vorverstärker vorgenommen wird, der Verständlichkeit nur zugute kommt.

Mit $a_{\max} = 1 \text{ cm}$; $S = \pi 6^2 = 113 \text{ cm}^2$ und $c = 34000 \text{ cm s}^{-1}$ ergibt sich für :

$$\xi_{\max} = 0,314$$

Damit wird das Verhältnis der reflektierten zur auffallenden Energie

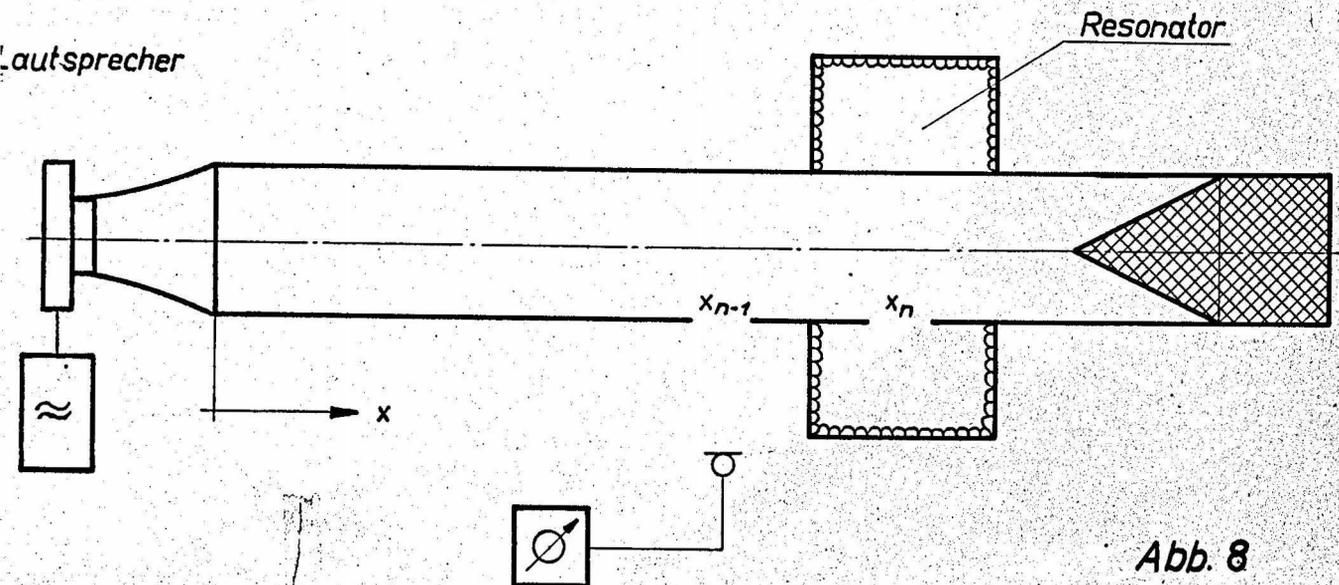
$$\frac{\xi^2}{4} = 0,0227,$$

das der durchgelassenen zur auffallenden entsprechend 0,977

B. Untersuchung an einer Lochgruppe.

Es fragt sich nun, wie sich der Durchmesser einer jeden seitlichen Öffnung in einer Lochgruppe mit dem Abstand von der Schallquelle am Ende des Rohres ändern muss, damit aus jeder einzelnen seitlichen Öffnung der gleiche Schallfluss austritt. Die für diese Untersuchung aufgebaute Versuchsanordnung zeigt im Prinzip die Abb. 8. Im reflexionsarmen Raum des Instituts für technische Akustik der Technischen Universität wurde ein 4 m langes kreisrundes Rohr, dessen Durchmesser 12 cm betrug, montiert. Das Rohr war auf einer Seite mit einem Lautsprecher, auf der anderen Seite reflexionsfrei mit einem Mineralfaserkeil abgeschlossen.

Im Abstand x_n vom Rohrende wurde eine seitliche Öffnung angebracht. Da im Fernfeld der Schallfluß q dem Schalldruck proportional ist, konnte der Schalldruck vor dem Loch mittels eines Mikrophons gemessen werden. Anschliessend wurde das an der Stelle x_n angebrachte Loch mit einem Kasten abgedeckt von solchem Volumen, dass er zusammen mit dem abgedeckten Loch einen tiefabgestimmten Helmholtz-Resonator ergab. Damit wurde der Eingangswiderstand am Loch praktisch nicht geändert.



Dann wurde ein zweites Loch an der Stelle $x_n - 1$ im Abstand von 3,4 cm vom ersten Loch so weit aufgebohrt, bis vor dem nicht abgedeckten Loch der gleiche Schalldruck gemessen wurde, wie vor dem ersten Loch usw.

Die Tabelle gibt die gemessenen Werte an.

a_n	7,0	7,2	7,5	8,0	8,6	9,0	10,2	11,0	mm
-------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	----

IV. Betriebsfähige Ausführung zur Beschallung von Bahnsteigen.

Bei dem oben erwähnten ersten Versuchsmodell, einem Rohr von gleichmässigen Durchmesser, bestand oberhalb der Grenzfrequenz die Gefahr, dass sich Querresonanzen nachteilig bemerkbar machen. Es wurde daher für zweckmässig erachtet, den Durchmesser bzw. die Querabmessungen allmählich zu verändern. Dabei empfiehlt sich eine stetige Erweiterung des Rohres.

Andererseits wurde auch bei dem endgültigen Modell vom kreisförmigen Querschnitt abgewichen und zum rechteckigen Querschnitt übergegangen.

Der sich stetig erweiternde Rechteckkanal hatte eine Länge von 25 m. Das eine Ende des Kanals war über ein exponentielles Anpassungsstück an ein 25 Watt Druckkammersystem der Firma Beyer angeschlossen. Den Frequenzgang des Erregersystems mit exponentiellem Anpassungsstück gemessen im Kanal zeigt die Abb. 9. Der Anfangsquerschnitt des Kanals betrug $5 \times 7,5 \text{ cm}^2$, der Endquerschnitt $20 \times 30 \text{ cm}^2$. Das andere Ende des Rohres war nicht wie beim ersten Versuchsmodell mit einem Keil reflexionsfrei abgeschlossen, sondern es ging in ein Exponentialhorn über. Dies ist sicher vom Standpunkt eines vernünftigen Energiehaushaltes günstiger als ein Keil. Das Exponentialhorn wird zur Schallabstrahlung in der gewünschten Richtung ausgenutzt.

Es wurden 3 Lochgruppen von je 1,20 m Länge in einem Abstand von 10 m an der Unterseite des Rechteckkanals gebohrt. Die Dimensionierung erfolgte mit dem Ziel, dass am Ende des Kanals der Schallfluß ebenso groß wird, wie der aus jeder Gruppe austretende Schallfluß.

Die Abb. 10 zeigt den mit einem Richtmikrophon direkt unter je einer der 3 Lochgruppen aufgenommenen Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Frequenz. Die drei Masskurven zeigen eine gute Übereinstimmung.

Leider konnte der Rechteckkanal nur unter einem Dachvorsprung montiert werden, so dass Reflexionen von der im Abstand von 60 cm befindlichen Wand eine genaue Untersuchung der Richtcharakteristik einer Lochgruppe unmöglich machten.

Es zeigte sich jedoch, dass die Sprachverständlichkeit noch 4 m neben dem Rohr gut war. Bei Belastung des Druckkammersystems mit 8 Watt stellte sich unter dem Rohr eine Lautstärke von 75 DIN-PHON ein, die mit wachsendem Abstand vom Rohr schnell abnahm.

Die Aufnahme der Richtcharakteristik konnte jedoch nach Fertigstellung des grossen reflexionsarmen Raumes im Institut für technische Akustik nachgeholt werden. Dazu wurde ein Teil der

Anlage demontiert und auf das etwa in halber Raumhöhe befindliche Stahlnetz gelegt. Die Abbildungen 11 und 12 zeigen die Richtdiagramme einer Lochgruppe in zwei verschiedenen Ebenen bei den Frequenzen 500 Hz, 1000 Hz und 4000 Hz. In Abb. 11 wurde die horizontale (x - y - Ebene) und in Abb. 12 die vertikale (x - z - Ebene) Richtcharakteristik aufgenommen. Das Vor-Rückwärtsverhältnis ist bei allen gemessenen Frequenzen besser als 16 dB.

Da die Bahnsteige der Deutschen Bundesbahn eine Länge von ca. 300 m haben, wovon ca. 210 m überdacht sind, ist es nicht möglich, einen solchen Bahnsteig mit einem einzigen Rohrsystem zu beschallen. Es bedeutet andererseits keine Schwierigkeit, die Rohrlänge auf 50 m zu erweitern, bei gleichzeitiger Erhöhung der Leistung des Druckkammersystems auf 12 - 15 Watt. Es wurde von der Deutschen Bundesbahn das in Abb. 13 angegebene Beschallungssystem vorgeschlagen.

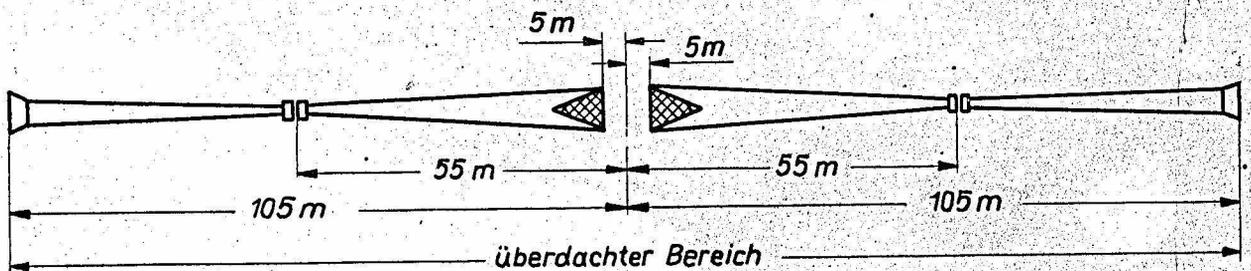


Abb. 13

Nach diesem Prinzip wurde für den Hauptbahnhof Braunschweig eine Anlage projektiert, wobei für jede Bahnsteighälfte eine getrennte Anlage vorgesehen war. Dabei wurde aus fertigungstechnischen Gründen von dem sich stetig erweiternden Rechteckkanal abgewichen und zum kreisrunden Rohr übergegangen, das sich in Stufen von 2 m vom Durchmesser $d_1 = 7$ cm nach 50 m auf den Durchmesser $d_{25} = 28$ cm erweiterte. Aus architektonischen Gründen ist die Ausführung des Projektes bisher nicht durchgeführt worden.

Bei einem Neubau müsste es jedoch möglich sein, eine solche Übertragungsanlage mit in die Planung einzubeziehen. Dabei wäre es zweckmässig, nur eine einzige in der Mitte der Bahnsteigüberdachung zu montierende Anlage vorzusehen, die bei geeigneter Anbringung der Lochgruppen beide Bahnsteigseiten versorgen könnte.

Auch wenn auf die natürliche Laufzeitverzögerung zwischen den einzelnen Lochgruppen verzichtet werden würde, wäre es möglich, einzelne Richtstrahler nach dem Interferenzröhrenprinzip auf der Basis sich stetig erweiternder kreisrunder Löcher oder eines sich stetig erweiternden Schlitzes, für die Beschallung von Bahnsteigen vorzusehen.

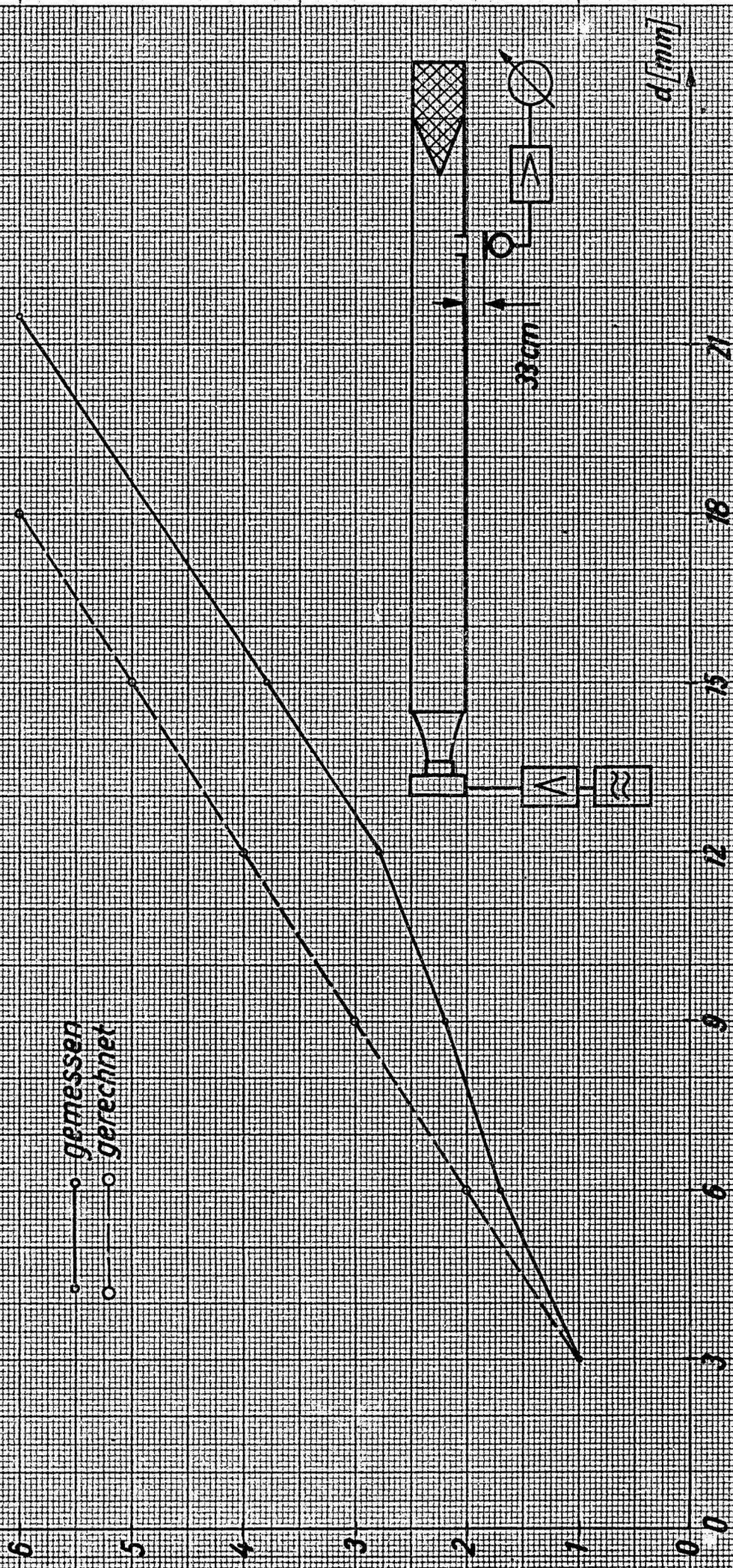
Der Deutschen Bundesbahn sei an dieser Stelle für die Anregung zu dieser Arbeit und für die Bereitstellung der Mittel aus dem ERP-Fond gedankt. Ebenso habe ich Herrn cand.-ing.von Meier für die Hilfe bei Messungen und Rechnungen zu danken.

- /1/ K. Tamm und G. Kurtze "Ein neuartiges Mikrophon grosser Richtungsselektivität" Acustica Vol. 4, 1954, Seite 469-470
- /2/ C. Trage "Ein neues Verfahren zur Schallversorgung von grossen Flächen" Telegraphen-, Fernsprech- und Funk-Technik, 1936 Seite 120-123
- /3/ Kirchhoff Pogg. Annalen 134 (1868) Seite 177
- /4/ J.W.S. Rayleigh "The Theory of Sound" Vol. II, Seite 161, New York 1945
- /5/ A. von Meier und D. Schwarze "Untersuchung von Richtcharakteristiken eindimensionaler Strahler mit Anwendung auf die Entwicklung von zwei Richtlautsprechern für das Gebiet um 4000 Hz" Bericht des Heinrich-Hertz-Instituts Nr. 55, 1961
- /6/ D. Schwarze "Über die Lautstärke von Doppelimpulsen" Bericht des Heinrich-Hertz-Instituts Nr. 56, 1961
- /7/ W. Brück und H. Lichte "Über die Schallfortpflanzung in Rohren" Akustische Zeitschrift 1938, Seite 259-270
- /8/ L. Cremer "Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik - Band II" "Statistische Raumakustik" Hirzel 1961 Seite 171 ff.

Abb. 6

Verhältnis der Schalldrücke vor einem seitlichen Loch mit dem Durchmesser d zu einem Loch mit dem Durchmesser $d=3\text{mm}$

o gemessen
o gerechnet



$L_{p_0} - L_{p_1}$ [dB]

Differenz zwischen dem
Schallpegel L_{p_0} im Rohr
und dem Schallpegel
 L_{p_1} vor dem Rohr, als
Funktion der Frequenz f

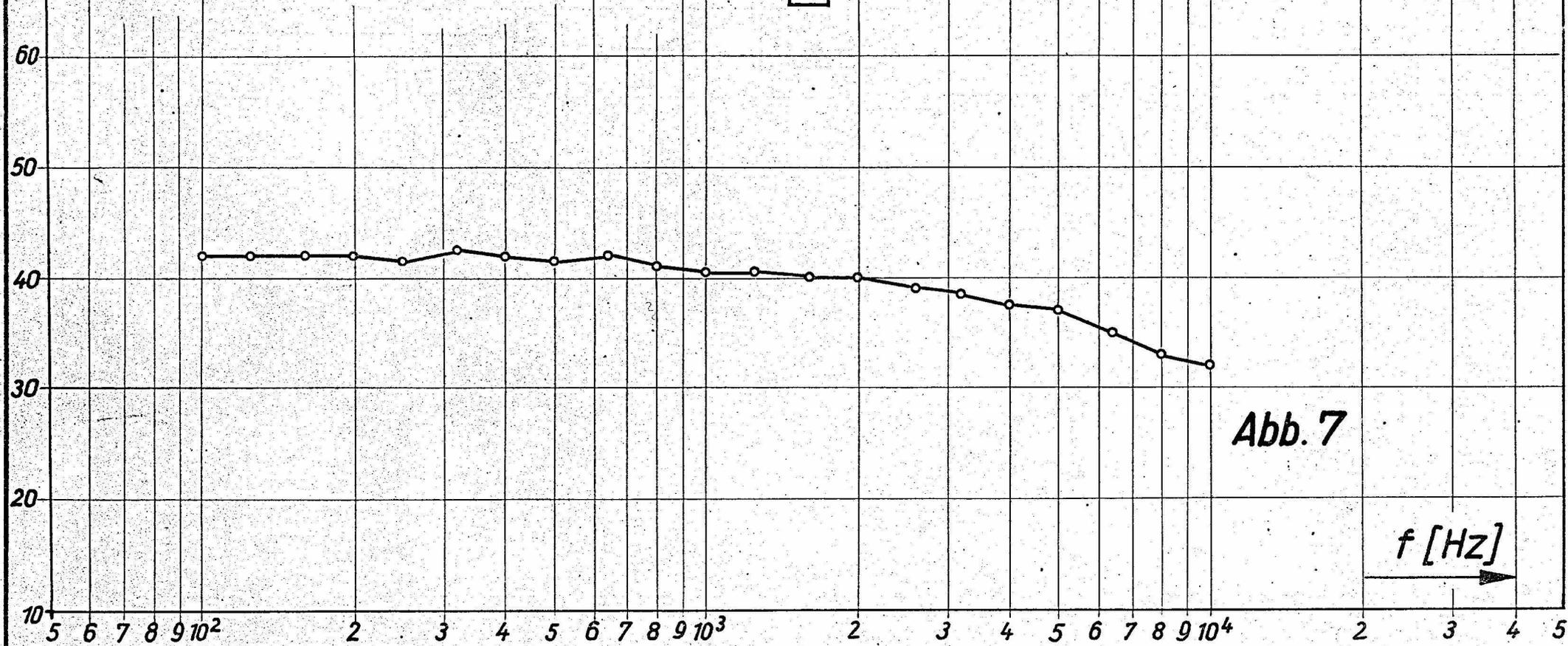
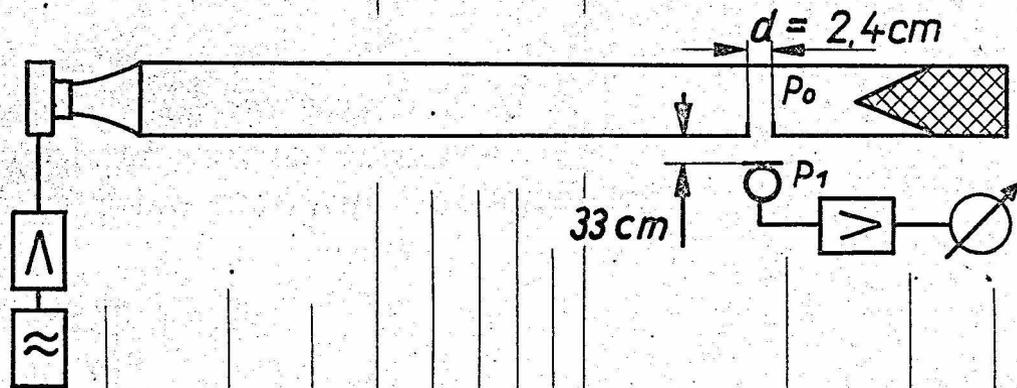


Abb. 7

f [Hz]

Abb. 9

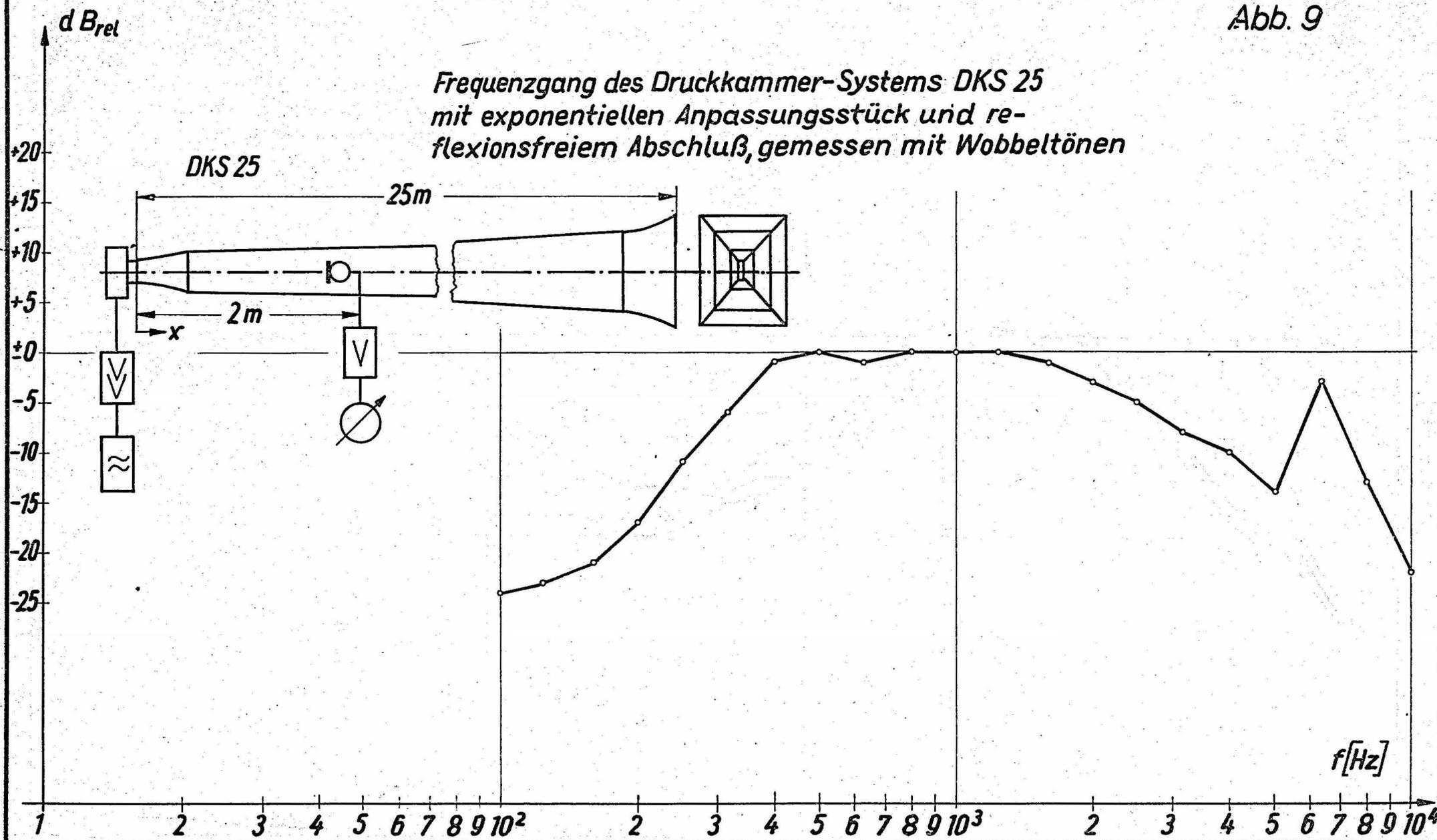
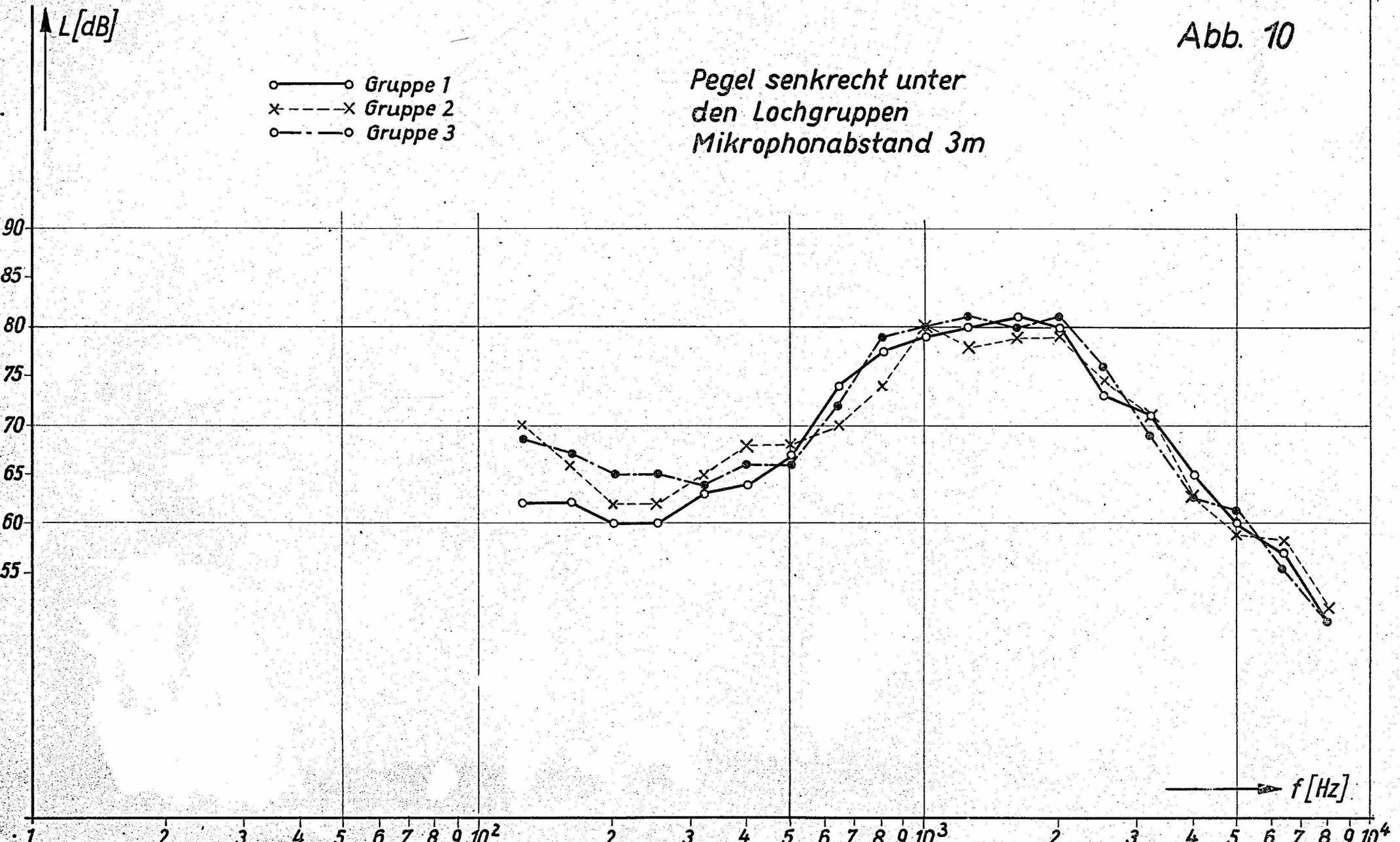


Abb. 10

Pegel senkrecht unter
den Lochgruppen
Mikrofonabstand 3m

- Gruppe 1
- ×---× Gruppe 2
- - -○ Gruppe 3



x - y - Ebene

○—○ 500 Hz
x—x 1000 Hz
●—● 4000 Hz

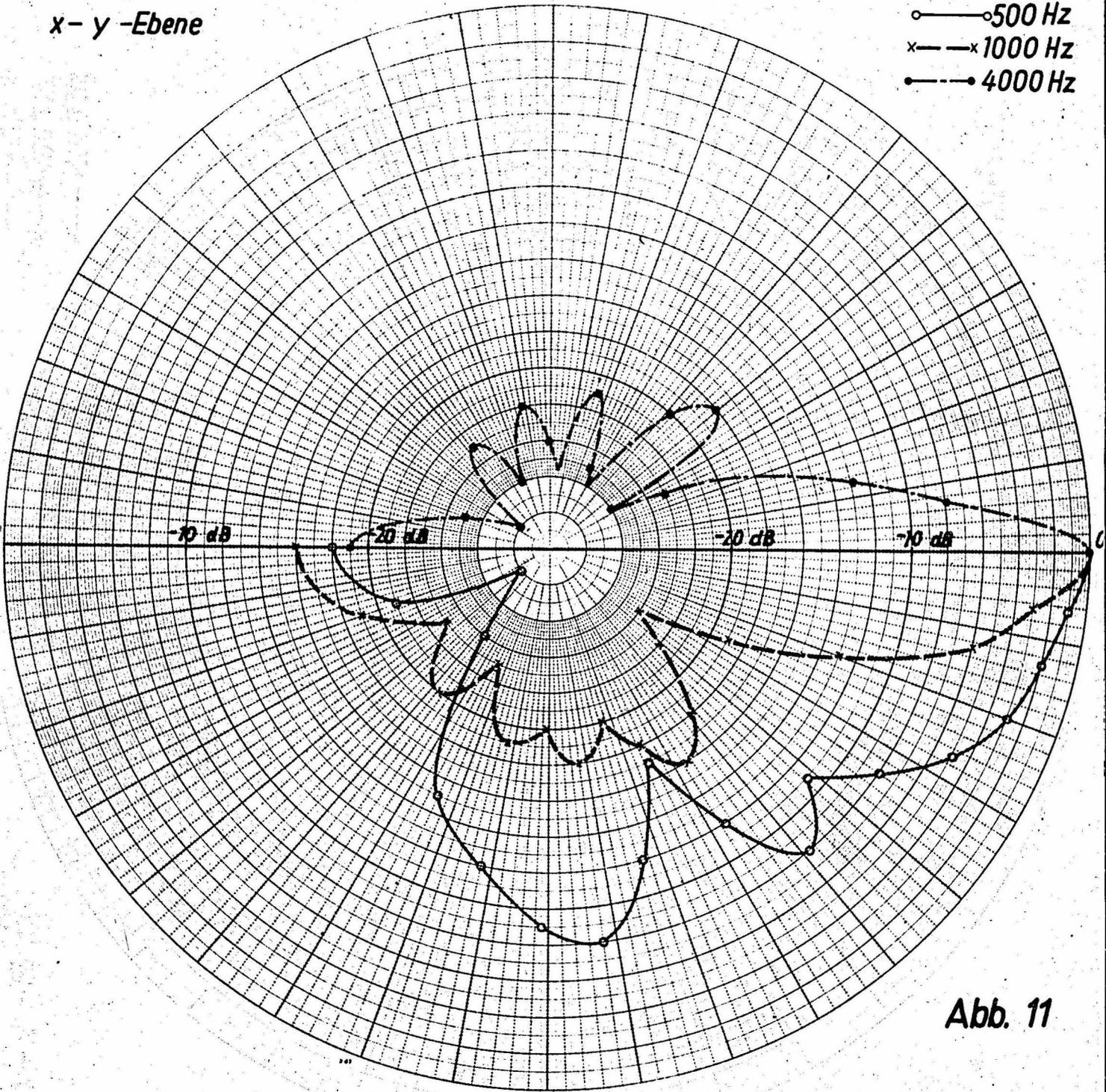


Abb. 11

