

# Hörsamkeit großer Räume

---

# Hörsamkeit großer Räume

Von

**Dr.-Ing. Eugen Michel**

ord. Professor an der Technischen Hochschule in Hannover

---

Mit 84 Abbildungen im Text und auf 16 Tafeln



---

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

---

Alle Rechte vorbehalten

---

ISBN 978-3-663-06347-6 ISBN 978-3-663-07260-7 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-663-07260-7

Copyright, 1921, by Springer Fachmedien Wiesbaden

Ursprünglich erschienen bei Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, Germany 1921

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1921

## Vorwort.

---

Indem ich hiermit das Ergebnis meiner Studien über die Hörsamkeit großer Räume der Öffentlichkeit übergebe, möchte ich nicht verfehlen, allen denen, welche mir mit ihrem Rat zur Seite gestanden haben, meinen aufrichtigsten Dank auszusprechen. Vor allem gilt dies von Herrn Geh. Hofrat Prof. Herm. Pfeifer in Braunschweig, der mir aus dem reichen Schatz seiner Erfahrungen und Beobachtungen manche wertvolle Angabe machen konnte. Auch war Herr Prof. Dr. Precht so liebenswürdig, mir seine eingehenden Messungen mitzuteilen, welche er im Kuppelsaal der Stadthalle in Hannover vorgenommen hat und über die er demnächst Näheres bekannt geben wird. Ferner sei mit voller Anerkennung des Verlages Friedr. Vieweg & Sohn in Braunschweig gedacht, der es trotz der schwierigen Zeitläufte ermöglicht hat, das Buch in würdiger Ausstattung erscheinen zu lassen.

Hannover, im September 1920.

**Eugen Michel.**

## Inhaltsverzeichnis.

---

	Seite
Einleitung . . . . .	1
Verlauf der Schallwellen . . . . .	2
Rückwurf . . . . .	2
Ebene Fläche . . . . .	2
Gekrümmte Fläche . . . . .	12
Rundstab, Hohlkehle, Karnies, Gesims, Rundbogentonne, Kuppel, Spitzbogentonne.	
Stütze . . . . .	25
Pfeiler, Säule.	
Flächenbehandlung . . . . .	29
Sonstige Gesichtspunkte . . . . .	31
Praktische Fälle . . . . .	31
Resonanz . . . . .	38
Interferenz . . . . .	41
Stärke der Schallwellen . . . . .	43
Abnahme nach der Entfernung . . . . .	43
Dämpfung beim Rückwurf . . . . .	46
Nachhall . . . . .	50
Verbesserung schlechter Hörsamkeit . . . . .	54
Schluß . . . . .	58

---

## Berichtigungen.

- Seite 3, Abb. 2:  
Der Mittelpunkt rechts muß die Bezeichnung  $M'$  anstatt  $M$  tragen.
  - Seite 14, Zeile 11 von unten, muß es heißen:  
ein Echo beobachtet werden kann, wenn sie sich dem Schall nur einigermaßen  
flächig entgegenstellen.  
Die einzelne kleine Teilform .....
-

## Einleitung.

Ein sehr wichtiges, dabei aber sehr vernachlässigtes Gebiet bauwissenschaftlicher Forschung ist das der Hörsamkeit großer Räume. Gewiß beschäftigen sich immer wieder Physiker, Architekten und Musikverständige mit den einschlägigen Fragen, aber die Ergebnisse dieser Studien sind vielfach unklar, widersprechen einander und haben noch nicht zu allgemein anerkannten, abgeklärten Grundsätzen geführt, die das Geheimnis der Hörsamkeit einem größeren Kreis zu entschleiern vermöchten.

Es dürfte sich daher verlohnen, das bisher Erreichte einheitlich zusammenzufassen und womöglich noch etwas auszubauen.

Wenn es sich darum handelt, den Neubau eines großen Vortrags- oder Konzertsaales, eines Theaters oder einer Kirche in die Wege zu leiten, erhebt sich jedesmal von neuem die Frage, wie man es anzustellen habe, um einer rednerischen oder musikalischen Vorführung volle Verständlichkeit und gute Klangwirkung zu sichern. Eine einigermaßen befriedigende Antwort können wir auf die Dauer nur erwarten, wenn nach diesem Ziel von verschiedenen Seiten aus gemeinsam hingearbeitet wird und sich dabei vor allem Naturwissenschaft und Bauwissenschaft die Hand reichen. Die erstere hat durch physikalische Untersuchungen Klarheit über das Wesen des Schalls, insbesondere über seine Entstehung und Fortpflanzung und über seinen Verbleib zu schaffen, während es Aufgabe der Bauwissenschaft sein muß, auf die Ergebnisse der physikalischen Forschung gestützt, den Einfluß der Raumgestaltung und Raumgröße und die Einwirkung der verschiedenen Baustoffe zu ergründen.

Der naturgemäße Gang wird dabei der sein, daß man zunächst vorhandene Räume, über deren Hörsamkeit sich bereits ein bestimmtes Urteil gebildet hat, nach den verschiedensten Gesichtspunkten nachprüft und damit die Tatsachen festzustellen sucht, auf die sich eine gute oder schlechte Hörsamkeit begründet. Durch Schlußfolgerung lassen sich dann aus den gemachten Beobachtungen gewisse Lehren ziehen, welche sich beim Entwurf neuer Bauanlagen ähnlicher Art oder beim Umbau solcher Räume, deren Hörsamkeit sich als ungünstig herausgestellt hat, verwerten lassen<sup>1)</sup>.

---

<sup>1)</sup> Wochenschr. d. Ver. deutsch. Ing. 1877, S. 116. — Deutsche Bauztg. 1886, S. 22. — Zeitschr. f. Arch. u. Ingenieurwesen, Heftausg. 1896, S. 19. — Desgl. Wochenausg. 1900, S. 193. — Journ. of the Franklin Inst., Bd. 179, S. 2, 1915. — Zentralbl. f. d. deutsche Baugewerbe 1916, S. 439. — Das Schulhaus 1918, S. 58. — Handb. d. Arch., 4. Tl., 1. Halbbd., 3. Aufl., S. 343. Stuttgart, Arnold Bergsträsser, 1904. — Desgl., 4. Tl., 8. Halbbd., Heft 1, S. 518. Stuttgart, A. Kröner, 1906.

Zusammenstellungen über das bisherige Schrifttum finden sich u. a. in folgenden Werken: Zeitschr. f. Bauwesen 1860, S. 315. — Handb. d. Arch., 3. Tl., Bd. 6, 3. Aufl., S. 77. Stuttgart, Arnold Bergsträsser, 1904. — Weisbach, Bauakustik. Berlin, Julius Springer, 1913.

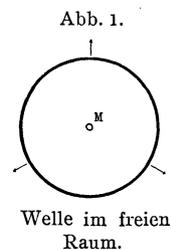
# Verlauf der Schallwellen.

## Rückwurf.

**Ebene Fläche.** Um den Schallverlauf in einem Raum festzustellen, stehen uns hauptsächlich zwei Wege zur Verfügung: Die geometrisch-zeichnerische Konstruktion und der vergleichende Versuch. Die erstere hat bereits Orth<sup>1)</sup> im Jahre 1872 benutzt, indem er für die Zionskirche in Berlin und die Nikolaikirche in Potsdam den Verlauf einzelner besonders bedeutsamer Schallstrahlen näher verfolgte. Er legte aber dabei keinen Wert darauf, zu ermitteln, welche Punkte dieser Bahnen in gewissen Zeitabschnitten gleichzeitig erreicht werden, wie die Gesamtheit derartiger Punkte sich zu einem Wellenbild vereinigt und wie diese Welle sich ausbreitet und durch Rückwürfe usw. verändert, bis sie sich allmählich verläuft. Und doch ist alles dies für die Beurteilung der Schallwirkungen von großer Bedeutung.

Wollen wir uns über die erwähnten Fragen Klarheit verschaffen, so müssen wir uns zunächst mit der Wellenbewegung als solcher befassen. Zu dieser gibt Marbach<sup>2)</sup> folgende Erklärung:

„Wenn das Gleichgewicht der Teilchen eines Körpers an einer Stelle gestört wird, so werden die aus ihrer Gleichgewichtslage gebrachten Teilchen das Bestreben haben, in diese Lage zurückzukehren. Solange nun die Teilchen sich der Gleichgewichtslage abwechselnd nähern und davon entfernen, so befindet sich der Körper in einer schwingenden Bewegung (Oszillation, Vibration). Schreitet die schwingende Bewegung von dem Orte der Gleichgewichtsstörung sukzessiv von Teilchen zu Teilchen fort, so wird die Schwingung eben eine fortschreitende und eine solche fortschreitende Schwingung nennt man eine Wellenbewegung.“



In einem Körper von durchweg gleichartiger Beschaffenheit verbreiten sich vom Erregungspunkt aus die Wellen nach allen Richtungen hin gleichmäßig. Die einzelne Welle besitzt also Kugelform. Der Halbmesser der Kugel entspricht der seit der Erregung verflossenen Zeit sowie der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle. Bei Luft von mittlerer Temperatur und Feuchtigkeit kann die Fortpflanzungsgeschwindigkeit zu rund 340 m in der Sekunde angenommen werden<sup>3)</sup>, so daß z. B. nach 5 Sekunden die Schallwelle im freien Raum die Gestalt einer Kugel von  $5 \cdot 340 = 1700$  m Halbmesser zeigt. Ein ebener Schnitt durch den Mittelpunkt einer solchen Kugelwelle ergibt einen größten Kugelkreis, der als bildliche Darstellung der räumlichen Kugelwelle benutzt werden kann (Abb. 1).

Im praktischen Fall wird sich die Kugelwelle aber nicht ungehindert nach allen Seiten hin ausbreiten können. Sehr bald stößt sie an irgend ein Hindernis, sei es auch nur gegen den Fußboden,

<sup>1)</sup> Zeitschr. f. Bauwesen 1872, S. 190.

<sup>2)</sup> Prof. Dr. Oswald Marbach u. Dr. C. S. Cornelius, Physikalisches Lexikon, Bd. 6, S. 873. Leipzig, Otto Wigand, 1859.

<sup>3)</sup> Müller-Pouillet, Lehrbuch der Physik und Meteorologie, 10. Aufl. (herausgegeben von Pfaundler), Bd. 1, 2. Abt., S. 571. Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1906.

und sie muß dann den Gesetzen der Reflexion, des Rückwurfs folgen. Diese kann man etwa wie folgt fassen<sup>1)</sup>:

1. Die von einer Ebene reflektierte Schallwelle hat eine solche Form und Lage, als ginge sie von einem Punkt aus, der auf dem Einfallslot ebenso weit hinter der reflektierenden Ebene liegt, als der Ausgangspunkt der direkten Welle vor derselben gelegen ist.

2. Die reflektierten Schallstrahlen liegen in derselben Ebene, in welcher die direkten Strahlen und das Einfallslot liegen.

3. Die Reflexionswinkel der Strahlen sind gleich den Einfallswinkeln.

Zeichnerisch läßt sich alles dies auf einer Ebene darstellen, die durch den Kugelmittelpunkt und das Einfallslot gelegt wird (Abb. 2). Nennt man, wie vorstehend geschehen, den Kugelhalbmesser einen „Schallstrahl“, so ist damit nichts Wirkliches gemeint, sondern in vereinfachender Vorstellung nur die Normale auf die Wellenfläche angedeutet<sup>2)</sup>. Trifft eine vom Erregungsmittelpunkt  $M$  ausgehende Kugelwelle auf eine gerade Wand, so wird jeder Kugelhalbmesser oder Schallstrahl unter gleichem Winkel zum Einfallslot zurückgeworfen. Nach einer gewissen Zeit wird also das Ende des Schallstrahles nicht im Punkte  $a$  des eigentlichen Wellenkreisbogens, sondern im Punkte  $b$  liegen, also genau so, als wenn er vom Punkte  $M'$  ausgegangen wäre, dessen Abstand  $M'A$  von der zurückwerfenden Fläche gleich dem Abstand  $MA$  des Erregungsmittelpunktes  $M$  ist. Genau dasselbe wiederholt sich für jeden anderen von  $M$  ausgehenden und zwischen den Punkten  $x$  und  $y$  anscheidenden Schallstrahl und es liegen infolgedessen die sämtlichen Punkte der zurückgeworfenen Welle auf einem um  $M'$  geschlagenen Kreisbogen mit dem Halbmesser  $M'b = Ma = Mc$ .

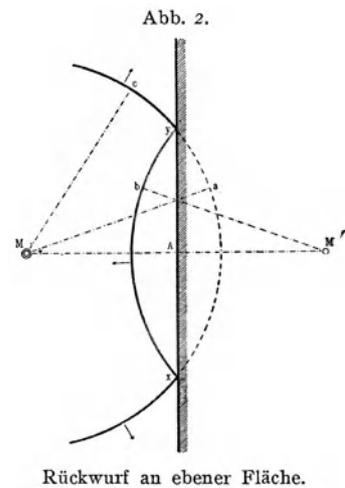
Die jetzt durch erstmaligen Rückwurf entstandene Welle  $xy$  sei als Rückwurfwelle erster Ordnung bezeichnet. Sie pflanzt sich in der eingetragenen Pfeilrichtung fort, also vom Punkt  $M'$  weg, während die ursprüngliche Welle ihren Lauf von  $M$  weg weiter verfolgt, so daß sich mit dem Fortschreiten beider Wellen die Anschnittpunkte  $x$  und  $y$  immer weiter voneinander entfernen. Toepler hat diese Erscheinungen bereits in den sechziger Jahren nach dem von ihm angegebenen Schlierenverfahren unmittelbar an Luftwellen beobachtet und in seinen Veröffentlichungen wiedergegeben<sup>3)</sup> (Abb. 3, Taf. I).

Die einmal eingeleitete Fortpflanzungsbewegung vollzieht sich so lange, bis die Wellen ihre Kraft verlieren und allmählich verlöschen, wovon weiter unten noch die Rede sein wird, oder bis sie erneut auf ein Hindernis stoßen und von diesem wieder zurückgeworfen werden. Ist z. B. die von  $M$  ausgegangene und vom Hindernis  $I$  wiederkehrende Welle bis  $b'$  vorgeschritten (Abb. 4), und hat sie dabei ein zweites Hindernis, etwa eine zu  $I$  parallele Wand  $II$  getroffen, so bildet sie nunmehr eine Rückwurfwelle zweiter Ordnung. Ein Wellenpunkt, der bei ungestörtem Verlauf im Punkt  $d$  der Rückwurfwelle erster Ordnung angelangt wäre, wird sich nach dem neuen Rückwurf in  $e$  befinden, oder verallgemeinert: Der aus der Rückwurfwelle erster Ordnung entstehende Rückwurf zweiter Ordnung ergibt sich als Kreisbogen aus einem Punkt  $M''$ , der links vom Hindernis  $II$  liegt, und zwar in einem Abstand  $M''B = M'B$ . Es ist also der Halbmesser  $M''e$  gleich dem Halbmesser  $M'd$ .

<sup>1)</sup> Müller-Pouillet, a. a. O., S. 582.

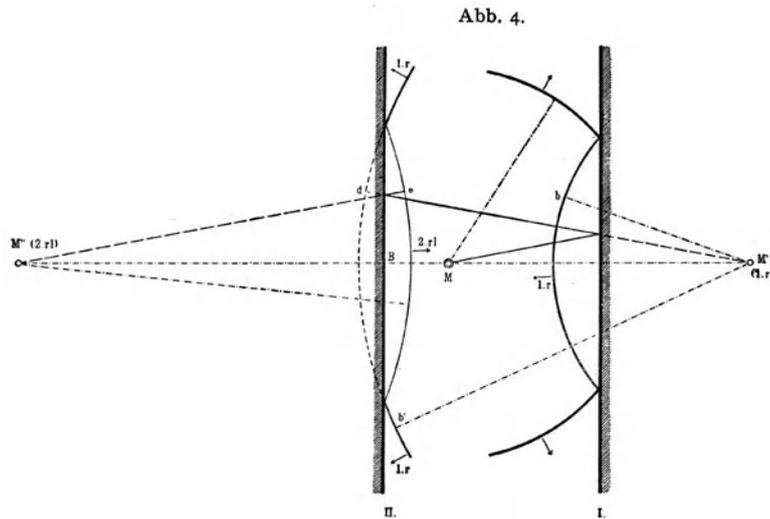
<sup>2)</sup> Handwörterbuch d. Naturwiss., Bd. 10, S. 598. Jena, Gustav Fischer, 1913. — O. D. Chwolson, Lehrb. d. Physik, Bd. 1, 1. Abt., 2. Aufl., S. 183, herausgeg. von G. Schmidt. Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1918.

<sup>3)</sup> Pogg. Ann., Bd. 131, S. 190 u. Taf. II, 1867.



Rückwurf an ebener Fläche.

Der Kürze halber sei in der Abbildung die durch das Hindernis *I*, also durch die rechts von *M* befindliche Wand zurückgeworfene Welle erster Ordnung mit der Beischrift *1.r* beim Richtungspfeil und beim zugehörigen Kreismittelpunkt bezeichnet. In gleicher Weise gelte hinsichtlich der vom Hindernis *II*, also links von *M* kommenden Rückwurfelle zweiter Ordnung die Beischrift *2.rl* und sinngemäß ähnlich seien die weiteren Rückwürfe benannt, wie sie sich in den nächstfolgenden Abbildungen finden. So besagt *4.lurl*, daß wir es mit einem Rückwurf vierter Ordnung zu tun haben, also mit einer Welle, welche viermal zurückgeworfen worden ist, nämlich zuerst von links, dann von unten, hierauf von rechts und endlich wieder von links.



Zweimaliger Rückwurf an ebenen Flächen.

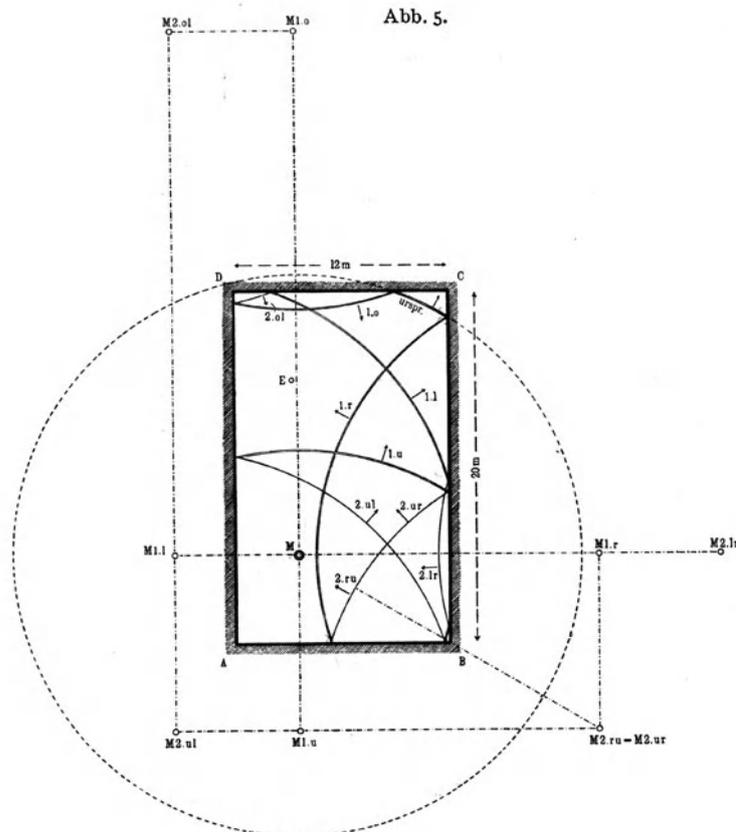
Wenn in diesen Darstellungen alle Wellen als Linien gezeichnet, also gewissermaßen die Wellenachsen für die Wellen gesetzt werden, so dürfen wir dies nur als eine Vereinfachung auffassen. In Wirklichkeit tritt die einzelne Welle als Ring oder Ringstück von größerer oder geringerer, aber immerhin nicht unbedeutlicher Breite auf, entsprechend einer Wellenlänge von 8,5 m bis 0,85 cm bei den musikalisch brauchbaren Tönen von 40 bis 4000 Schwingungen in der Sekunde. Der Kammer-ton *a* z. B. hat 435 ganze Schwingungen und demnach eine Wellenlänge oder Ringbreite von rund 77 cm<sup>1)</sup>. Die Wellenlängen, welche im gewöhnlichen Gesprächston vorkommen, belaufen sich bei einer Frauenstimme auf 0,6 bis 1,2 m, bei einer Männerstimme auf etwa 2,4 bis 5,0 m.

In einem geschlossenen Raume erreicht eine Schallwelle infolge ihrer großen Fortpflanzungsgeschwindigkeit sehr bald die Umgrenzungen und sie wird dann von diesen zurückgeworfen, so daß sie zunächst die Gestalt einer mehrfach eingebeulten Kugel annimmt, weiterhin aber sich immer mannigfaltiger verschlingt und durchdringt. Dieser Vorgang läßt sich etwa in nachstehender Weise verfolgen:

Im Punkt *M* eines rechtwinklig umgrenzten Saales von  $12 \times 20$  m Grundfläche (Abb. 5) befindet sich eine Schallquelle. Ein von ihr ausgehender Schall sei 16 m weit gelangt, entsprechend einem

<sup>1)</sup> John Tyndall, Der Schall, 3. Aufl., S. 81, bearb. von A. v. Helmholtz u. Cl. Wiedemann. Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1897. — H. v. Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen, 6. Ausg., S. 30. Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1913. — Winkelmann, Handb. d. Physik, Bd. 2, Akustik, 2. Aufl., S. 202. Leipzig, J. A. Barth, 1909. — Eng. Record, Bd. 67, S. 265, 1913. — O. D. Chwolson, Lehrb. d. Physik, Bd. 2, 1. Abt., S. 141; Die Lehre vom Schall, herausgeg. von G. Schmidt. Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1919.

Zeitverlauf von  $16:340 = 0,05$  Sekunde. Im freien Raume würde die Schallwelle eine Kugel von 16 m Halbmesser bilden, wie in der Zeichnung durch die gestrichelte Kreislinie angedeutet ist. Im Saal kann sie sich aber nicht ungehindert ausbreiten, vielmehr wird sie im Zeitraum von 0,05 Sekunde bereits mehrfach zurückgeworfen. Von der ursprünglichen Schallwelle bleibt nur noch ein kleines Stückchen in der dem Erregungsmittelpunkt  $M$  diagonal gegenüberliegenden Ecke übrig, während sich an den vier Wänden Rückwürfe erster Ordnung, nämlich  $1.r$ ,  $1.o$ ,  $1.l$  und  $1.u$  als Bögen von ebenfalls 16 m Halbmesser bilden.



Rückwurf in Rechteckumgrenzung. Schallhalbmesser 16 m.

Der Mittelpunkt für den Wellenbogen  $1.r$  liegt im Punkt  $M1.r$ , der senkrecht gegenüber dem Punkt  $M$ , und zwar rechts von der zurückwerfenden Wand  $BC$  liegt, im gleichen Abstand von dieser wie Punkt  $M$ . Ebenso ergeben sich  $M1.o$ ,  $M1.l$  und  $M1.u$  als Mittelpunkte für die entsprechenden Rückwurfwellen.

Der Rückwurf  $1.r$  hat aber zum Teil die Schmalwand  $AB$  getroffen und dadurch ist ein Rückwurf zweiter Ordnung, mit  $2.ru$  bezeichnet, entstanden. Der Mittelpunkt dafür liegt im Punkt  $M2.ru$ , der von der Langwand  $BC$  gleichen Abstand wie  $M1.r$  und von der Schmalwand  $AB$  gleichen Abstand wie  $M1.u$  hat. Der Punkt  $M2.ru$  ist aber zugleich Mittelpunkt für einen Rückwurf zweiter Ordnung  $2.ur$ , der sich dadurch ergibt, daß der Rückwurf  $1.u$  zum Teil auf die Langwand  $BC$  trifft und von dieser zurückgeworfen wird. Da die Bögen  $2.ru$  und  $2.ur$  mit demselben Halbmesser aus demselben Mittelpunkt geschlagen sind, gehen sie ohne ersichtliche Trennung tangential

ineinander über, und zwar dort, wo der von  $M$   $2.ru$  nach der Saalecke  $B$  gezogene Halbmesser die Bogenlinie trifft. Der Einfachheit halber sei bei derartigen Rückwürfen für den ganzen Bogen nur eine der beiden Bezeichnungen benutzt.

Weitere Rückwürfe zweiter Ordnung ergeben sich als Bogenlinien  $2.ul$ ,  $2.lr$  und  $2.ol$  mit den entsprechenden gleichbezeichneten Mittelpunkten, deren Lage sich nach dem Gesagten ohne weiteres erklärt.

Zu beachten ist, daß sich an jede Rückwurfelle dort, wo sie an der Raumbegrenzung endigt, ein neues Wellenstück anschließt, und daß somit alle Wellenstücke einen fortlaufenden Linienzug bilden. Wir erkennen daher einen Fehler in der Aufzeichnung sofort daran, daß sich der Linienzug nicht schließt. Tatsächlich müssen ja auch bei einer geradlinigen Raumbegrenzung, wie sie in Abb. 5 angenommen ist, alle Bogenstücke Teile eines einheitlichen Vollkreises sein. Wir können dies veranschaulichen, indem wir auf durchscheinendem Papier den Rechteckgrundriß  $ABCD$  mit dem Erregungsmittelpunkt  $M$  aufzeichnen. Dann schlagen wir um  $M$  einen Kreis, im vorliegenden Beispiel mit dem Halbmesser von 16 m. Wird die Kreisfläche ausgeschnitten, das Papier an den Rechteckseiten umgekniffen und dann gegen das Licht gehalten, so zeigen die sich überschneidenden Kreisanten des Papiers dieselben Linien, wie sie in der Abb. 5 ermittelt worden sind.

Das in der letzteren dargestellte Gesamtbild der Wellenlinien läßt uns erkennen, daß die Rückwürfe erster Ordnung sehr rasch auf die ursprüngliche Welle folgen, also diese kräftigen helfen. Wir sehen auch, daß die Rückwürfe  $1.r$ ,  $1.o$  und  $1.u$ , wenn sie nur um eine Kleinigkeit, etwa 4 m, weiter fortschreiten, sich etwa im Punkte  $E$  treffen und damit gegenseitig verstärken, und daß sie zugleich den dicht vorauseilenden unmittelbaren Schall unterstützen. Es läßt dies allgemein auf akustisch günstige Verhältnisse für den rückwärtigen Raumteil schließen, indem hier, wie schon Sturmhoefel<sup>1)</sup> betont hat, die Stärkeeinbuße, welche der unmittelbare Schall infolge der zurückgelegten Weglänge bereits erfahren hat, durch die zutretenden Rückwürfe größtenteils wieder eingebracht wird. Die Rechteckform kann demnach als vorteilhaft gelten.

Die Erfahrung bestätigt dies, indem z. B. der durch seine gute Hörsamkeit bekannte Saal der Singakademie in Berlin<sup>2)</sup> einen langgestreckten Rechteckgrundriß von 12,65 m Breite und 34 m Länge aufweist. Die jetzige halbrunde Chornische wurde erst bei dem letzten, vergrößerten Umbau eingefügt, an den man übrigens nur mit großen Bedenken heranging, weil man die bisher schon gute Hörsamkeit zu verderben fürchtete. Gerühmt werden auch die Steinert Hall in Boston, welche ungefähr 60 Proz. länger als breit ist, und der etwa 70 Fuß breite und 120 Fuß lange Tremont Temple ebenda<sup>3)</sup>, die Festhalle in Karlsruhe<sup>4)</sup>, sowie der Gürzenich-Saal in Köln und der große Festsaal des neuen Wiener Rathauses<sup>5)</sup>. Bei dem letzteren spielt mit, daß infolge seiner großen Länge von 70 m und bei der beschränkten Reichweite der menschlichen Stimme ein tatsächlich störender Widerhall von der Gegenseite her kaum hervorgerufen wird, wenn ein Redner an einer Schmalseite spricht. Der Schall verliert sich vielmehr größtenteils auf der Länge des Saales.

Was für das Wellenbild des Rechteckgrundrisses gilt, trifft ebenso auch für den rechteckigen Längs- oder Querschnitt irgend eines Raumes zu. Denn wenn die von jeder Schallnachwirkung freie vorzügliche Hörsamkeit in der Lukaskirche in Frankfurt a. M. der gewählten wagerechten Holzdecke

1) A. Sturmhoefel, Zentralbau oder Langhaus? S. 36. Berlin, W. Ernst & Sohn, 1897.

2) Blätter für Architektur und Kunsthandwerk 1888, S. 131. — Berlin und seine Bauten, Bd. 2, S. 516, 1896. — Zeitschr. f. Bauwes. 1871, S. 248.

3) Eng. Record, Bd. 45, S. 541, 1902.

4) Handb. d. Arch., 4. Tl., 1. Halbbd., 3. Aufl., S. 357. Stuttgart, Arnold Bergsträsser, 1904.

5) Zeitschr. d. Österr. Ing.- u. Arch.-Vereins 1905, S. 141. — F. Schmidt, Das neue Wiener Rathaus, Innenansicht auf Bl. 46. Wien, F. Baumbach & M. Grebner, 1884.

zugeschrieben wird<sup>1)</sup>, so ist damit gewiß nicht nur der später zu erörternde Einfluß des Baustoffs gemeint, sondern vor allem die Rechteckgestalt des Längsschnittes. Auch die gute Klangwirkung im Gewandhaussaal in Leipzig<sup>2)</sup> wird ganz erheblich durch den Rechteckumriß und das wohl abgewogene Verhältnis von Höhe zu Länge bedingt, entsprechend der allgemeinen Beobachtung, daß ein niedriger Saal eine bessere Hörsamkeit zeigt als ein hoher. Beim Parlamentssaal in London und beim Abgeordnetenhaus in Berlin hat der gleiche Gesichtspunkt zum Tieferlegen der ursprünglichen Decke geführt<sup>3)</sup>. Für die Praxis können wir daraus den wertvollen Hinweis entnehmen, daß beim Entwurf von Sprech- und Musiksälen, vor allem aber von Predigträumen, eine möglichst geringe Höhe gewählt werden muß. Man denke nur an die einfache Dorfkirche, welche vielfach eine durch nichts zu begründende „monumentale“ Höhe erhält, während eine geringere Abmessung viel zweckentsprechender wäre und außerdem das Raumbild anheimelnder erscheinen ließe.

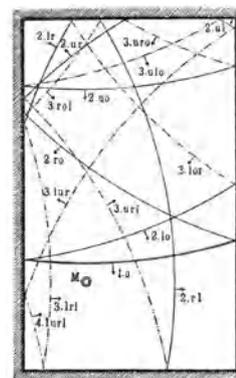
Wählen wir gegenüber der Abb. 5 einen etwas späteren Zeitpunkt, nämlich den Augenblick, wo der zuletzt auftretende Rückwurf 1.0 bis dicht an den Erregungsmittelpunkt *M* gelangt ist (Abb. 6), so entspricht dies einer Weglänge, also einem Schallhalbmesser von rund 29 m. Diese Strecke wird vom Schall in einem Zeitraum von  $29:340 =$  rund 0,09 Sekunde zurückgelegt. Hierbei werden außer 1.0 alle Rückwürfe erster Ordnung durch solche dritter und vierter Ordnung ersetzt, deren Entstehung sich aus den beigefügten Bezeichnungen und den Erklärungen zu Abb. 5 ohne weiteres ergibt. Alle diese Wellen sind aber durch ihr mehrfaches Abprallen schon verhältnismäßig stark geschwächt, so daß nur noch von 1.0 eine wirkliche Störung zu gewärtigen bleibt. Man wird also gut tun, die der Schallquelle gegenüberliegende entfernteste Saalwand so zu konstruieren und auszubilden, daß sie jeden auftreffenden Schall möglichst dämpft. In dieser Weise ist z. B. die Rückwand des Gewandhaussaales in Leipzig behandelt<sup>4)</sup>.

Bei der Nachprüfung von Zeichnungsergebnissen der hier in Rede stehenden Art wird man stets darauf zu achten haben, ob nicht etwa kräftige Rückwürfe, also vor allem solche erster Ordnung auftreten, die mehr als 10 m Umweglänge gegenüber dem ursprünglichen Schall besitzen. Denn von ihnen gehen Nachhallerscheinungen aus und sie müssen daher nach der Forderung von Unger grundsätzlich vermieden oder zerstreut werden<sup>5)</sup>. Sturmhoefel zieht seine Grenze etwas weiter und gibt als äußerstes zulässiges Maß ein Nachschleppen um  $\frac{1}{20}$  Sekunde entsprechend einer Umweglänge bis zu 17 m an<sup>6)</sup>. In Übereinstimmung damit stehen die Sätze, welche Lyon aus der Untersuchung des Trocadéro in Paris gewonnen hat, und die sich etwa wie folgt zusammenfassen lassen<sup>7)</sup>:

a) Bei einem Wegunterschied bis zu 8,50 m, also bei einer Verzögerung des Rückwurfes um höchstens  $\frac{1}{40}$  Sekunde, vernimmt man einen warmen und ungeschädigten Zusammenklang, wobei der Nachhall eine brauchbare, ja notwendige Verstärkung darstellt und bei Musikklängen die sich folgenden Töne weich abzurunden und zu vermitteln hat.

b) Umwege von 8,50 bis 11,33 m ergeben eine Verzögerung bis zu  $\frac{1}{30}$  Sekunde und damit eine immer noch nützliche Verstärkung.

Abb. 6.



Rückwurf  
in Rechteckumgrenzung.  
Schallhalbmesser 29 m.

<sup>1)</sup> Deutsche Bauztg. 1915, S. 331.

<sup>2)</sup> Handb. d. Arch., 4. Tl., 1. Halbbd., 3. Aufl., S. 349. Stuttgart, Arnold Bergsträsser, 1904.

<sup>3)</sup> Zentralbl. d. Bauverw. 1900, S. 471. — Zeitschr. d. Österr. Ing.- u. Arch.-Vereins 1905, S. 142.

<sup>4)</sup> Zeitschr. f. Bauwesen 1886, S. 1.

<sup>5)</sup> Deutsche Bauztg. 1909, S. 98.

<sup>6)</sup> A. Sturmhoefel, Akustik des Baumeisters, S. 43. Berlin, Schuster & Bufe, 1894.

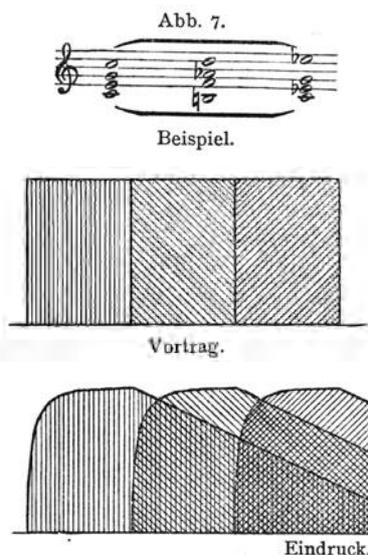
<sup>7)</sup> Zentralbl. d. Bauverw. 1909, S. 302. — La Nature 1909, S. 326.

c) Umwege von 11,33 bis 17 m ergeben eine Verzögerung bis zu  $\frac{1}{20}$  Sekunde. Die Verstärkung wird merklich verschleppt, aber die Endwirkung ist allenfalls noch erträglich.

d) Umwege von 17 bis 23 m ergeben eine Verzögerung bis zu  $\frac{1}{15}$  Sekunde. Infolge davon macht sich lästiger Nachhall geltend, der sich bis zum Echo steigert.

e) Umwege von 23 bis 34 m ergeben eine Verzögerung bis zu  $\frac{1}{10}$  Sekunde und damit unerträgliche Echoerscheinungen.

Die zu a) und b) erwähnten Tonüberdeckungen führen zu ganz eigenartigen Erscheinungen, wie neuerdings Biehle<sup>1)</sup> sehr anregend dargelegt hat. Er stellt den Noten und ihrem Vortrag den beim Hörer hervorgerufenen Eindruck gegenüber und zeigt z. B. gemäß Abb. 7 Art und Verlauf der aus dicht hintereinander folgenden Tönen sich ergebenden Gesamtklänge. Diese machen sich überall



dort bemerkbar, wo dämpfende Einflüsse fehlen und sich daher, wie im Baptisterium zu Pisa<sup>2)</sup>, die Rückwürfe ungehemmt zu entwickeln vermögen. Allgemein erzeugen Tonüberdeckungen bei solchen musikalischen Darbietungen, deren Töne und Widerhülle Obertöne desselben Grundtones sind, etwa bei einer Mozartschen Arie nur harmonische Klangwirkungen, während die andersartige Wagnersche Musik Dissonanzen ergeben kann, wie von Aufführungen im Münchener Hoftheater berichtet wird<sup>3)</sup>.

Trägt man das Bild der Schallwellen zeichnerisch auf, wie es in den Abb. 5 u. 6 geschehen ist, so kann man sehr einfach durch Abgreifen von ein paar Maßen die zeitliche Aufeinander-

folge der einzelnen Rückwürfe feststellen und danach ihre voraussichtliche Nützlichkeit oder Schädlichkeit beurteilen. Eine erhebliche Rolle spielt dabei die tatsächliche Raumgröße. Denn lassen wir im obigen Beispiel des Rechtecksaales die bis-

herigen Abmessungen von  $12 \times 20$  m gelten, so kommt der Rückwurf *1. u* etwa 8 bis 10 m hinter der ersten, ursprünglichen Welle, ergibt also noch keine Störung. Legen wir aber einen halb so großen Maßstab zugrunde, so daß die Zeichnung einen Saal von  $24 \times 40$  m darstellt, so wird auch der Wegunterschied der Schallwellen doppelt so groß, beträgt also bei *1. u* etwa 16 bis 20 m und es muß jetzt natürlich mit störendem Nachhall gerechnet werden. Mit voller Absicht sind daher beim Sitzungssaal des englischen Unterhauses nur die sehr knappen Abmessungen von  $13,7 \times 20,7$  m gewählt worden, indem man sich sagte, daß die Gesamtheit der Mitglieder doch kaum einmal vollzählig zusammentreten würde<sup>4)</sup>. Und als beim Sitzungssaal des Abgeordnetenhauses in Berlin sich eine unzureichende Hörsamkeit ergeben hatte, wurde, abgesehen von der schon erwähnten Tieferlegung der Decke, der Raum noch durch Einbauten, Säulen mit Bogenstellungen auf den Tribünenwänden, verkleinert. In dem sonach verständlichen Wunsch, bei intimerer Musik den Ton zusammenzuhalten und nachschleppenden Hall zu vermeiden, hat man den meisten großen Festsälen noch besondere Kammerräume beigeordnet, deren Größe<sup>5)</sup> im

<sup>1)</sup> Zeitschr. f. Musikwissensch. 1919, S. 129.

<sup>2)</sup> Zeitschr. f. Arch. u. Ingenieurwesen, Heftausg. 1896, S. 19. — Handb. d. Arch., 4. Tl., 8. Halbbd., 1. Heft, S. 520. Stuttgart, A. Kröner, 1906.

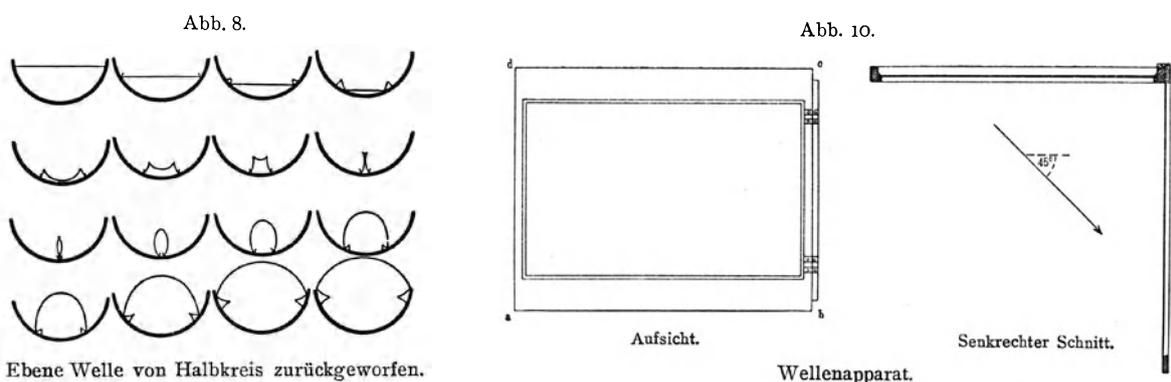
<sup>3)</sup> Allg. Bauztg. 1890, S. 54.

<sup>4)</sup> Zentralbl. d. Bauverw. 1900, S. 471.

<sup>5)</sup> Handb. d. Arch., 4. Tl., 1. Halbbd., 3. Aufl., S. 345. Stuttgart, Arnold Bergsträsser, 1904.

allgemeinen nicht über 25 m Länge, 15 m Breite und 10 m Höhe geht. Mit dem Gesagten befindet sich der bereits von den Gebrüdern Weber aufgestellte Satz im Einklang, daß der Nachhall in Kirchen eine besondere Wirkung nicht der Gestalt der Kirche und ihrer Gewölbe, sondern ihrer Größe sei<sup>1)</sup>. Nur muß man, um ihn in dieser allgemeinen Fassung gelten zu lassen, ausschließlich solche Räume miteinander vergleichen, welche in den Baustoffen und Ausstattungen völlig übereinstimmen. Denn daß bei unsachgemäßer Bauweise schon verhältnismäßig kleine Räume eine unbefriedigende Hörsamkeit ergeben können, zeigte bei seiner Fertigstellung der nur 9 m Durchmesser aufweisende und vollständig massiv ausgeführte runde Konfirmandensaal der Petrikerche in Leipzig<sup>2)</sup>.

Der Verlauf der Rückwürfe wird besonders anschaulich, wenn man nach dem Vorbild von Wood<sup>3)</sup> eine Welle für eine Anzahl von kurz aufeinander folgenden Zeiträumen aufträgt (Abb. 8) und nach diesen Zeichnungen einen kinematographischen Film herstellt. Die Richtigkeit dieser Bilder hat Wood noch durch photographische Aufnahmen von Schallwellen bestätigt, wobei er von dem



oben erwähnten Toeplerschen Schlierenverfahren ausging<sup>4)</sup>. An Wood schließen sich weiterhin die Arbeiten von A. L. Foley und W. H. Souder, nach denen die Photographie einer Kreiswelle mit ihrem Rückwurf an einer ebenen Platte hier gezeigt sei (Abb. 9, Taf. I)<sup>5)</sup>.

Um das Bild einer Welle auf irgend einer durch den Erregungsmittelpunkt gelegten Schnittebene zu erhalten, hat der Verf. dieses eine Wasserfläche benutzt, in der Voraussetzung, daß wenigstens bei den diesem Versuch zugrunde liegenden geringen Abmessungen die Art der Ausbreitung und des Rückwurfs einer Welle auf dem Wasser im großen und ganzen derjenigen einer Luftwelle entspreche. Dadurch, daß bei ersterer die Fortpflanzungsgeschwindigkeit erheblich geringer ist und nur etwa 20 cm in der Sekunde beträgt, erleichtert sich die Beobachtung in hohem Maße.

Zur Herstellung der Wasserfläche dient ein im Lichten 53 cm breites, 79 cm langes und 2,5 cm hohes Becken  $abcd$  (Abb. 10), das mit einem Spiegelglasboden versehen und etwa 0,7 bis 0,8 cm hoch mit reinem Wasser gefüllt ist. Diese Füllhöhe hat sich als die günstigste erwiesen, weil bei geringerer Höhe die Wellenbewegung gehemmt wird und bei größerer Höhe räumliche, d. h. auch in die Tiefe gehende Wirbelungen entstehen, die das Bild der wagerechten Wellenausbreitung stören. Das Becken ruht mit den Langseiten  $ab$  und  $cd$  auf zwei etwa 1,15 m hohen Böcken, die den Raum unter dem Becken völlig frei lassen. Stellschrauben gestatten das Becken,

<sup>1)</sup> E. H. Weber u. W. Weber, Wellenlehre auf Experimente gegründet, S. 543. Leipzig, Gerhard Fleischer, 1825.

<sup>2)</sup> Hertel u. Seibertz, Moderne Kirchenbauten, Lief. 1, Taf. 96 bis 104. Berlin, Ernst Wasmuth, 1900.

<sup>3)</sup> Philos. Magazine, 5. Serie, Bd. 50, S. 155, 1900.

<sup>4)</sup> Ebenda, Bd. 48, S. 218, 1899. — Proc. of the Royal Soc. of London, Bd. 66, S. 283.

<sup>5)</sup> Scientif. American, Bd. 108, S. 152, 15. Febr. 1913. — Ebenda, Suppl., Bd. 75, S. 108, Febr. 1913.

d. h. den Glasboden mit Hilfe einer Libelle genau wagerecht, also parallel zur Wasserfläche einzustellen (Abb. 11, Taf. I). Durch eingelegte Holzrahmen kann der zu beobachtenden Wasserfläche jede beliebige Umrißgestalt gegeben werden. An der Seite *bc* des Beckens hängt lotrecht ein mit weißem, dünnem Papier bespannter Holzrahmen *ef*.

Wird die Wasserfläche schräg von oben in der Richtung auf den Bildschirm hin beleuchtet, und auf ihr ein Wellensystem erregt, so zeichnen sich die Wellenlinien auf dem hellen Schirm deutlich ab, da die Wellentäler und -berge als Konkav- und Konvexspiegel wirken und daher das Licht verschiedenartig zurückwerfen und brechen. Fällt das Licht in Richtung der senkrechten Mittelebene des Apparates und mit parallelen Strahlen unter  $45^\circ$  zur Wagerechten ein, so zeigt der Schirm das genaue, unverzerrte Bild der auf der Wasserfläche erzeugten Wellen. Diese lassen sich daher bequem studieren und photographieren. Da hierbei nur Momentaufnahmen, sei es einzeln, sei es in kinematographischen Reihen in Betracht kommen, muß die Beleuchtung sehr hell sein. Elektrisches Bogenlicht würde dieser Bedingung entsprechen, ist aber wegen der divergierenden, also das Bild verzerrenden Richtung seiner Strahlen nicht geeignet. Vielleicht kämen Scheinwerfer in Betracht. Da solche aber nicht zur Verfügung standen, wurde das unmittelbare Sonnenlicht benutzt, wengleich damit die Versuche von der Witterung und, wegen der erforderlichen  $45^\circ$ -Neigung, von bestimmten Tages- und Jahreszeiten abhängig wurden. Auch war es erschwerend, daß mangels genügend großer Heliostatenspiegel innerhalb jedes einzelnen Versuches mit dem raschen Sonnenlauf gerechnet werden mußte. Andererseits würde gespiegeltes Licht bei der großen Bildschirmfläche des Apparates nicht so rein und schlierenfrei wie unmittelbares Sonnenlicht sein.

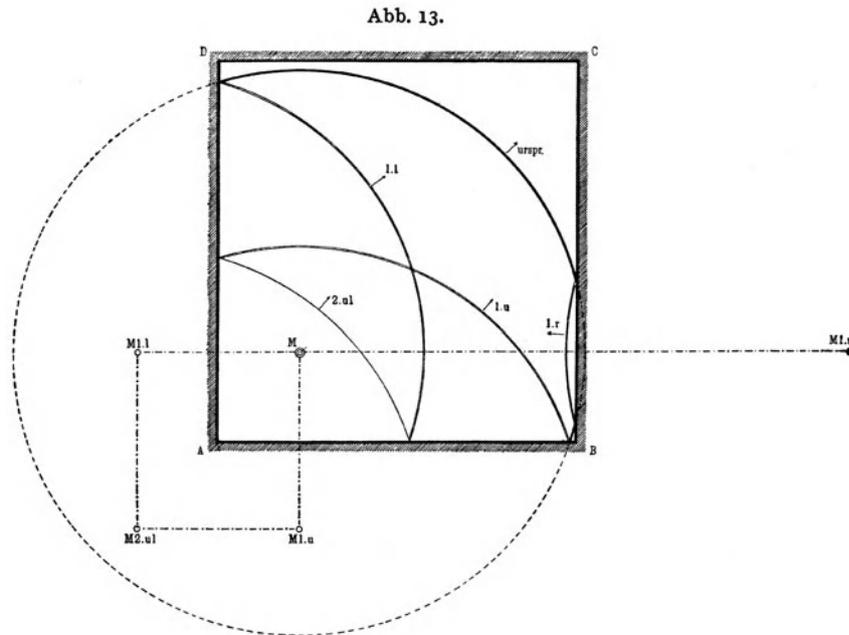
Besonders wichtig ist es, eine klare, kräftige Welle zu erzeugen. Der hierbei zu verwendende Erreger muß so eingerichtet sein, daß er nach dem Entstehen der Welle nicht mehr mit der Wasserfläche in Berührung bleibt, da er sonst neue, das Bild störende Rückwürfe veranlaßt. Ferner muß er wegen der photographischen Aufnahmen sogleich nach der Wellenerzeugung aus dem Bildkreis verschwinden. Als das zweckmäßigste erwies sich ein zweiarmiger gerader Hebel, der an dem einen Ende eine kalottenförmig gewölbte Scheibe, am anderen ein verstellbares Gewicht trug. Der Hebel wird so eingestellt, daß die Kalotte den Wasserspiegel gerade noch berührt, während der andere Arm an dem eisernen Stellgewicht elektromagnetisch festgehalten wird. Mittels eines Fußkontaktes beim Beobachter kann der Apparat ausgelöst werden. Damit dies sofort nach Unterbrechung des Stromes geschieht, muß das Stellgewicht mit Rücksicht auf remanenten Magnetismus mit Papier umwickelt werden. Sowie der Hebel freigelassen ist, drückt der belastete Arm den Scheibenarm hoch, die Scheibe löst sich von der Wasserfläche und erzeugt damit die gewünschte Welle. Ein Nachtropfen beim Hochgehen wird durch Umhüllen der Scheibe mit Löschpapier vermieden.

Ist der Hebel in nahezu senkrechte Stellung gelangt, so wird er an dem jetzt unten befindlichen, beschwerten Arm möglichst erschütterungsfrei durch eine Reihe von hintereinander geschalteten Kartonblättern abgefangen, so daß die Scheibe nicht mehr in den Bildbereich zurückschlagen kann.

Die erzeugte Welle ist zwar nicht völlig rein, insbesondere treten im Anfang ihrer Entwicklung mannigfaltige Wirbelungen usw. auf, aber im großen und ganzen gestattet sie doch die Vorgänge mit ausreichender Genauigkeit zu verfolgen. Daß der sich ausbreitenden Welle kleinere parallele Stauwellen voraneilen, hat den besonderen Vorzug, daß man daraus im photographischen Bild ohne weiteres die Ausbreitungsrichtung der Welle ansehen kann. Noch schärfer könnten die Wellen vielleicht mit einem Apparat, der die Hilfe eines Stereokomparators in Anspruch nähme, aufgenommen werden, wie solches bereits bei wasserbautechnischen Strömungsversuchen geschehen ist<sup>1)</sup>. Dieser Weg ist aber hier nicht weiter verfolgt worden.

<sup>1)</sup> Zentralbl. d. Bauverw. 1919, S. 397.

Um den Wellenverlauf bei rechteckiger Umgrenzung zu untersuchen, wurde in das beschriebene Becken ein Holzrahmen von 40 cm Breite und 43 cm Länge eingelegt und damit die beifolgende Filmwiedergabe gewonnen (Abb. 12, Taf. II). Die Übereinstimmung derselben mit dem Ergebnis zeichnerischer Auftragung geht aus einem für das gleiche Flächenverhältnis von 40:43 und mit dem Schallhalbmesser der Abb. 5 aufgetragenen Wellenbild (Abb. 13) hervor. Seine Hauptlinien finden wir in dem Film, insbesondere im Bild Nr. 8 desselben wieder. Außerdem aber beobachten wir auf Abb. 12 noch ein schwächer ausgeprägtes Nebensystem, welches daher rührt, daß nach Erzeugung der ersten Welle der Wasserspiegel nicht sofort zur Ruhe kommt, sondern in pendelnder Schwingung eine zweite



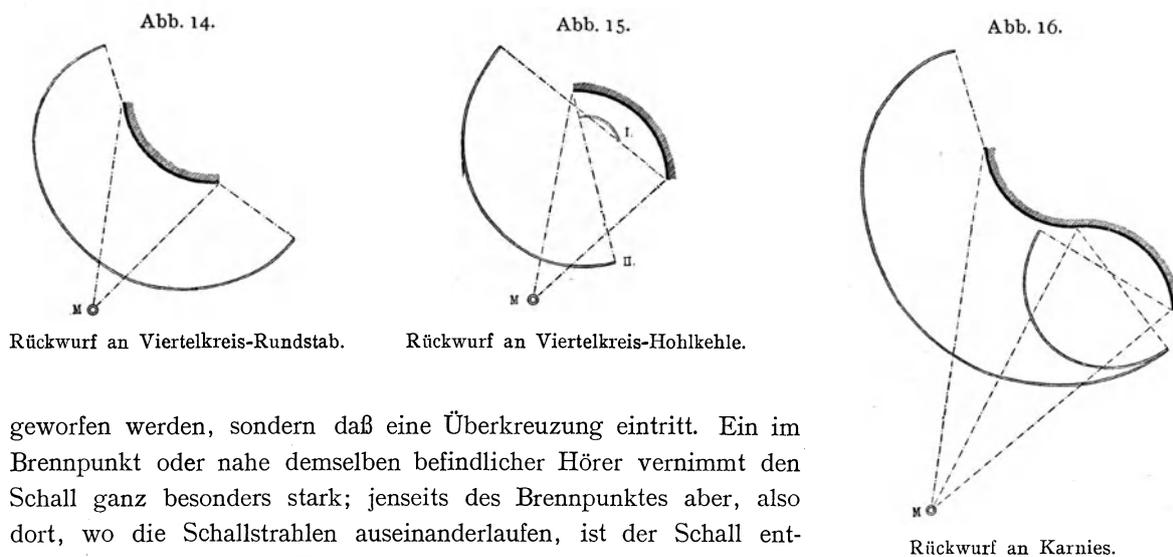
Rückwurf in Rechteckumgrenzung. Flächenverhältnis 40:43 wie Abb. 12. Schallhalbmesser 16 m.

Welle entstehen läßt, der vermutlich noch eine dritte, vierte usw. folgen; nur sind die letzteren schon so geschwächt, daß sie sich neben den kräftigeren Linien der beiden ersten Systeme nicht mehr auszusprechen vermögen.

Die Abb. 12 zeigt schließlich noch, daß der Rückwurf zweiter Ordnung *2.ul* im Vergleich zu denen erster Ordnung nur stark gedämpft auftritt. Andererseits entwickeln sich verstärkende Interferenzen, indem verschiedene Wellen in den dem Erregungsmittelpunkt gegenüberliegenden Raumecken zusammentreffen, wie besonders deutlich aus der Filmaufnahme Nr. 14 dieser Abbildung hervorgeht. Da derartige Interferenzen, von deren Wesen noch später die Rede sein wird, dicht auf den unmittelbaren Schall wie auch auf die Rückwürfe erster Ordnung folgen, also unterstützend wirken, kann man, wie schon aus den Zeichnungen entnommen wurde, gerade in den entfernteren Teilen eines rechteckig umschlossenen Raumes mit günstigen Hörverhältnissen rechnen. Außerdem sehen wir, daß der Rückwurf *1.o*, welcher sich bereits auf Abb. 6 stark aussprach, auch auf dem Bildstreifen lange durchhält und damit auf Widerhall von der dem Erregungspunkt gegenüberliegenden Wand schließen läßt. Also auch hierin bestätigen sich die weiter oben an Hand der Wellenbilder gezogenen Schlüsse.

**Gekrümmte Fläche.** Wenn die schallempfangende Fläche nicht eben, sondern gekrümmt ist, liegen die Verhältnisse etwas weniger einfach. Zwar wird auch in diesem Fall jeder Strahl unter gleichem Winkel zum Einfallslot zurückgeworfen, aber die gespiegelte Welle kann nicht mehr als einfacher Kreisbogen aufgezeichnet werden, sondern man muß zahlreiche Rückwürfe einzelner Schallstrahlen auftragen und durch eine Kurve miteinander verbinden.

Bei einem Viertelkreis-Rundstab (Abb. 14) werden dementsprechend die vom Erregungsmittelpunkt  $M$  kommenden Strahlen stark auseinandergeworfen, so daß auf eine erheblich schallzerstreuende Wirkung gerechnet werden kann. Bei der Hohlkehle dagegen (Abb. 15) laufen die zurückgeworfenen Strahlen zunächst zusammen, wie im Rückwurf *I* dargestellt ist. Erst nach Überschreiten eines Brennpunktes gehen sie wieder auseinander, so daß dann ebenfalls eine schallzerstreuende Wirkung gemäß Rückwurf *II* der Abbildung eintritt. Der Unterschied gegenüber dem Rundstab ist nur der, daß nicht die links auftreffenden Strahlen weiter nach links, die rechts auftreffenden nach rechts



geworfen werden, sondern daß eine Überkreuzung eintritt. Ein im Brennpunkt oder nahe demselben befindlicher Hörer vernimmt den Schall ganz besonders stark; jenseits des Brennpunktes aber, also dort, wo die Schallstrahlen auseinanderlaufen, ist der Schall entsprechend geschwächt. Dabei kommt es sehr auf die Größe des Krümmungshalbmessers im Verhältnis zum Saal an, besonders wenn es sich um Deckenhohlkehlen handelt<sup>1)</sup>, welche unter Umständen den Schall auf bestimmte Stellen des Zuhörerraumes vereinigen. Eine gekrümmte Rückwurffläche läßt also stets Ungleichmäßigkeiten in der Hörsamkeit des betreffenden Raumes befürchten.

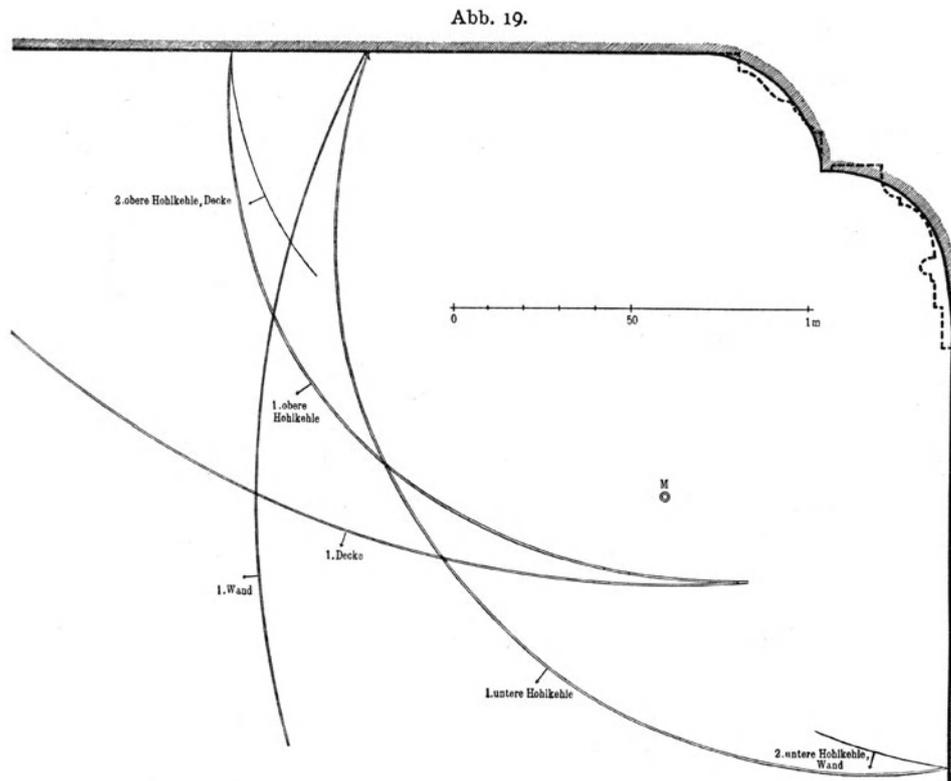
Werden Rundstab und Hohlkehle zu einem Karnies vereinigt, so ergeben sich aus beiden Teilformen wieder entsprechende Rückwürfe; diese gehen aber im Wendepunkt der Kurve mit tangentialer Kehre ineinander über (Abb. 16).

Bei reicheren Formenzusammenstellungen, z. B. Gesimsen, läßt die geometrische Konstruktion aus den Teigliedern eine Fülle von Rückwürfen erwachsen (Abb. 17 u. 18), die so dicht beieinander liegen und so gleichartiges Fortpflanzungsbestreben zeigen, daß sie sich gegenseitig unterstützen. Um stark auseinanderlaufende Schallstrahlen und damit ein möglichst bezeichnendes Bild zu erhalten, ist bei den vorliegenden Darstellungen die Schallquelle ganz nahe am Gesims angenommen. Im praktisch vorkommenden Fall wird aber der Abstand meistens so groß sein, daß mit parallelem Verlauf der Schallstrahlen gerechnet werden kann. Die vielerlei Rückwurfwellen des Gesimses haben zusammen-

<sup>1)</sup> Zeitschr. d. Österr. Ing.- u. Arch.-Vereins 1905, S. 145.



genommen ungefähr dieselbe Wirkung wie eine der Hauptform des Gesimses folgende vereinfachte Profilierung (Abb. 19). Dies ergibt sich auch aus der Filmaufnahme (Abb. 20, Taf. III) mit einer in den rechteckigen Beckenrahmen, im Bild links oben eingefügten Gesimsschablone, indem zuerst ein Gewirr von kleinen Rückwürfen auftritt (Filmbild 5), dieses sich aber bald klärt und zu einer einzigen großen Rückwurfwelle vereinigt. Auf dem Filmbild 14 ist dieselbe ungefähr in der Diagonale von links unten nach rechts oben zu sehen. Die übrigen, von den Beckenumrandungen herrührenden Rückwürfe haben für uns hier keine weitere Bedeutung. Ein Gegenstück zu den vorigen Erscheinungen finden wir darin, daß selbst an unregelmäßig gestalteten Felswänden, an Waldrändern und Wolken



Rückwurf an vereinfachtem Gesimsprofil. Schallhalbmesser 2,75 m.

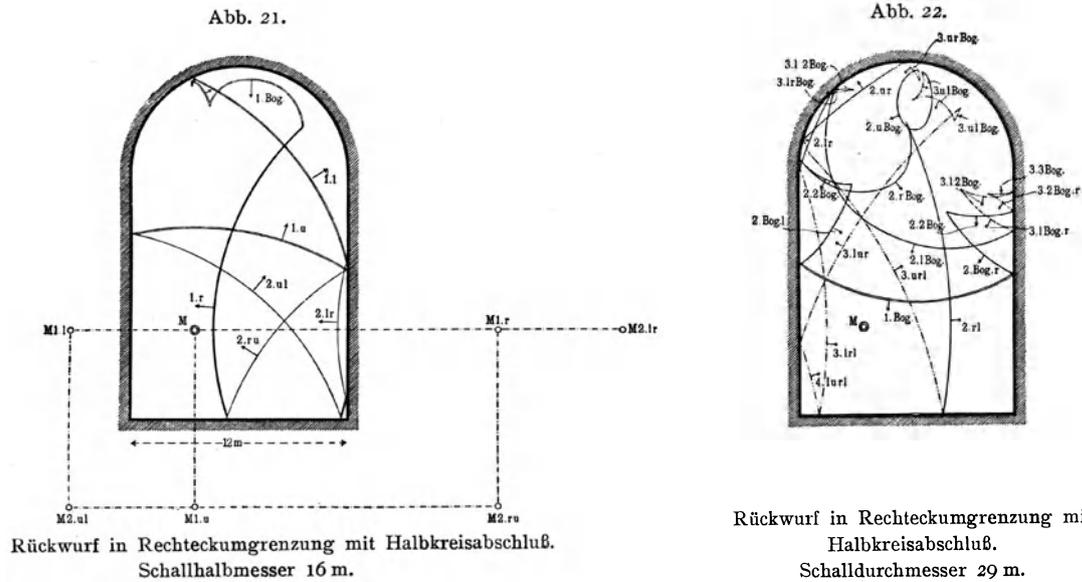
ein Echo beobachtet werden kann, wenn nur im Vergleich zu ihren Vor- und Rücksprüngen der Abstand der Schallquelle erheblich, also die Divergenz der Schallstrahlen und damit ihre Zerstreung und Schwächung durch Rückwurf gering ist.

Die einzelne kleine Teilform eines Gesimses hat also keinen merkbaren Einfluß auf die Gesamtgestalt des Rückwurfs, vielmehr darf man eine erhebliche Wirkung auf die Schallverteilung im Raum nur von einem großgezeichneten, weitausladenden Profil und dann von solchen Gliederungen erwarten, welche als Säulen, Bündelpfeiler, Nischen, Galerien usw.<sup>1)</sup> verhältnismäßig bedeutende Abmessungen gegenüber der bis zu 5 m und mehr betragenden Länge der Schallwellen besitzen. Auch große Lichtkronen, Kandelaber, Möbel und Einbauten irgendwelcher Art können in diesem Sinne wirken. Infolgedessen macht sich der Fortfall derartiger Gebilde sofort durch vermehrten Hall bemerkbar, wobei außer der verminderten Schallzerstreung gewiß auch die Änderung der noch näher zu beleuchtenden

<sup>1)</sup> Zentralbl. d. Bauverw. 1894, S. 364.

Resonanz- und Dämpfungsverhältnisse mitspricht. Beispiele liefern uns solche Kirchen, welche in puristischer Anschauung ihrer früheren Emporen, Altäre, Grabtafeln usw. beraubt wurden, wie die Kirche in Maria-Laach<sup>1)</sup>, die Florinskirche in Koblenz und die Katharinenkirche in Braunschweig.

Für die Überdeckung eines Raumes kommt unter den einseitig gekrümmten Flächen hauptsächlich die tonnenförmige Wölbung in Betracht, und zwar erhalten wir die einfachste Gestalt derselben, die Halbkreistonne, wenn wir die Abb. 5 u. 6 als senkrechte Schnitte durch einen schmalen, hohen Raum auffassen und den geraden oberen Abschluß durch einen Halbkreis ersetzen. Behalten wir so dieselben Hauptabmessungen bei und ändern wir auch nicht die Lage des Erregungsmittelpunktes und die Größe der Schallhalbmesser von 16 und 29 m, so läßt ein Vergleich der entsprechenden Wellenbilder (Abb. 21 u. 22) mit den für Rechteckumschließung gewonnenen



Zeichnungen erkennen, daß die Rückwürfe der Abb. 21, soweit sie von ebenen Flächen stammen, dieselben wie in Abb. 5 bleiben. Sowie aber die Umgrenzung in Bogenform übergeht und demnach die Einfallslote nicht mehr parallel sind, ändert sich das Bild. Die vom Halbkreis abprallenden und den Rückwurf *1. Bog.*, d. h. Rückwurf erster Ordnung des Bogens bildenden Schallstrahlen werden nämlich in die Gegend des Halbkreismittelpunktes geworfen und dort wie in einem Brennpunkt verdichtet; sie überkreuzen sich und gehen dann wieder auseinander, und zwar dringen sie von der Bogenhälfte rechts nach unten links vor und umgekehrt. Der Rückwurf *1. Bog.* der Abb. 22 entsteht demnach ganz entsprechend dem Rückwurf *1. o* in Abb. 6, nur mit dem Unterschied, daß gegenüber dem letzteren „rechts“ und „links“ vertauscht sind. Aber das Ergebnis bleibt dasselbe, nämlich daß bei einem Halbkreisbogen ganz wie beim Rechteck mit einem Widerhall von der dem Erregungspunkt gegenüberliegenden Raumseite zu rechnen ist. Wir sehen auch, daß einzelne Wellen mehrfach innerhalb des Bogens hin- und widergeworfen werden. Nach unserer Bezeichnungsweise haben wir dabei unter „*2. 2 Bog.*“ einen Rückwurf zweiter Ordnung zu verstehen, bei dem die Welle zweimal auf den Bogen trifft, während sie bei „*3. 2 Bog. r*“ außerdem noch gegen die Flächengrenze rechts anläuft und damit einen Rückwurf dritter Ordnung ergibt.

<sup>1)</sup> Zeitschr. f. Bauwesen 1871, S. 245.

Im Gesamtbild reihen sich wie bei den Abb. 5 u. 6, so auch bei den Abb. 21 u. 22 die einzelnen Wellenstücke in ununterbrochenem Zug aneinander.

Die Entwicklung der bedeutsamen Rückwurfswelle *1. Bog.* ergibt sich auch aus dem Bildstreifen (Abb. 23, Taf. IV), welcher mit obigem Apparat unter Verwendung eines entsprechenden Einlegrahmens gewonnen wurde, und in welchem die Aufnahmen Nr. 12, 13 u. 14 sich der Zeichnung Abb. 21 am meisten nähern. Auch hier bemerken wir, ähnlich wie schon bei Abb. 12, ein sich schwächer abzeichnendes Nebensystem. Wir sehen ferner, wie sich in halber Bogenhöhe rechts durch Zusammenreffen mehrerer Rückwürfe eine Wellenverstärkung bildet, die in den folgenden Aufnahmen allmählich nach dem Bogenrand zu wandert. Unabhängig davon zieht sich der Rückwurf *1. Bog.*, wie aus den Aufnahmen Nr. 16 bis 19 hervorgeht, in einen Brennpunkt zusammen, um sich dann von diesem aus in Verbindung mit dem oberhalb sichtbaren, ebenfalls vom Rundbogen stammenden und um den Brennpunkt rechts herumschwenkenden Rückwurf allmählich nach unten zu verbreitern. Aus den Aufnahmen Nr. 20 usw. ist dies deutlich zu ersehen.

Oberhalb des Rückwurfs *1. Bog.* macht sich gerade in den späteren Aufnahmen noch ein weiterer Rückwurf bemerkbar, der gegenüber dem Erregungsmittelpunkt ebenfalls vom Bogen her kommt, aber augenscheinlich ein Rückwurf zweiter Ordnung, nämlich *2. l. Bog.* ist.

Da die Einfallslotte nach Überschreitung des Halbkreismittpunktes unter großem Winkel auseinanderlaufen und daher jeder Rückwurf des Halbkreisbogens sich viel stärker ausbreitet als eine von einer geraden Wand wiederkehrende Welle, so ist unter sonst gleichen Bedingungen der Rückwurf *1. Bog.* einer Halbkreisüberdeckung immerhin schallschwächer als der Rückwurf *1. o* einer geraden Raumüberdeckung.

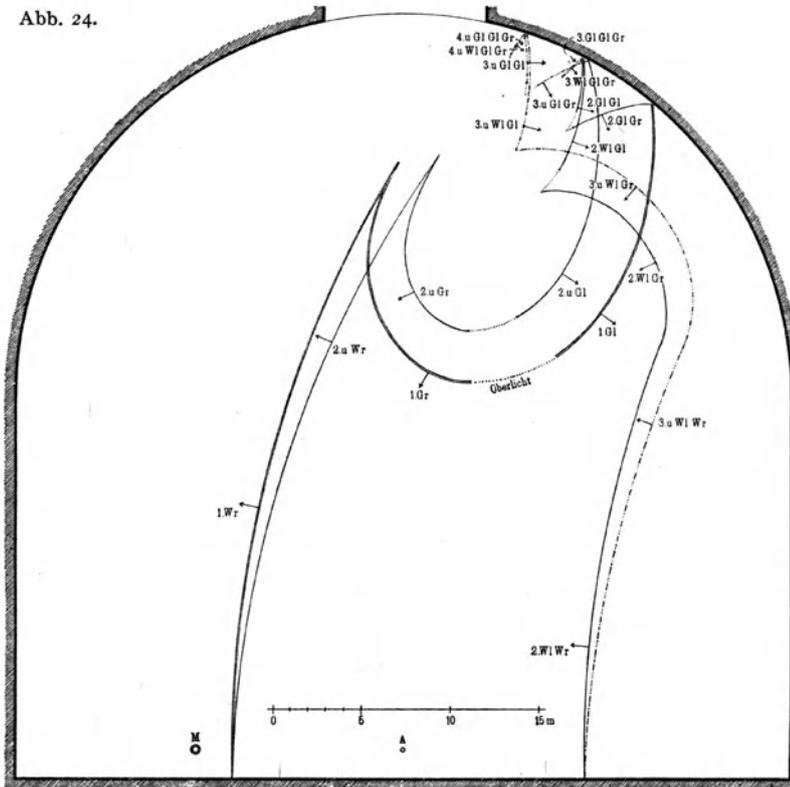
Im ganzen zeigt die Halbkreistonne keinen besonders günstigen Verlauf der Rückwürfe, und gleiches gilt, wenn wir die Abb. 21 u. 22 als Grundrißdarstellungen von Räumen mit halbkreisförmigen Apsiden auffassen. Wir werden daher Orchesterpodien mit gerader Rückwand versehen, um eine möglichst gleichmäßige Schallverteilung zu erhalten<sup>1)</sup>.

Besonders deutlich müssen sich, wie schon beim Rechteck hervorgehoben wurde, Rückwürfe dort bemerkbar machen, wo es sich um große Raumabmessungen handelt. Es wurden daher Schnitt und Grundriß des Pantheons in Rom zeichnerisch untersucht, da dieses Bauwerk mit 43,4 m Weite neben St. Peter die größte massive Kuppel aufweist. Damit kommen wir zugleich auf ein Beispiel mit doppelt gekrümmten Flächen. Wand und Gewölbe sind nur in ihren Hauptformen gezeichnet, also glatt, ohne Rücksicht auf die in Wirklichkeit vorhandenen Vorsprünge, Kassetten und sonstigen Gliederungen. Hierbei empfiehlt es sich, die Rückwürfe der Wand, des Gewölbes usw. durch entsprechende Bezeichnung voneinander zu unterscheiden; *Wl* bedeutet demnach einen Rückwurf von der Wand links, *Gr* einen solchen von der Gewölbehälfte rechts und *Obl* einen Rückwurf von der Kuppelfläche, die an Stelle des Oberlichtes gedacht werden könnte (Abb. 24 u. 25). Unter „*4. u. Wl Obl Gr*“ ist also ein Rückwurf vierter Ordnung zu verstehen, der zunächst den Fußboden, dann die Wand links, eine das Oberlicht einnehmende Fläche und schließlich die Gewölbehälfte rechts trifft.

In gleicher Weise wie beim Rundbogen entwickeln sich aus dem der Schallquelle diametral gegenüberliegenden Gewölbeteil Rückwürfe, die zu erheblichen Störungen führen, zumal sich zwischen ihnen und dem unmittelbaren Schall recht bedeutende Wegunterschiede ergeben. So erreicht der Rückwurf erster Ordnung des Gewölbes die Nähe des Fußbodens, also den Hörer erst zu einem Zeitpunkt, wo der Rückwurf *1. Wr* schon längst durchgegangen und von links her als Rückwurf *2. Wr Wl* zurückgekehrt ist.

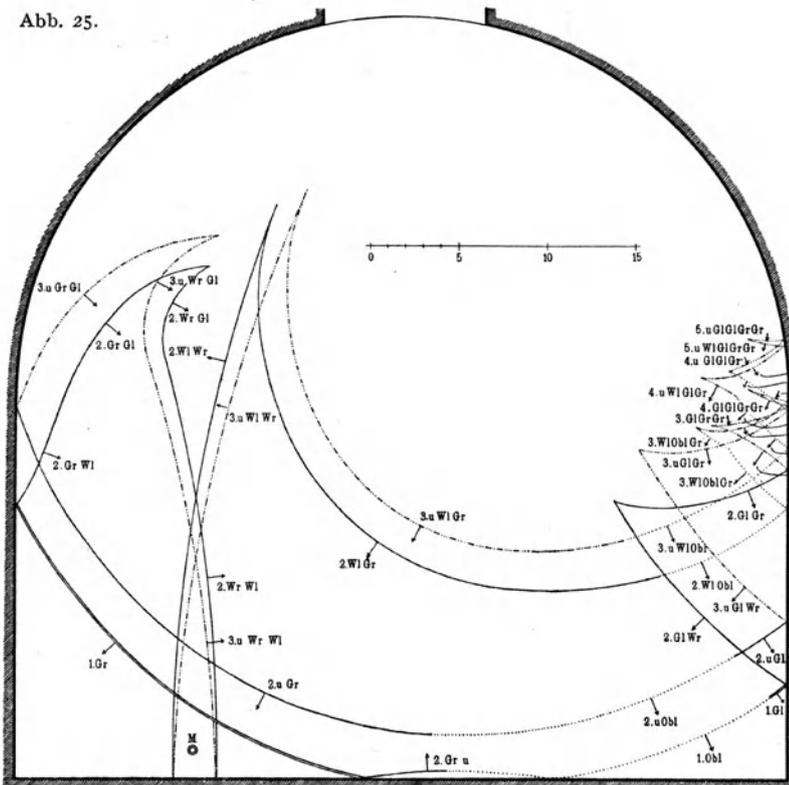
<sup>1)</sup> Handb. d. Arch., 4. Tl., 1. Halbbd., 3. Aufl., S. 349. Stuttgart, Arnold Bergsträsser, 1904.

Abb. 24.



Pantheon in Rom.  
Schnitt.  
Schallhalbmesser 65 m.

Abb. 25.



Pantheon in Rom.  
Schnitt.  
Schallhalbmesser 88 m.

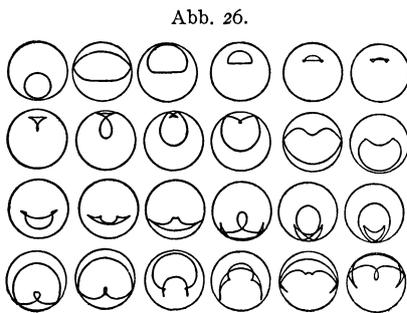
Michel, Hörsamkeit großer Räume.

Im Einklang damit steht die von Keller<sup>1)</sup> gemachte Beobachtung, daß im Pantheon in Rom die Klangreinheit von Sängerstimmen für die meisten Hörer durch die ungünstige Verteilung des Schalles beeinträchtigt wird. Er schlägt daher allgemein für Kuppelrundbauten vor, derartigen Störungen durch eine Verschiebung des Schallausgangspunktes nach außerhalb des eigentlichen Rundbaues entgegenzuwirken, etwa durch Aufstellung der Sänger in einer Seitenkapelle oder einer tiefen Loge. Dies mag sehr richtig beurteilt sein, da von einer Schallquelle, die sich in einem solchen Nebenraum befindet, keine unmittelbaren Schallstrahlen in die Kuppel dringen können. Die durch Rückwurf mittelbar hingelangenden Strahlen aber haben an Stärke schon so viel eingebüßt, daß sie nicht mehr gefährlich werden.

Da ein von der Schallquelle aus über den Mittelpunkt zum Umfang eines Halbkreises oder einer Halbkugel gehender Schallstrahl mit der Richtung des Einfallslotes zusammenfällt und daher auf dem gleichen Weg zurückgeworfen wird, erhält bei Halbkugeln, wie z. B. in der Stadthalle von Hannover, der Redner oder Sänger, wo er auch stehen mag, selbst einen starken Widerhall, während andere in demselben Raum befindliche Personen weniger gestört werden.

Die Abb. 24 u. 25 lassen uns erkennen, daß an den dem Erregungsmittelpunkt *M* gegenüberliegenden Gewölbe- und Wandflächen die Wellenausläufer in vielen kleinen Teilrückwürfen entlanggejagt werden, die zwar von höherer Ordnung sind und daher einzeln für sich ziemliche Schwächung erfahren haben, dafür aber sich durch ihre große Zahl derart verstärken, daß sie die Schallwirkung im Raum merkbar beeinflussen. Dieses Hinlaufen an dem Gewölbe erinnert an die bekannten Flüstergalerien und ähnliche Erscheinungen. Es sei nur der Hohlkehlenumrahmung am Portal des Refektoriums zu Walkenried gedacht, sowie der Paulskirche in London und der Berliner Schloßkapelle<sup>2)</sup>.

Im Grundriß ergeben sich zu den Abb. 24 u. 25 Wellenbilder, welche mit den Darstellungen von Wood über den Verlauf einer Kreiswelle in kreisförmiger Umfassung, insbesondere mit dem 10. und 14. Bild dieser Folge<sup>3)</sup> (Abb. 26) übereinstimmen. Es mag genügen, die letztere hier zu bringen.



Kreiswelle von Kreis zurückgeworfen.

Die Kuppelform zeigt nach dem Gesagten keine besonderen Vorzüge nach der Richtung der Hörsamkeit, wohl aber eine Reihe von Nachteilen. Bereits Haeye und Orth sprechen sich in diesem Sinne aus, ersterer vor allem mit Bezug auf den Saal der Repräsentanten auf dem Kapitol zu Washington<sup>4)</sup>, letzterer hinsichtlich der Nikolaikirche in Potsdam<sup>5)</sup>. Auch die dem Pantheon nachgebildeten katholischen Kirchen in Karlsruhe und Darmstadt ergeben das gleiche<sup>6)</sup>, obwohl die Kuppeln in Holz ausgeführt sind und daher günstige Resonanz erwarten lassen, worüber noch weiter unten zu sprechen sein

wird. Über den zur Kuppel gehörigen kreisförmigen Grundriß und allgemein über die Mißstände beim Zentralraum im Vergleich zum Rechteck hat sich bereits Sturmhoefel näher ausgelassen<sup>7)</sup>, so daß es ausreicht, hier darauf Bezug zu nehmen. Wir verstehen daher, daß sich Watson, besonders

<sup>1)</sup> Zentralbl. d. Bauverw. 1891, S. 188.

<sup>2)</sup> Zeitschr. f. Bauwesen 1871, S. 248.

<sup>3)</sup> Philos. Magazine, 5. Serie, Bd. 50, S. 155, 1900.

<sup>4)</sup> Zeitschr. f. Bauwesen 1859, S. 581 u. 590.

<sup>5)</sup> Ebenda 1872, S. 220.

<sup>6)</sup> Allgem. Bauztg. 1890, S. 46. — A. Valdenaire, Friedrich Weinbrenner, S. 256. Karlsruhe, C. W. Müllersche Hofbuchhdlg., 1919. — Moller u. Heger, Entwürfe ausgeführter und zur Ausführung bestimmter Gebäude. Darmstadt, Carl Wilh. Leske, 1826.

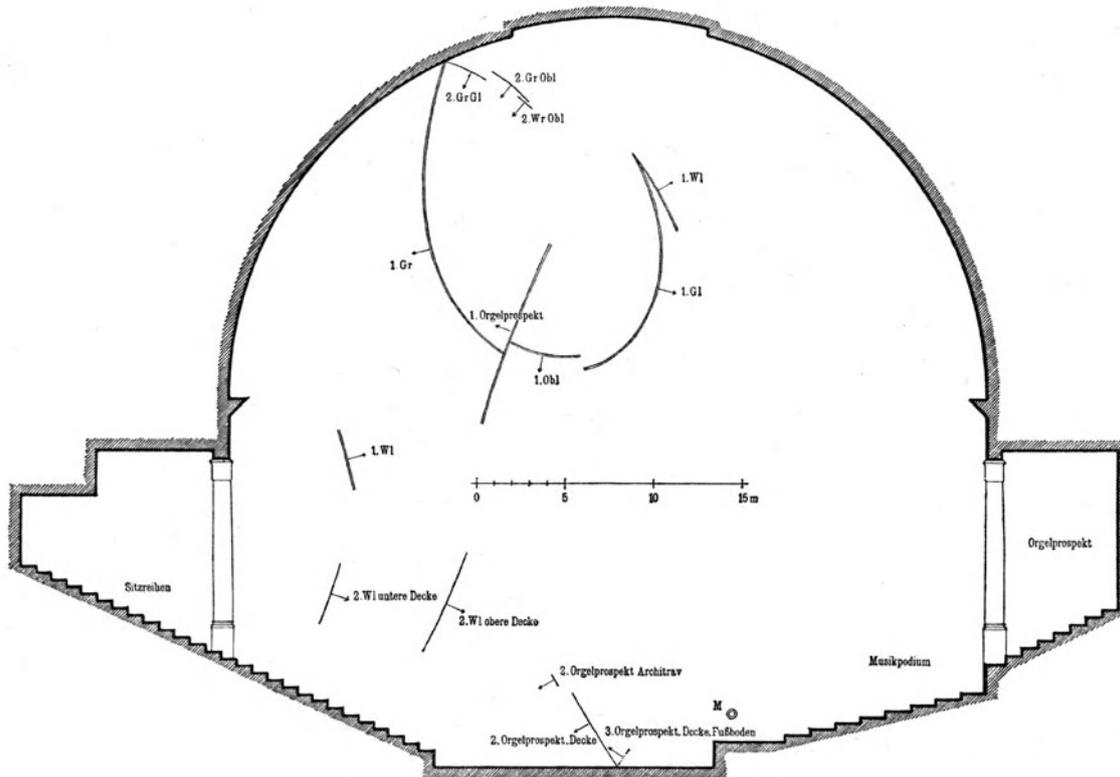
<sup>7)</sup> Sturmhoefel, Zentralbau oder Langhaus? S. 35. Berlin, W. Ernst & Sohn, 1897.

nach den ungünstigen Erfahrungen mit dem kuppelüberdeckten Auditorium der Universität von Illinois, zu dem Urteil veranlaßt sieht:

„Large halls with curved walls are almost sure to have acoustical defects<sup>1)</sup>.“

Zu gleichen Schlüssen führt der Mißerfolg mit der Stadthalle in Hannover<sup>2)</sup>, deren Hauptsaal eine Kuppel von gleichen Abmessungen wie das Pantheon in Rom aufweist. Der Raum enthält auf seiner wagerechten Mittelfläche eine Anzahl von Sitzreihen, an die sich amphitheatralische Ränge sowie auf der einen Seite ein abgestuftes Musikpodium mit einem Orgelprospekt dahinter anschließen,

Abb. 27.



Stadthalle in Hannover. Längsschnitt. Schallhalbmesser 60 m.

wie aus dem hier beigefügten Längsschnitt (Abb. 27) zu ersehen ist. In den letzteren ist als besonders bezeichnend das Wellenbild für einen Schallhalbmesser von 60 m Länge eingetragen. Der Deutlichkeit halber sind aber die vielen Teilrückwürfe der Sitz- und Podiumstufen außer acht gelassen und nur die großen Linienzüge berücksichtigt. Dieselben erkennen wir auch in der mit dem Wellenapparat gemachten Aufnahme wieder (Abb. 28, Taf. V), vor allem in dem Filmbild Nr. 23, welches dem Wellenzustand der Abb. 27 entspricht. Beide Darstellungen stimmen mit dem Wellenbild des Rundbogens (Abb. 23, Taf. IV) insofern überein, als sich genau wie bei diesem die Rückwürfe in einem Brennpunkt zusammenballen (Nr. 21 der Abb. 28) und erst dann nach unten ausbreiten (Nr. 24 der Abb. 28). Außerdem macht sich besonders stark ein von rechts, vom Orgelprospekt her kommender Rückwurf

<sup>1)</sup> University of Illinois Bulletin, Nr. 73, S. 26.

<sup>2)</sup> Der Baumeister 1914, Tafel 165/166.

bemerkbar. Auf dem Bildstreifen (Abb. 28, Taf. V), insbesondere auf Nr. 6 bis 13 desselben sind auch die von den ansteigenden Sitzreihen ausgehenden Wellenbögen zu beachten, wie sie ähnlich bereits Wood an elektrisch ausgelöster Schallwelle mittels Schlierenphotographie erhalten hat (Abb. 29, Taf. V)<sup>1)</sup>. Wir sehen auf letzterer, wie die Welle in der ersten Aufnahme gerade die oberste Stufe berührt und wie sie sich dann in den drei folgenden weiter ausbreitet, wobei sie die erwähnten Bogenrückwürfe entstehen läßt.

Auch beim Großen Schauspielhaus in Berlin, welches durch Umbau eines früheren Zirkus gewonnen wurde, ist die Kuppelform benutzt. Um aber die Tonwellen zu zerstreuen und ihr Zurückhalten in den Zuschauerraum zu verhindern, wurde die Fläche im Ringe aufgeteilt, die gegeneinander durch kleine Tonnengewölbe abgesteift sind und sich nach unten in einzelne Hängezapfen auflösen (Abb. 30, Taf. VI)<sup>2)</sup>.

Die bei der halbkugelförmigen Kuppel gewonnenen Hauptergebnisse lassen sich auch für Kuppeln von anderer Gestalt verallgemeinern. Es sei z. B. der Albert Hall in London<sup>3)</sup> gedacht, welche bei 68,50 m großer Achse und 57,20 m kleiner Achse ihres elliptischen Grundrisses rund 10000 Menschen aufzunehmen vermag. Auch die 49 m weite Rotunde des Trocadéro-Palastes in Paris<sup>4)</sup> sei hier genannt. Bei beiden hat die gewählte Deckenform eine allzu große Raumhöhe und damit ungünstige Rückwürfe veranlaßt. Dazu kommt, daß gerade infolge der großen Abmessungen Rückwürfe dort, wo sie zur Unterstützung des unmittelbaren Schalles wünschenswert wären, vielfach fehlen und daß infolgedessen ein Einzelgesang oder eine Rede dünn und schwach klingt.

Bekanntlich besitzt die Kuppel des Pantheons eine Scheitelöffnung von 9 m Durchmesser. Alle Schallwellen, welche auf den Bereich derselben fallen, werden nicht zurückgeworfen, sondern sie entweichen ungehindert ins Freie. Damit werden in die den Raum durchlaufenden Rückwurfwellen breite Lücken gerissen, welche in den Abb. 24 u. 25 punktiert angedeutet sind. Sie sitzen gerade an den Stellen, wo die aus der Kuppel kommenden großen Rückwürfe sich dem Fußboden nähern. Man kann also annehmen, daß das Vorhandensein des großen offenen Oberlichtes durch Ausschaltung ungünstiger Rückwürfe, vor allem *1. Obl* und *2. u Obl*, dann aber auch *2. Wl Obl* und allenfalls noch *3. u Wl Obl* die Hörsamkeit des Raumes günstig beeinflußt. Ähnliches wird beim Großen Schauspielhaus in Berlin durch die entsprechende Ausgestaltung und die Zwischenräume der um den Kuppelscheitel sich legenden Deckenringe angestrebt (Abb. 31)<sup>5)</sup>. Noch günstiger ist es, wenn eine Decke und damit ein Deckenrückwurf überhaupt fehlt, wie an den antiken Theatern, deren vorzügliche Hörsamkeit noch heute in Orange<sup>6)</sup>, Taormina<sup>7)</sup> usw. zu erkennen ist. Und gleiches gilt aus neuerer Zeit von den Naturtheatern und Freilichtbühnen, unter denen Oberammergau<sup>8)</sup> eine besondere Bedeutung besitzt.

Bei der Stadthalle in Hannover ist zwar ebenfalls ein Scheiteloberlicht angeordnet, und zwar mit gleicher Weite wie beim Pantheon, aber unserem Klima entsprechend mußte es durch eine Verglasung geschlossen werden. Infolgedessen bleiben Rückwürfe als solche bestehen, nur werden sie, wie später zu erörtern sein wird, entsprechend den Eigenschaften des Glases stärker gedämpft, als wenn die Fläche massiv durchlief.

<sup>1)</sup> Philos. Magazine 1899, Serie 5, Bd. 48, Tafel 4, Fig. 14.

<sup>2)</sup> Neudeutsche Bauztg. 1920, S. 160.

<sup>3)</sup> Handb. d. Arch., 4. Tl., 1. Halbbd., S. 351. Stuttgart, Arnold Bergsträsser, 1904.

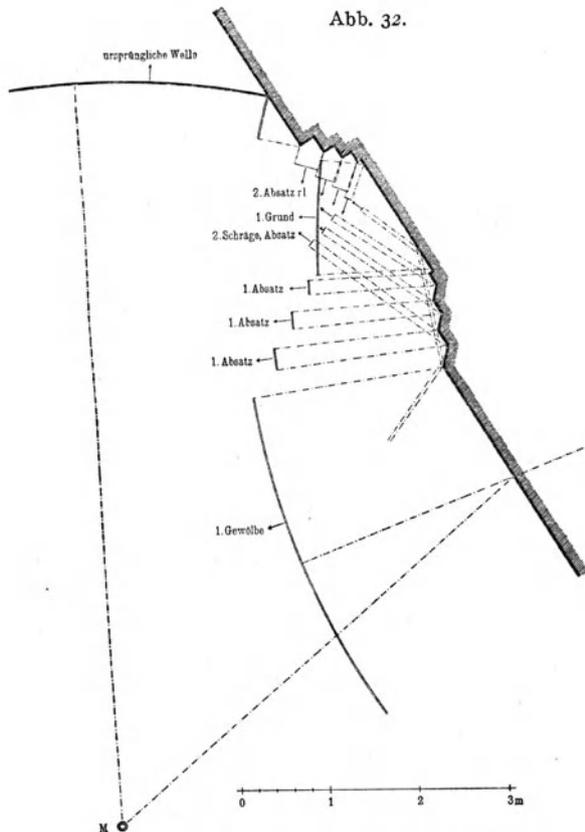
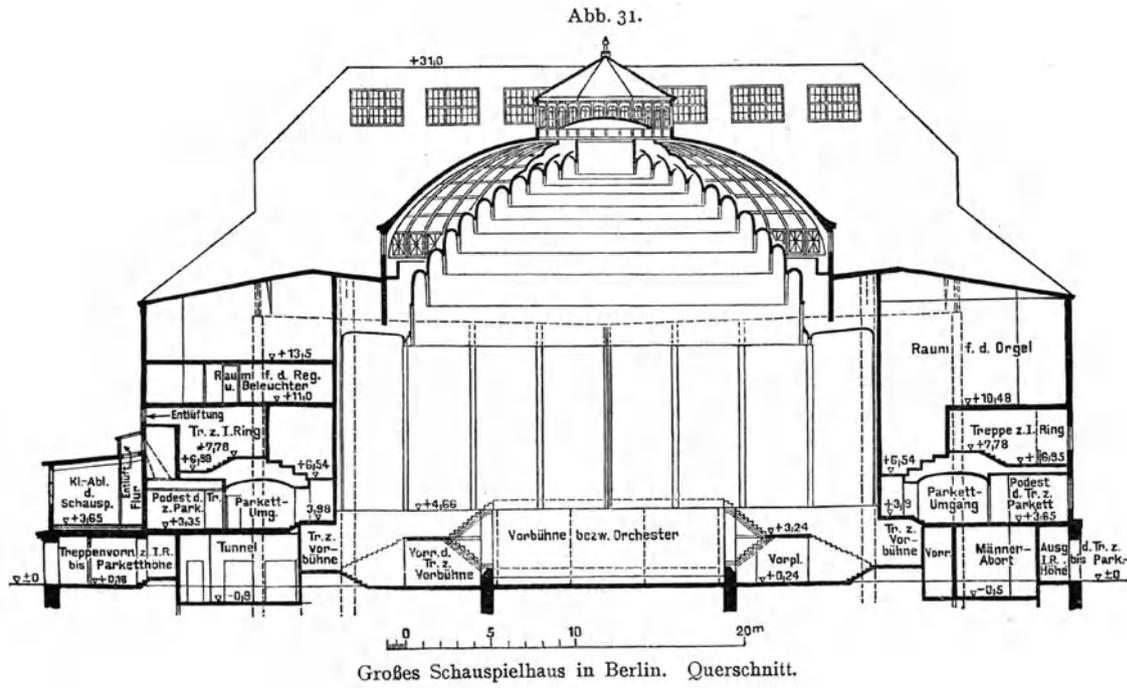
<sup>4)</sup> Ebenda, S. 354.

<sup>5)</sup> Zentralbl. d. Bauverw. 1919, S. 605.

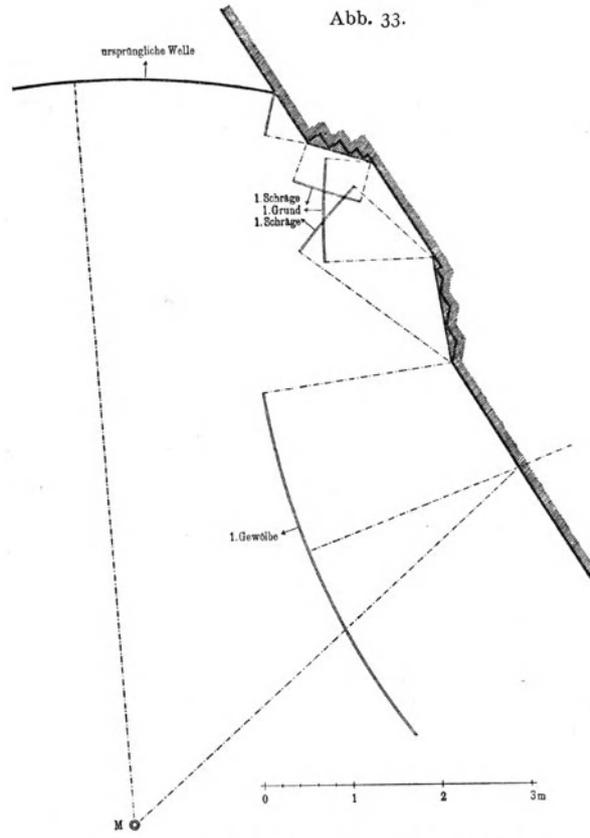
<sup>6)</sup> Handb. d. Arch., 3. Tl., 6. Halbbd., 3. Aufl., S. 58. Stuttgart, Arnold Bergsträsser, 1904. — Choisy, Histoire de l'archit. I., S. 490. Paris, Gauthier-Villars, 1899.

<sup>7)</sup> Zeitschr. f. Arch. u. Ingenieurwesen, Heftausg. 1896, S. 46.

<sup>8)</sup> A. Sturmhoefel, Akustik des Baumeisters, S. 82. Berlin, Schuster & Bufe, 1894.



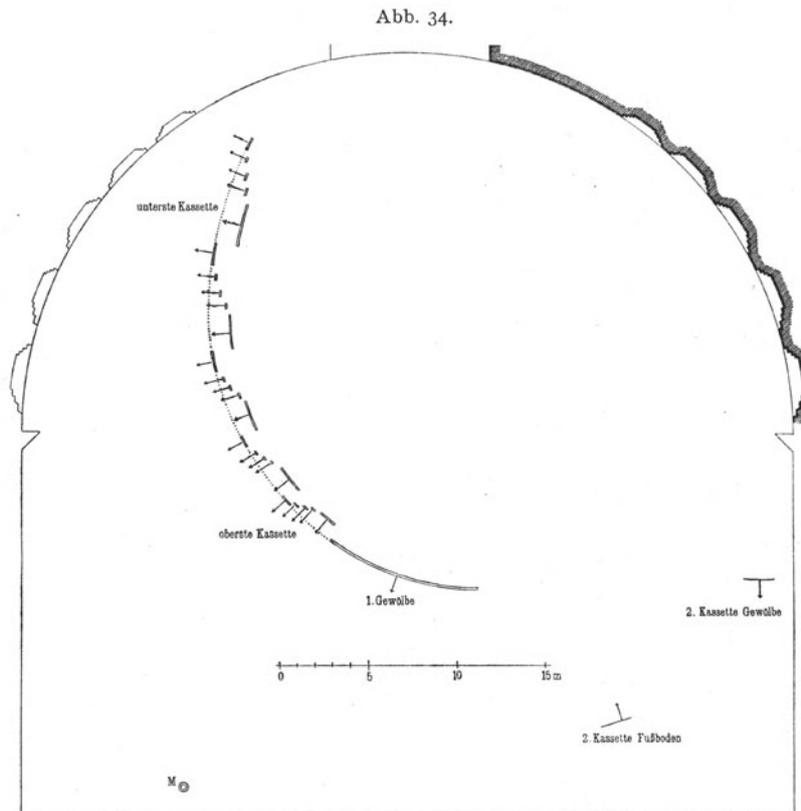
Rückwurf an Kasette. Schallhalbmesser 8,5 m.



Rückwurf an Kasette mit vereinfachtem Profil. Schallhalbmesser 8,5 m.

Ein weiteres Gestaltungsmotiv, welches sich am Pantheon wie auch an der Stadthalle in Hannover findet, ist die Kassettengliederung der Kuppelfläche. Der herankommende Schall wird hauptsächlich vom Grund der Kassette zurückgeworfen (Abb. 32). Auch an den umrahmenden Gliederungen ergeben sich Rückwürfe, die sich bei der abgetrepten Gestalt der ersteren leicht aufzeichnen lassen. Im Vergleich zu dem großen Rückwurf des Kassettengrundes kann aber von ihnen keine irgendwie belangreiche Wirkung erwartet werden.

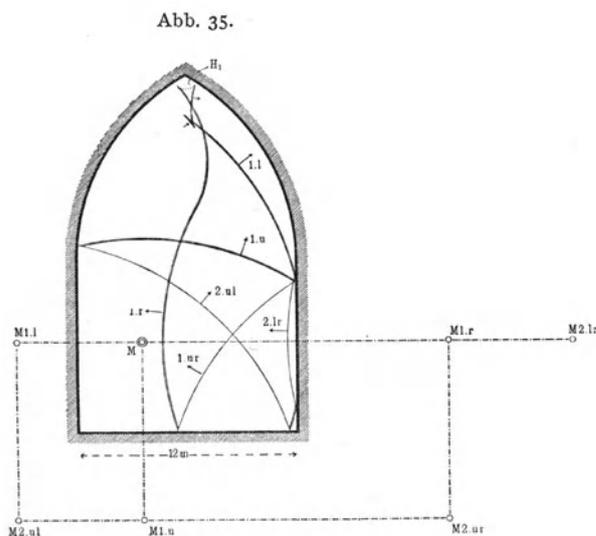
Denkt man sich die abgetreptte Umrahmung durch eine Schräge ersetzt, so wird das Bild einfacher (Abb. 33), aber in der Gesamtwirkung ergibt sich keine wesentliche Verschiebung gegenüber der Abb. 32.



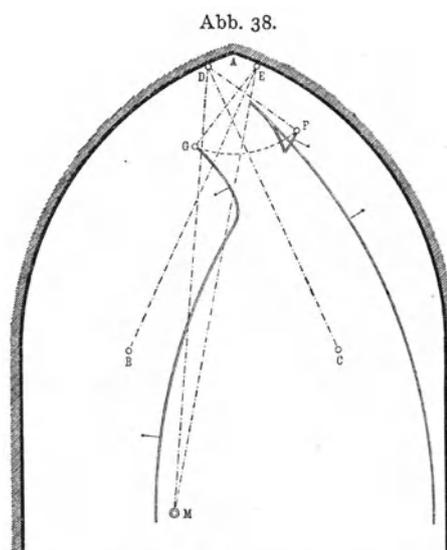
Pantheon in Rom. Schnitt. Rückwurf der Kuppelhälfte rechts unter Berücksichtigung der Kassetten.  
Schallhalbmesser 75 m.

Tragen wir in das bereits untersuchte Schnittbild des Pantheons auch die Kassetten ein (Abb. 34) und konstruieren wir danach eine Rückwurfwelle, z. B. für die Kuppelhälfte rechts, so bleiben die Kassettenrückwürfe hinter dem der glatten Kuppelfläche entsprechenden und in der Zeichnung punktiert ergänzten Rückwurfbogen etwas zurück. Bei der großen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schallwellen können aber derartige an und für sich geringfügige Verzögerungen keinen nennenswerten Einfluß auf die Hörsamkeit im Raum ausüben. Daran ändert sich auch nur wenig, wenn, wie im vorliegenden Fall, der Kassettengrund nicht mit der Hauptlinie der Kuppel gleichläuft, oder wenn man ihn stark konvex oder konkav ausbildet, vielleicht auch mit plastischen Rosetten oder dergleichen besetzt. Ähnliche Verhältnisse werden uns später bei Besprechung der Wandbehandlung noch begegnen.

Anders als bei dem Rechteck und dem Rundbogenabschluß stellt sich die Sachlage bei einem Spitzbogen dar. Dadurch, daß die beiden Kurvenzweige des letzteren verhältnismäßig steil in die Höhe gehen und oben nicht tangential ineinanderlaufen, sondern sich scharf schneiden, werden die vom Spitzbogen kommenden Rückwürfe erster Ordnung zunächst nur zwischen den beiden Bogen-



Rückwurf in Rechteckumgrenzung mit Spitzbogenabschluß.  
Schallhalbmesser 16 m.

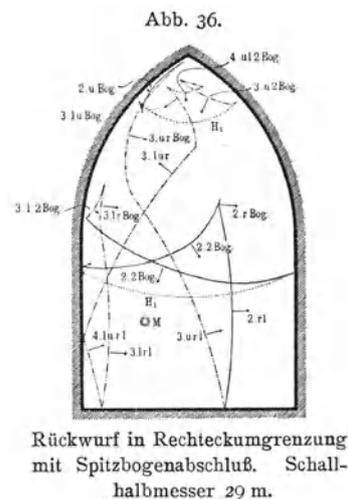


Rückwurf an der Spitze eines Spitzbogens.

schenkeln hin und her geworfen (Abb. 35), und sie erreichen einen etwa in Höhe der Schallquelle  $M$  befindlichen Hörer frühestens als Rückwürfe  $2.2\text{ Bog.}$ , die durch zweimaliges Zurückwerfen von einem Bogenpunkt schon sehr geschwächt sind, also nicht mehr störend wirken (Abb. 36). Ein Rückwurf erster Ordnung vom Bogen her erreicht im vorliegenden Beispiel den Hörer nicht. Ob es in anderen Fällen möglich sein würde, hängt jeweils von der Gestalt des Spitzbogens ab. Das Auftreten störenden Widerhalls wird man also bei spitzbogiger Tonnenwölbung im allgemeinen weniger zu befürchten haben als bei Halbkreistonne oder ebener Decke.

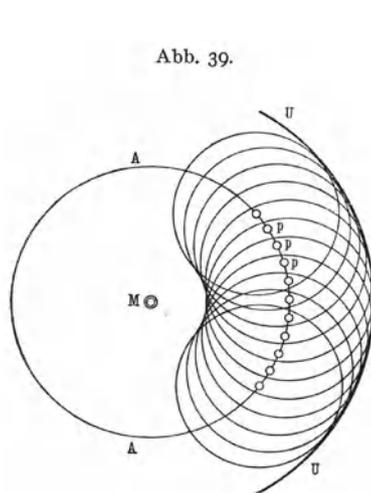
Auf dem mit Hilfe des Wellenapparates aufgenommenen Bildstreifen (Abb. 37, Taf. VII), vor allem auf den Bildern Nr. 14 bis 20 desselben sprechen sich deutlich die Rückwürfe  $1.r$  und  $2.lr$  aus. Den ersteren sehen wir im Bild Nr. 25 von links her als  $2.rl$  zurückkehren, wobei im Anschluß an sein oberes abgebogenes Ende, nämlich  $2.r\text{ Bog.}$ , sich ein Rückwurf nach rechts unten entwickelt, ganz entsprechend der Linie  $2.2\text{ Bog.}$  der Zeichnung (Abb. 36).

Die Wellenbilder der Abb. 35 u. 36 sind nach denselben Grundsätzen wie beim Rechteck und beim Halbkreis aufgetragen. Da aber ein Spitzbogen infolge seiner Scheitelbildung nicht stetig verläuft, fällt das Ende  $F$  einer vom Bogenteil links zurückgeworfenen Welle (Abb. 38) nicht mit dem Ende  $G$  des entsprechenden Rückwurfs von rechts zusammen. Wir nehmen an, jeder der beiden Rückwurfpunkte  $D$  und  $E$ , von denen  $F$  und  $G$  ausgehen, liege unendlich nahe beim Scheitel  $A$ .

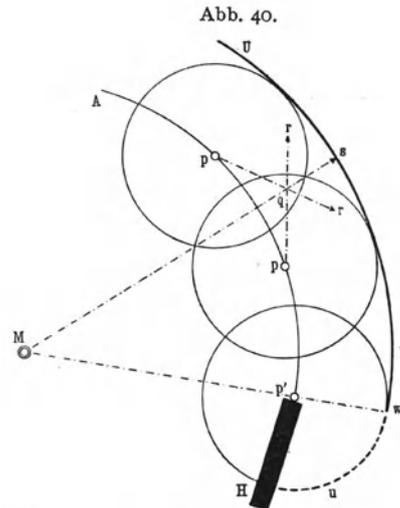


Rückwurf in Rechteckumgrenzung mit Spitzbogenabschluß. Schallhalbmesser 29 m.

Dann läßt sich der Zusammenhang des Wellenzuges wieder herstellen, wenn wir das Huygenssche Prinzip zu Hilfe nehmen. Nach diesem erzeugt eine Welle, die von einem Mittelpunkt  $M$  ausgeht (Abb. 39) und bis  $A$  gelangt ist, in jedem ihrer Punkte  $p$  wieder kreisförmige Wellen. Die Umhüllungsline  $U$  aller dieser Kreise stellt die nach bestimmter Zeit weiter fortgeschrittene Welle dar<sup>1)</sup>. Oder etwas anders aufgefaßt: Wenn von unendlich nahe beieinanderliegenden Punkten  $p$  der Welle  $A$  (Abb. 40) neue Wellen ausgehen, so vereinigt sich beim Zusammentreffen zweier Strahlen z. B. in  $q$  das beiderseitige radiale Ausbreitungsbestreben  $qr$  zu einer mittleren Wirkung  $qs$  in Richtung der Mittelsenkrechten  $Mq$  zwischen den Punkten  $p$ . Da wir aber unendlich viele Punkte  $p$  haben, so schließt sich das Gesamtausbreitungsbestreben aller Mittelkräfte zu einer Fortpflanzungswelle  $U$  zusammen.



Ausbreitung einer Welle.



Welle beim Vorübergang an einem Hindernis.

Eine photographische Darstellung des Huygensschen Prinzips hat Wood mit dem Schlierenverfahren gewonnen (Abb. 41, Taf. VII)<sup>2)</sup>, indem er von der in der Abbildung ersichtlichen oberen Vorrichtung aus eine Welle gegen die darunter befindliche Platte anlaufen ließ, welche eine schmale Öffnung besaß und damit gewissermaßen ein einziges Wellenelement aussiebte. Dieses trat durch die Öffnung und bildete alsdann eine sich unbehindert ausbreitende Huygenssche Kreiswelle, während im übrigen die ursprüngliche Welle von der Platte zurückgeworfen wurde. Auch Foley und Souder bringen Abbildungen gleicher Art (Abb. 42, Taf. VIII)<sup>3)</sup>.

Läuft die Welle  $A$  der Abb. 40 gegen ein bei  $p'$  endigendes Hindernis  $H$ , so wird sie von diesem zurückgeworfen und sie vermag nur daran vorbei ihren ursprünglichen Weg fortzusetzen. Das Ausbreitungsbestreben des in der Richtung  $Mp'$  über  $p'$  hinaus weitergehenden Wellenteiles erfährt jenseits des Hindernisses  $H$  an dem nunmehr freien Wellenende  $W$  keine Gegenwirkung mehr durch andere Ausbreitungswellen, wie dies bei  $q$  der Fall gewesen war, und kann sich daher hemmungsfrei entwickeln, d. h. es tritt ein Huygensscher Bogen  $u$  mit  $p'$  als Mittelpunkt auf, und die Fortpflanzungswelle  $U$  endigt durch tangentialen Übergang in diesen Wellenbogen  $u$ . Die Stärke des

<sup>1)</sup> Winkelmann, Handb. d. Physik, Bd. 2, Akustik, 2. Aufl., S. 89. Leipzig, J. A. Barth, 1909.

<sup>2)</sup> Philos. Mag., Ser. 5, Bd. 48, S. 218 u. Taf. IV, Fig. 10, 1899. Vgl. auch Grimsehl in der Zeitschr. f. d. physik. u. chem. Unterricht, 19. Jahrg., S. 271 m. Abb., 1906.

<sup>3)</sup> Scientif. American. Suppl., Bd. 75, Febr. 1913, S. 109, Phot. 25 bis 30.

letzteren ist aber nicht gleichbleibend, sondern sie nimmt von  $a$  nach  $b$  allmählich ab (Abb. 43), da der Bogen infolge der Divergenz der Kreislinien immer mehr die Unterstützung durch die Ausbreitungswellen verliert, welche von den dem Punkt  $p'$  vorausgehenden Punkten  $p$  ausgehen.

Ganz deutlich erkennt man Huygenssche Wellen mit ihrem kleineren Krümmungshalbmesser und ihrer abnehmenden Stärke auf einer mit dem Wellenapparat gewonnenen Aufnahme (Abb. 44, Taf. VIII), bei welcher das Hindernis durch ein hochkant in das Becken gestelltes Holzbrettchen von 0,8 cm Stärke gebildet wurde. Da es hierbei wünschenswert erschien, in gleichen Zeitabständen immer wieder neue Wellen zu erhalten, ist zur Erzeugung derselben nicht die in Abb. 11 dargestellte Vorrichtung benutzt, sondern ein Tropfapparat, der aus einer hochgestellten Flasche und einer durch einen Gummischlauch mit ihr verbundenen Glasspitze besteht. Die damit erzeugten Wellen sind von vornherein klarer als bei der anderen Vorrichtung, aber infolge ihrer geringeren Stärke erlöschen sie sehr bald, und sie sind daher für die Beobachtung von Rückwurferscheinungen weniger geeignet.

Beim Spitzbogen ist die Spitze  $A$  als ein solcher Mittelpunkt eines Huygensschen Kreises aufzufassen (Abb. 38), der von dem in Richtung  $MA$  verlaufenden Schall angeregt wird. Da die Punkte  $D$  und  $E$  als unendlich nahe bei  $A$  liegend anzunehmen sind, haben die Wellenenden  $F$  und  $G$  infolge gleichen Zeitverlaufs auch gleichen Abstand von  $A$ , d. h. der Huygenssche Kreis ist beiden gemeinsam oder  $F$  und  $G$  liegen auf einem Kreisbogen um  $A$  mit einem Halbmesser, der sich als Unterschied zwischen der gesamten Schallweglänge und dem Abstand  $MA$  der Schallquelle von der Bogenspitze ergibt. Da in Abb. 38 die Punkte  $D$  und  $E$  der Anschaulichkeit halber in einem gewissen Abstand von  $A$  angegeben werden mußten, geht der Huygenssche Kreisbogen hier scheinbar nicht mit scharf tangentialer Kehre in die beiden zu verbindenden Rückwürfe über. Man muß sich aber immer gegenwärtig halten, daß dies tatsächlich doch der Fall ist.

Ziehen wir Huygenssche Kreise in Betracht, so erhalten wir auch beim Spitzbogen wieder einen vollständig lückenlosen Zusammenhang unter den sämtlichen Rückwurfwellenstücken. Dies sehen wir z. B. an Abb. 35, wo ein gerade in seiner ersten Entwicklung begriffener Bogen  $H_1$  die Verbindung zwischen den Rückwürfen  $1.r$  und  $1.l$  herstellt. In Abb. 36 ist er schon weiter gediehen, und zwar sehen wir ihn zwischen den beiden Rückwürfen  $2.2 Bog.$  Dazu ist noch ein neuer Huygensscher Bogen  $H_2$  zwischen den Rückwürfen  $3.u 2 Bog.$  und  $2.u Bog.$  getreten.

Daß bei ansteigenden Sitzreihen die von den Ober- und Vorderseiten der Stufen kommenden Rückwürfe geschlossene Bogenlinien ergeben, wie aus den Abb. 28 und 29 zu ersehen ist, läßt sich ohne weiteres durch Zuhilfenahme des Huygensschen Gedankens erklären.

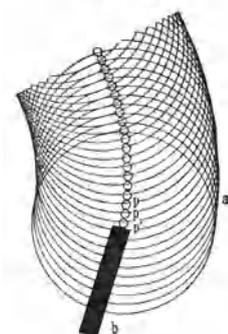
Naturgemäß sind die Huygensschen Kreiswellen sehr zart, und sie werden daher von stärkeren Wirkungen leicht übertönt, so daß sie sich in vielen photographischen Aufnahmen kaum aussprechen.

**Stütze.** Bisher sind ausschließlich Räume behandelt worden, die völlig frei und stützenlos waren. Untersuchen wir jetzt den Einfluß von Zwischenstellungen, so müssen wir den geradlinig umzogenen eckigen Pfeiler und den Tragkörper mit gekrümmten Flächen, insbesondere die runde Säule unterscheiden.

An den ebenen Seitenflächen eines Pfeilers treten Rückwurferscheinungen von gleicher Art wie bei der geraden Wand auf, indem von der Pfeilerseite  $AB$  (Abb. 45) die aus  $M$  kommende Schallwelle so zurückgeworfen wird, als ob sie unmittelbar von einem Erregungsmittelpunkt  $M_1$  käme,

Michel, Hörsamkeit großer Räume.

Abb. 43.

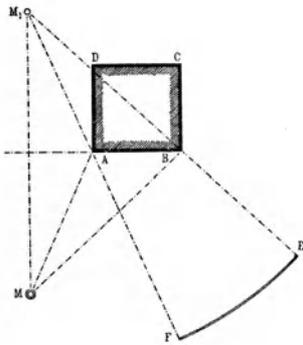


Welle beim Vorübergang an einem Hindernis.

welcher in bezug auf  $AB$  symmetrisch zu  $M$  liegt. Nach einer gewissen Frist gelangt demnach die zurückgeworfene Welle in die Lage  $E-F$ . In der gleichen Zeit ist die auf  $AD$  treffende Welle nach  $GH$  gekommen (Abb. 46), wie wenn sie von einer zu  $M$  symmetrischen Schallquelle  $M_2$  ausginge. Von  $M$  aus werden die Punkte  $F$  und  $H$  zu gleichen Zeiten erreicht, so daß  $AH = AF$  ist. Ferner ist  $\angle MAM_1 = \angle MAH$ , d. h. es liegt  $H$  auf derselben durch  $A$  gehenden geraden Linie wie  $F$ .

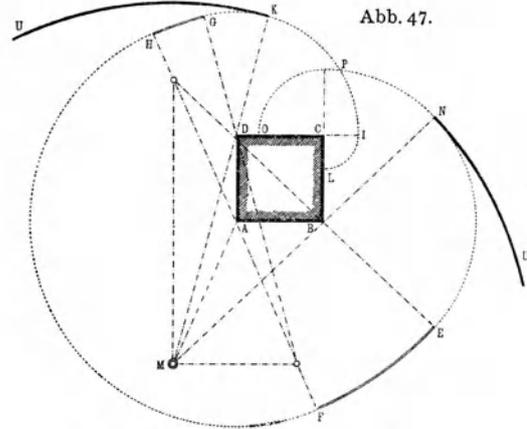
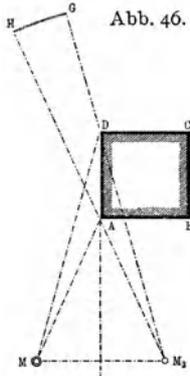
Beide Rückwürfe  $EF$  und  $GH$  verlaufen aber nicht selbständig für sich, sondern sie stehen durch Huygenssche Kreiswellen miteinander in Verbindung (Abb. 47). Ist nämlich der Strahl  $MA$

Abb. 45.



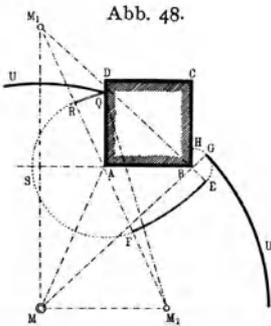
Rückwürfe an einer ebenen Pfeilerseite.

Abb. 46.



Rückwurf an quadratischem Pfeiler.

Abb. 48.



Rückwurf an quadratischem Pfeiler.

in  $A$  angelangt, so bildet dieser Punkt den Ausgang einer neuen Erregungswelle. Diese breitet sich in dem Maße aus, wie der zurückgeworfene Strahl  $MA$  sich in der Richtung nach  $F$  und  $H$  fortpflanzt, d. h. sie stellt einen um  $A$  mit dem Halbmesser  $AF = AH$  geschlagenen Halbkreis dar.

Was vom Punkt  $A$  gesagt ist, gilt in gleicher Weise auch von den Punkten  $B$  und  $D$ . Der Schallstrahl  $MD$  macht nämlich die Pfeilerkante  $D$  zu einem neuen Erregungsmittelpunkt. Ein um  $D$  mit dem Halbmesser  $DG$  geschlagener Kreisbogen  $GJ$  ist die zu  $HG$  gehörende, an  $G$  sich anschließende Huygenssche Kreiswelle, welche in  $K$  die ursprüngliche Schallwelle  $U$  berührt. Durch den nach dem letzten Punkt  $J$  des Bogens  $GJ$  gerichteten Strahl  $DJ$  wird eine neue Welle in  $C$  hervorgerufen. Schlägt man um diesen Punkt mit dem Halbmesser  $CJ$  einen Bogen, so läuft dieser in  $L$  an die Pfeilerseite  $BC$  an, und er gibt uns damit das Ende der von  $M$  über  $D$  und  $C$  gehenden Schallwirkung. In gleicher Weise entsteht von  $MBN$  ausgehend der Bogen  $NO$ . Die von  $M$  ausgehenden Schallwellen schlagen also gewissermaßen von beiden Seiten um den Pfeiler herum und damit erklärt es sich zwanglos, weshalb auch im Schallschatten ein Schall, wenn auch abgeschwächt, zu vernehmen ist.

Diese Beugung, der wir in ähnlicher Gestalt auch in der Optik begegnen, zeigt sich um so stärker, je größer die Wellenlänge, also je geringer die Schwingungsintensität und damit, je tiefer der Ton ist <sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Handwörterb. d. Naturw., Bd. 8, S. 869 u. Bd. 10, S. 597. Jena, Gustav Fischer, 1913.

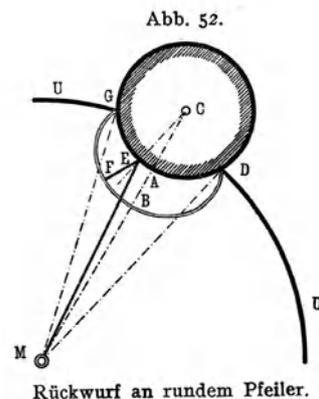
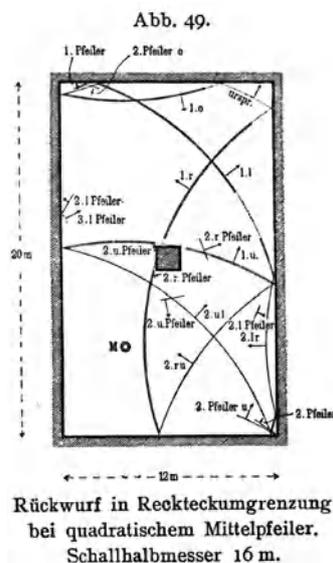
Wenn in dem soeben betrachteten Fall des rechteckigen Pfeilers die ursprüngliche Schallwelle  $U$  noch nicht über den Pfeiler hinausgelangt ist (Abb. 48), so schließt sich an sie im An schnittspunkt  $Q$  der dem Punkt  $M$  zugewandten Pfeilerseite  $AD$  unmittelbar ein Rückwurf erster Ordnung  $QR$  an, der bis zur Linie  $M_1 M_2$  reicht und dort in den Huygensschen Kreisbögen  $RSF$  übergeht. Daran reiht sich ein Rückwurf  $FE$  der Seite  $AB$  und weiter ein Huygensscher Bogen, der in  $G$  die ursprüngliche Schallwelle  $U$  berührt und in  $H$  an die Pfeilerseite  $BC$  anläuft. Wir haben also auch hier wieder einen ununterbrochenen Wellenzug.

Stellen wir einen quadratischen Pfeiler in die Mitte des oben besprochenen rechteckigen Raumes (Abb. 5), so wird der glatte Wellenverlauf mehrfach gestört, wie die Zeichnung (Abb. 49) erkennen läßt. Die Huygensschen Kreisbögen sind dabei weggelassen, weil sie das Bild verwirren würden, und es sind nur die eigentlichen Rückwürfe eingetragen; die vom Pfeiler in die Wellenzüge gerissenen Lücken sind punktiert angedeutet.

Auf dem Bildstreifen (Abb. 50, Taf. VIII) erkennen wir deutlich die Rückwürfe der Pfeilerseiten und die mit ihnen ringförmig sich zusammenschließenden Huygensschen Bögen, und zwar ist die Rückwurfwelle dort besonders kräftig ausgeprägt, wo sie dem Rückwurf erster Ordnung  $EF$  der Abb. 45 entspricht. Wir sehen auch, daß jede über den Pfeiler hinausgehende Welle einen Knick aufweist, indem die durch den Pfeiler verursachte Wellenlücke von beiden Seiten her durch die sich überschneidenden Huygensschen Bögen wieder ausgefüllt wird gemäß Linie  $NPK$  der Abb. 47. Noch zahlreichere derartige Störungen der Wellenzüge ergeben sich, wenn zwei oder mehr Pfeiler vorhanden sind (Abb. 51, Taf. IX). Besonders deutlich fällt die schallzerstreuende Wirkung von Pfeilerstellungen dann ins Auge, wenn wir bei gleichem Wellenstand, d. h. nach gleichem Zeitverlauf seit Entstehung der Welle das Bild des stützenfreien Rechteckraumes mit dem im stützenbesetzten vergleichen, z. B. Nr. 12 der Abb. 12 mit Nr. 16 der Abb. 50 und Nr. 14 der Abb. 51.

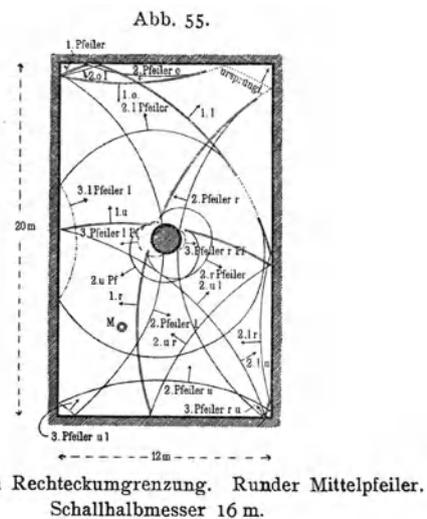
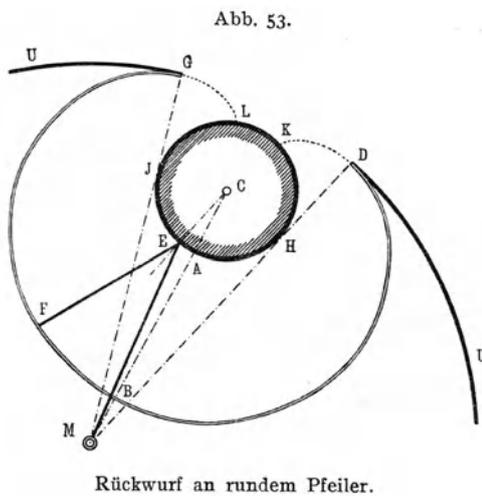
Zur Darstellung der Pfeiler wurden beim Wellenapparat eiserne Scheiben benutzt, die mit je drei Stellschrauben versehen waren und dadurch genau auf die Höhe der Wasseroberfläche eingewogen werden konnten. Sie ergaben so ein ziemlich scharfes Bild auf dem Schirm, während der Umriss vollständig verschwamm, sobald die Scheiben über den Wasserspiegel emporragten und nun die Flüssigkeit infolge der Oberflächenspannung sich an den Seitenflächen der Scheiben hinaufdrängte und damit lichtbrechende Hohlkehlen bildete.

Bei einer Stütze mit gekrümmten Seitenflächen sind die Einfallslotte nicht mehr unter sich parallel, sondern sie laufen je nach der Krümmung steiler oder flacher ineinander. Ist die Stütze kreisrund, so decken sich die Einfallslotte mit den Halbmessern, sind also alle nach dem Grundrißmittelpunkt  $C$  gerichtet (Abb. 52). Jeder Schallstrahl wird dort, wo er auf den Säulenumfang trifft, unter gleichem Winkel zum Einfallslot zurückgeworfen und dieser Winkel ist um so größer, je schräger, also je mehr nach der Seite hin der Strahl an die Säule anschneidet. Um die größte Strecke



dagegen wird derjenige Schallstrahl zurückgeworfen, welcher vom Erregungsmittelpunkt  $M$  aus unmittelbar nach dem Kreismittelpunkt  $C$  gerichtet ist. Hierbei fällt der Rückwurf mit der Richtung des Strahles zusammen und seine Länge ist gleich  $AB$ , d. h. gleich dem Unterschied zwischen dem Wellenhalbmesser  $MD$  und dem Abstand  $MA$  der Schallquelle vom Säulenumfang. Der Endpunkt des in Richtung  $MC$  gehenden Strahles würde bei ungestörtem Verlauf auf der ursprünglichen Welle  $U$  liegen, befindet sich aber infolge des Rückwurfs an der Stelle  $B$ . Jeder seitlich von  $A$  liegende Umfangspunkt ergibt einen Winkelrückwurf, z. B. in  $E$  einen solchen nach  $F$ , wobei wieder  $EF$  gleich dem Unterschied zwischen dem Halbmesser  $MD$  und dem Abstand  $ME$  ist.

Ermittelt man eine ganze Anzahl derartiger Punkte  $F$  und verbindet man sie miteinander, so ergibt sich eine Rückwurfswelle, deren Gestalt aus Abb. 52 zu ersehen ist und die beiderseits in den Punkten  $D$  und  $G$  an den Kreisumfang anläuft, also dort, wo auch die ursprüngliche Welle  $U$  anschnidet.



Dringt die Welle  $U$  über den Säulenumfang hinaus (Abb. 53), so wird derjenige Wellenteil, welcher zwischen den von  $M$  aus gezogenen Tangenten  $MJ$  und  $MH$  liegt, zurückgeworfen. Der Rückwurf in  $A$  ist  $AB = AD - MA$ . In jedem anderen Punkt  $E$  ist er  $EF = MD - ME$ . In  $D$  und  $G$  geht die Rückwurfkurve tangential in die ursprüngliche Welle  $U$  über. Beide zusammen endigen hinter der Säule in gemeinsamen Kurven  $DK$  und  $GL$ , die sich entsprechend dem kreisförmigen Umriß der Säule aus dem von Fresnel weitergebildeten Huygensschen Gesetz als Kreisevolventen ergeben. Beim weiteren Fortschreiten der Welle  $U$  rücken sich die beiderseitigen Evolventen immer näher, bis sie sich schließlich überschneiden.

Der Bildstreifen mit dem bei runder Stütze sich ergebenden Wellenverlauf (Abb. 54, Taf. X) zeigt deutlich die ringförmigen Rückwürfe, welche sich hier noch klarer aussprechen als bei quadratischem Pfeiler (Abb. 50, Taf. VIII).

Vergleichen wir ganz allgemein die Erscheinungen am Pfeiler mit denjenigen an der Säule, so sehen wir, daß bei ersterem der einzelne Rückwurf sich genau wie bei unmittelbarer Fortpflanzung ausbreitet, so daß er also weder gesammelt noch stärker zerstreut wird. Die Strecke  $EF$  der Abb. 45 ist daher genau so lang, als wenn die Schallstrahlen  $AF$  und  $BE$  unmittelbar von einer Schallquelle  $M_1$  im geradlinigen Abstand  $AF + AM$  herkämen. Bei breiten Pfeilern sind demnach störende Schallstöße infolge von Rückwürfen nicht ausgeschlossen.

Bei der Säule dagegen werden die Schallstrahlen entsprechend der Umfangkrümmung stark auseinandergeworfen und es bestätigt sich damit der von Biehle gebrachte Hinweis, daß runde Stützen den Schall besser als quadratische zerstreuen<sup>1)</sup>. Das gleiche zeigt sich, wenn wir die Säule nicht allein für sich, sondern in einem bestimmt umgrenzten Raum betrachten (Abb. 55). Dabei seien die Flächen- und Stützenquerschnitte sowie die Lage des Erregungsmittelpunktes *M* genau so angenommen wie bei Abb. 49. Auch von der Säule werden Lücken in die von den geraden Wänden kommenden Rückwürfe gerissen, aber die so weggenommenen Wellenteile werden nicht etwa ungeändert nach bestimmter Richtung geworfen, wo sie als störender Widerhall empfunden werden könnten, sondern sie werden nach allen Seiten hin derart zerstreut, daß sie sich kaum noch bemerkbar machen. Bei der Säule wird demnach rascher als beim Pfeiler der Zustand erreicht, daß, wie Jäger<sup>2)</sup> sagt, der ganze Raum nach allen Richtungen hin von Schallstrahlen gleichmäßig durchzogen ist. Demgemäß muß aber ein damit entstehender Nachhall um so rascher verklingen.

Wie eine Wand nur dann einen Schall zurückwerfen kann, wenn sie bedeutende Abmessungen gegenüber der Wellenlänge des Schalls<sup>3)</sup> besitzt, so ist bei Stützen nur dann ein nennenswerter Rückwurf möglich, wenn sie nicht sehr dünn sind. Wir sehen ja auch, daß eine große Meereswoge sich durch einen feststehenden Pfahl nicht in ihrem Verlauf stören läßt, sondern an diesem vorbeigeht, und daß die an ihm erzeugten kleinen Wirbelungen und Rückwürfe im Verhältnis zur großen Woge kaum zu merken sind. Dies schließt allerdings nicht aus, daß durch Addition von Einzelrückwürfen eine Wandwirkung zustande kommt, wenn Stützen dicht hintereinander stehen und in schräger Richtung vom Schall getroffen werden, wie dies in Säulenbasiliken der Fall sein kann.

Wünschenswert wären immerhin genaue Untersuchungen über die Mindestgröße, welche eine Fläche haben muß, um einen Widerhall zu ergeben<sup>4)</sup>. Hierbei kommt es einmal auf das absolute Größenmaß, dann aber vor allem auf die Winkelgröße an.

**Flächenbehandlung.** Eine für die Baupraxis sehr wichtige Frage ist die, wie sich die Schallwellen je nach der Rauigkeit der Fläche, auf die sie treffen, verhalten. Um darüber Aufschluß zu bekommen, wurden in den Rechteckrahmen des Wellenapparates nacheinander verschiedene Leisten eingelegt, und zwar zuerst eine einfache glatte Holzleiste, dann eine solche mit ziemlich weichem Bürstenbesatz und schließlich drei gezahnte Leisten, bei denen die Seitenlänge der rechtwinklig geschnittenen Zähne 1 cm, 2 cm und 4 cm betrug. Bei den danach aufgenommenen Bildern liegen diese Leisten gegenüber dem links zu denkenden Wellenmittelpunkt, also am Rande rechts. Am oberen und unteren Rande treten keine Rückwürfe auf, weil die Wasserfläche hier noch weiterläuft und nur der beobachtete mittlere Teil derselben auf dem Bilde sichtbar wird.

Die glatte Leiste ergab einen Rückwurf gleicher Art wie bei der schon besprochenen geraden Wand (Abb. 56, Taf. XI). Er durchkreuzt sich sehr bald mit der vom linksliegenden Rahmenrand kommenden Rückwurfelle. Etwas unsicher wurde die Linie bei der mit Bürsten besetzten, also schon nicht mehr haarscharf geraden und daher vielfach zu Teilrückwürfen führenden Kante (Abb. 57, Taf. XI). Die Zahnleisten erbrachten verschiedene Bilder je nach der Größe der Zahnung. Bei der feinsten Zahnleiste ist nämlich die Zahnlänge etwas kleiner als die Wellenlänge; bei der mittleren stimmt beides ungefähr überein, während bei der derbsten Leiste die Zahnlänge überwiegt. Und danach richtet sich auch die Wirkung der Zahnung auf die Welle. Indem nämlich die letztere über die feinste Zahnung sozusagen noch hingeleitet, erzeugt sie einen Rückwurf, der zwar in stärkerem Maße als bei der

<sup>1)</sup> Biehle, Kirchenbau und Glockenkunde, S. 85. Wittenberg, A. Ziemsen, 1913.

<sup>2)</sup> Sitz.-Ber. d. Wien. Akad. 1911, Bd. 120, Abt. II a, S. 613.

<sup>3)</sup> Winkelmann, Handb. d. Physik, Bd. 2, Akustik, 2. Aufl., S. 95 u. 564. Leipzig, J. A. Barth, 1909.

<sup>4)</sup> Zentralbl. d. Bauverw. 1894, S. 364.

Bürstenleiste viele kleine Teilrückwürfe enthält, im ganzen aber doch noch eine dem Rückwurf der glatten Wand entsprechende Gestalt zeigt (Abb. 58, Taf. XII). Schon mehr verwischt sich dieses Bild bei der mittleren Zahnleiste (Abb. 59, Taf. XII). An der derbsten Zahnleiste aber findet die Welle so große Zahnabmessungen, daß sie stückweise ganz kräftig zurückgeworfen wird. Diese zahlreichen Einzelrückwürfe durchkreuzen sich vielfach in ihrer weiteren Entwicklung, wobei sie sich gegenseitig derart schwächen, daß keine scharf ausgesprochene Gesamtrückwurfswelle mehr zustande kommt, sondern nur ein Gewirr von wild durcheinanderlaufenden Einzelwellen, die sich sehr bald in nichts auflösen (Abb. 60, Taf. XIII). Besonders deutlich werden diese Verhältnisse, wenn man gleichzeitige Aufnahmen der Abb. 56 bis 60 untereinander vergleicht und dabei auch die Gestalt des vom glatten Rand links herkommenden Rückwurfes beachtet.

Nach alledem darf man nur dann darauf rechnen, durch entsprechende Flächenbehandlung der zurückwerfenden Wand Schallwellen zu zerstreuen, wenn die Größe der Unebenheiten in Beziehung zur Wellenlänge steht. Da die letztere aber beim Schall erheblich ist, so kann, wie schon Sturmhoefel<sup>1)</sup> ausgesprochen hat, nur von großzügigen architektonischen Gliederungen, nur von den großen Formen der Einzelzeichnung ein Erfolg erwartet werden. In dieser Hinsicht sind die von Orth<sup>2)</sup> zur Ablenkung ungünstiger Wellen vorgeschlagenen stufenförmigen Wandgliederungen bei ihrem kleinen Maßstab nicht ausreichend. Schon eher dürften seine schirmartigen Deflektoren und neuerdings die oben erwähnten Zapfenringe, mit denen die Kuppelfläche des Großen Schauspielhauses in Berlin besetzt wurde, ihren Zweck erfüllen (Abb. 30, Taf. VI). Keinen Unterschied macht es aber für den Verlauf und die Gestalt eines Rückwurfs, ob eine Fläche mit rauhem oder glattem Putz versehen ist, wie es ja auch bei einer Meereswooge belanglos ist, ob wir eine Ufermauer glatt scharrieren oder ganz derb mit dem Zweispitz bearbeiten. Damit erklärt es sich, daß in der Stadthalle von Hannover ein sehr grober Korkputz die aus der Kuppelform sich ergebenden Rückwürfe nicht zu zerstreuen vermochte, sondern höchstensfalls vermöge der Eigenschaften des Korkstoffes selbst, nicht etwa infolge der erzeugten derben Flächenkörnung, etwas in der Stärke dämpfte. Rückwurf und Dämpfung sind aber ihrem Wesen nach streng auseinanderzuhalten und es wird über die letztere späterhin noch einiges zu sagen sein. Hier handelt es sich nur um den Rückwurf und wir werden bei diesem immer wieder darauf hingeführt, daß für sein Entstehen und Verlaufen nicht die landläufige Flächenbehandlung maßgebend ist, sondern die große Einzelform, vor allem aber die Raumgestalt, also die Form der Umfassungswände, der Decke und des glatten oder mit Gestühl besetzten, gegebenenfalls auch amphitheatralisch ansteigenden Fußbodens. Bereits Weinbrenner hat dies sehr deutlich erkannt und in den Jahren 1807 bis 1808 beim Bau des Hoftheaters in Karlsruhe beachtet, worüber er schreibt<sup>3)</sup>:

„Bey Verzierung des Auditoriums habe ich vorzüglich darauf gesehen, dass ich für den Vortheil des Tones alle architektonischen Glieder, welche nicht unmittelbar zu der Hauptsache und für die Solidität des Ganzen gehören, wegliess, und den nöthigen Gliedern eine Profilirung gab, an welchen der Ton sich ableiten kann, ohne in und zwischen denselben stecken zu bleiben.“ — „Das Carlsruher Theater hat einzig durch seine Bauart und durch die sorgfältigste Aufmerksamkeit auf jede Kleinigkeit, welche die Vibration des Tones vermehren und solchen reflectiren kann, den großen Vortheil erhalten, dass darin selbst ein Pistolenschuss nicht den geringsten Nachhall zur Folge hat. Dennoch ist auch der gemässigte Ton auf jeder Stelle des Auditoriums vernehmbar.“

<sup>1)</sup> A. Sturmhoefel, Akustik des Baumeisters, S. 52. Berlin, Schuster & Bufe, 1894.

<sup>2)</sup> Haarmanns Zeitschr. f. Bauhandwerker 1874, S. 30 u. 1881, S. 50. — Deutsche Bauztg. 1881, S. 9. — Wochenbl. f. Archit. u. Ing. 1881, S. 160.

<sup>3)</sup> A. Valdenaire, Friedrich Weinbrenner, S. 189. Karlsruhe, Müllersche Hofbuchhandlung, 1919.

**Sonstige Gesichtspunkte.** Soweit von Rückwürfen bis jetzt die Rede war, ist immer vorausgesetzt worden, daß die Wellen sich in geradlinigen Strahlen durch die Luft fortsetzen. Dies trifft aber nicht immer zu, vielmehr ist festgestellt, daß Schallwellen durch Gasschichten von verschiedener Dichtigkeit und, was auf dasselbe hinauskommt, durch Luftschichten von verschiedener Temperatur infolge von Brechungen und Rückwürfen an den Schichtgrenzen abgelenkt und daher nur schwer oder überhaupt nicht durchgelassen werden und daß ihre Fortpflanzungsrichtung auch durch Luftströmungen stark beeinflußt wird.

Beobachtungen dieser Art wurden bereits in der mit Gas beleuchteten Alberthalle in London gemacht<sup>1)</sup> und neuerdings berichtet Biehle, daß in Kirchen mit axialer Stellung von Kanzel und Altar „die Wärme und der Rauch der brennenden Altarkerzen die Stimme des Redners ersticken“<sup>2)</sup>. Versuche darüber hat Jacques an der 92 Fuß langen und 65 Fuß breiten Halle des Massachusetts Institute of Technology in Boston und in der Baltimore Academy of Music angestellt<sup>3)</sup>. Auch Tyndall befaßte sich mit diesen Fragen, wobei er Schichten von Kohlen- säure und Leuchtgas wechselnd hintereinander schaltete. Ferner benutzte er eine Anzahl von Platindrähten, welche elektrisch zum Glühen gebracht wurden, so daß aufsteigende erwärmte Luft- ströme entstanden<sup>4)</sup>.

Auf Grund ähnlicher Ergebnisse mit Reihen von Gasbrennern empfiehlt Watson, warme Strömungen zwischen Schallquelle und Hörer möglichst zu vermeiden und daher Heizkörper nur an den Wänden aufzustellen<sup>5)</sup>. Die Lüftung müsse sich in großem, einheitlichem Strom vollziehen, unter Vermeidung aller Teilströmungen, da solche viele Grenzen mit eigenen Rückwurfs- und Beugungs- wirkungen besitzen und daher akustisch zu gleichen Erscheinungen führen, wie sie optisch als Flimmern in der Sonnenhitze auftreten.

Nach Blackall wird der Ton unklar, wenn die Schallwellen und die Luft sich in gleicher Richtung bewegen. Er hält es daher für das beste, wenn die Luft am Boden eingeführt und an der Decke abgesaugt wird, so daß sie rechtwinklig zu der von der Quelle zum Hörer gehenden Hauptrichtung des Schalls strömt<sup>6)</sup>.

Im Gegensatz zu den Vorgenannten hält Sabine die Einwirkung von Heizung und Lüftung für unerheblich. Er meint aber, man könne sie immerhin in der Weise nutzbar machen, daß man durch sie gewissermaßen die Schallfront vorwärts neige und damit den Schall in günstiger Richtung auf die Zuhörer leite. Dies sei möglich, wenn man die Luft veranlasse, von vorn nach hinten, und zwar stärker an der Decke als am Fußboden zu strömen und dadurch den oberen Teil der Schallwelle vorwärts zu treiben oder sich von hinten nach vorn, und zwar stärker am Fußboden als an der Decke zu bewegen, also den unteren Teil der Schallwelle zu verzögern<sup>7)</sup>.

**Praktische Fälle.** Die bisher besprochenen Grundsätze lassen sich ohne Schwierigkeit auf die Untersuchung großer Räume anwenden und sie sind darüber hinaus auch schon in praktischen Fällen nutzbar gemacht worden.

<sup>1)</sup> Engineering, Bd. 28, S. 399, 1879.

<sup>2)</sup> Die Kirche 1916, S. 120.

<sup>3)</sup> Philos. Magazine (5), Bd. 7, S. 111.

<sup>4)</sup> Tyndall, Der Schall, Deutsche Ausgabe von A. v. Helmholtz u. Cl. Wiedemann, 3. Aufl., S. 369. Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1897. — Müller-Pouillet, Lehrb. d. Physik u. Meteorologie, Bd. 1, 2. Abt., 10. Aufl., S. 585 (herausgeg. von Pfaundler). Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1906.

<sup>5)</sup> Eng. Record 1913, Bd. 67, S. 265.

<sup>6)</sup> Ebenda 1902, Bd. 45, S. 541.

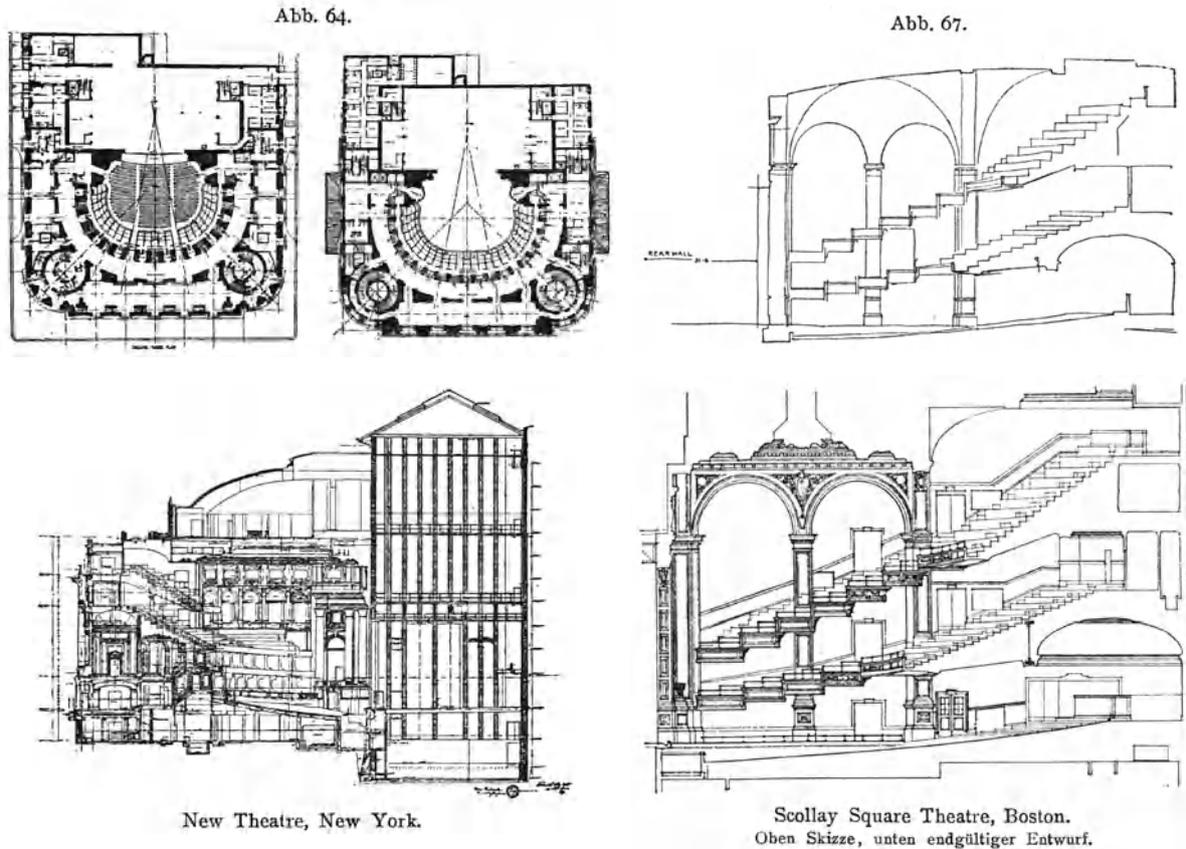
<sup>7)</sup> Ebenda 1910, Bd. 61, S. 779.





Beurteilung vollkommen, da sich schon eine Verzögerung um  $\frac{1}{10}$  Sekunde aus einem Umweg von 23 bis 34 m in Echoerscheinungen bemerkbar macht, wie bereits weiter oben (S. 8) dargelegt ist.

In Weiterführung der schon erwähnten früheren Versuche hat Sabine neuerdings den Verlauf von Luftwellen noch eingehender beobachtet<sup>1)</sup>. Er benutzte dabei Schablonen, die nach den Grundriß- oder Schnittzeichnungen des zu untersuchenden Raumes angefertigt waren und in denen er durch elektrische Entladung an einer der Schallquelle im Saal entsprechenden Stelle eine Luftwelle hervorrief. Diese wurde mit Hilfe der Toepferschen Schlierenmethode photographisch aufgenommen. Auf diese Weise ergaben sich für das Neue Theater in New York, dessen geometrische Zeichnung



in Abb. 64 gebracht wird, die in Abb. 65 (Taf. XIV) wiedergegebenen Grundrißaufnahmen, in denen die Entstehung und der Gang der wichtigsten Rückwürfe verfolgt werden können. Ebenso zeigt der Schnitt (Abb. 66 links, Taf. XIV) den Verlauf der Wellen, und zwar erkennt man, daß vom Deckenfeld und vom Proszeniumsgesims kräftige Rückwürfe ausgehen, welche die Galerien und das Parkett treffen. Dies gab Veranlassung, im folgenden Sommer ein Schirmdach einzubauen, durch das, wie die zweite Bilderreihe zeigt, die störenden Rückwürfe großenteils beseitigt oder wenigstens geschwächt wurden (Abb. 66 rechts). Sabine macht darauf aufmerksam, daß in allen diesen Bildern die Linien der Rückwurfwellen länger sind, als man nach geometrischer Aufzeichnung erwarten sollte, und daß sie selbst da bogenförmig auslaufen, wo sie von ebenen Flächen, z. B. vom Deckenfeld herrühren. Diese Erscheinung zeigt sich um so stärker, je kleiner das zurückwerfende Hindernis

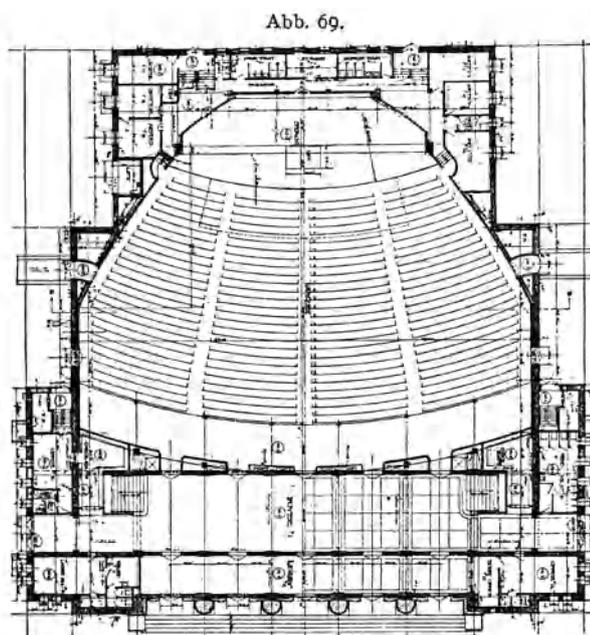
<sup>1)</sup> The American Architect, Bd. 104, S. 257, 31. Dez. 1913.

und je länger die Wellenlinie ist. Wir erkennen darin das schon früher besprochene Auslaufen in Huygenssche Bögen.

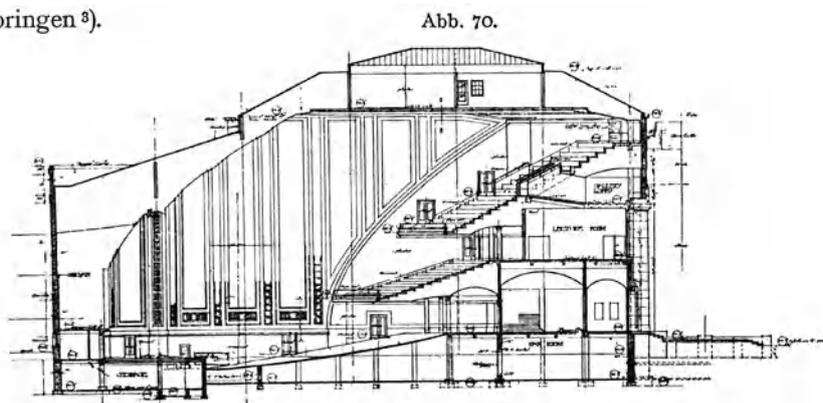
Eine wertvolle praktische Anwendung fanden die Sabineschen Studien beim Neubau des Scollay Square Theatre in Boston<sup>1)</sup>. Zunächst wurden an Hand einer architektonischen Vorskizze einige Schallaufnahmen der vorstehend beschriebenen Art gemacht. Da diese aber ungünstige Rückwürfe erkennen ließen, wurde der endgültige Entwurf nach einer etwas geänderten Gestalt ausgearbeitet und es kam dadurch ein erheblich günstigeres Schallbild zustande (Abb. 67 u. 68, Taf. XIV).

Als weiteres Beispiel für eine Raumgestaltung nach Gesichtspunkten der Hörsamkeit mag die Hill Memorial Hall der Universität von Michigan (Abb. 69, 70 u. 71, Taf. XV)<sup>2)</sup> genannt sein. Bei dieser gehen Wand und Decke als einheitliche paraboloidische Fläche ineinander über und es entstehen infolgedessen nur einmalige Rückwürfe. Damit wird verhindert, daß Schallwellen mit längerem Umweg beim Hörer eintreffen, also Nachhall oder Echo ergeben. Es entspricht dies dem Vorschlag von Winkelmann, Säle nach einem Rotationsparaboloid zu gestalten und die Schallquelle möglichst in den Brennpunkt zu bringen<sup>3)</sup>. Eine sphärische Welle wird dabei als ebene Welle zurückgeworfen, wie dies auch die Photographien von Foley und Souder zeigen (Abb. 72, Taf. XV)<sup>4)</sup>.

Bei dem schon auf S. 20 u. 30 erwähnten Großen Schauspielhaus in Berlin (Abb. 30, Taf. VI u. 31)<sup>5)</sup> ergab eine von Biehle vorgenommene Durchprüfung der ersten Baupläne, daß ein danach ausgeführter Raum für seine Zwecke unbrauchbar sein würde, daß „eine bedingungsweise Brauchbarkeit nur durch besondere Formgebung der Kuppelwölbung in bestimmten Profilen, und eine völlige Brauchbarkeit



Hill Memorial Hall, Michigan.



Hill Memorial Hall, Michigan.

<sup>1)</sup> The American Architect, Bd. 104, S. 257, 31. Dez. 1913.

<sup>2)</sup> Ebenda, Bd. 104, S. 49, 6. Aug. 1913.

<sup>3)</sup> Winkelmann, Handb. d. Physik, Bd. 2, Akustik, 2. Aufl., S. 581. Leipzig, J. A. Barth, 1909.

<sup>4)</sup> Scientif. American. Suppl., Bd. 75, S. 100, Phot. 19 u. 20, Febr. 1913.

<sup>5)</sup> Wochenschr. d. Archit.-Ver. zu Berlin 1919, S. 228 u. 238. — Zentralbl. d. Bauverw. 1919, S. 617.

bei durchgreifender Umgestaltung des Planes zu erreichen sei“. Nunmehr wurden die Zeichnungen neu bearbeitet und der Erfolg hat die Mühe gelohnt.

Biehle hat auch den Lichthof der Technischen Hochschule in Charlottenburg auf seine Eignung und Einrichtbarkeit für die Zwecke von festlichen Veranstaltungen untersucht <sup>1)</sup>).

Wie wir gesehen haben, spielt der Rückwurf von Schallwellen eine ganz besonders wichtige Rolle hinsichtlich der Hörsamkeit eines großen Raumes. Er bringt ja auch die sinnfälligste Störung bei einem rednerischen oder musikalischen Vortrag mit sich und es ist daher nicht zu verwundern, daß sich gerade mit ihm das Schrifttum wie auch die ausführenden Architekten in weitgehendem Maße beschäftigt haben. Besonders die Baumeister von Kirchen- und Saalbauten waren seit jeher gezwungen, den Hörsamkeitsfragen besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden und dies hat zu einer Fülle von Einzelbeobachtungen und daraus abgeleiteten Erfahrungsregeln geführt, z. B. daß schon beim Entwurf eines Kirchenraumes die Beziehung der Sitzplatzzahl zum Rauminhalt berücksichtigt werden müsse und daß von vornherein Hörsamkeitsschwierigkeiten zu erwarten seien, sobald auf einen Platz mehr als 8 cbm Raum kämen <sup>2)</sup>).

Die wichtigsten hier in Betracht kommenden Gebäudegattungen sind die Kirchen, die Theater und die Vortrags- und Musiksäle. Allen diesen ist gemeinsam, daß die Rückwürfe dort, wo sie die Stimme des Redners oder den Ton des Musikinstrumentes zu verstärken vermögen, auf jede Weise gefördert werden müssen. Hierbei kann, wie schon weiter oben bemerkt, grundsätzlich davon ausgegangen werden, daß der zurückgeworfene Schall äußersten Falles 17m Umweg oder eine Verzögerung von  $\frac{1}{20}$  Sekunde gegen den unmittelbaren Schall aufweisen darf, ohne daß eine schädigende Wirkung zu befürchten ist. Wir müssen also innerhalb dieser Grenze eines jeden Rückwurfschalles habhaft zu werden suchen und ihn möglichst ungeschwächt dem ursprünglichen Schall zur Unterstützung nachsenden. Es empfiehlt sich daher, bei Kirchen hinter dem Prediger eine glatte harte Rückwurfwand vorzusehen. Auch Schalldeckel können bei genügender Größe und geeigneter Gestalt recht vorteilhaft sein, indem sie eine gewisse Schallmenge, die sonst nach oben dringen und dort ungünstigen Widerhall hervorrufen würde, nach vorn wenden und damit nicht nur die Gesamtheit des Widerhalles vermindern, sondern auch den Schall der unmittelbaren Rede verstärken. Ihrer sachgemäßen Ausbildung wird daher besondere Sorgfalt zuzuwenden sein. Die gelegentlich gegen die Schalldeckel erhobenen schönheitlichen Einwendungen <sup>3)</sup> dürften nicht ausreichen, um entgegen der Zweckmäßigkeit ihre Weglassung zu rechtfertigen, zumal wir viele mustergültige Ausführungen besitzen. Man denke auch an die künstlerische Durchbildung im belgischen Kirchenbau. Daß in dem 1842 abgebrannten Hamburger Rathaus ein Kronleuchter wie ein Schalldeckel wirkte, berichtet Hübbe <sup>4)</sup>).

Eine hinter der Schallquelle befindliche Rückwurfwand kann auch anderwärts, nicht nur in Kirchen sehr nützlich sein. So beruht die anerkannt gute Hörsamkeit des antiken Theaters zum großen Teil auf der Rückwurfkraft des massiven Scena-Aufbaues. Ganz in diesem Sinne ist im Konzerthaus-Saal in Hannover die Rückwand des Musikpodiums mit großen Spiegeln belegt, welche die auf sie treffenden Schallwellen zurückwerfen und damit den musikalischen Ton verstärken. Inwieweit dabei der architektonische Gesichtspunkt mitspielt, daß dem Auge scheinbar eine Raumvergrößerung geboten werden soll, ist eine Sache für sich. Vorteilhaft ist es, wenn sich auch möglichst dicht hinter dem Hörer eine zurückwerfende Fläche befindet. Hat nämlich der unmittelbare Schall durch große Entfernung von seiner Quelle schon erheblich an Stärke eingebüßt, so findet er z. B. an

<sup>1)</sup> Das Schulhaus 1918, S. 58.

<sup>2)</sup> Biehle, Kirchenbau und Glockenkunde, S. 88. Wittenberg, A. Ziemsen, 1913.

<sup>3)</sup> Handb. d. Arch., 4. Tl., 8. Halbbd., Heft 1, S. 414, betr. Pauluskirche in Darmstadt-Bessungen. Stuttgart, A. Kröner, 1906.

<sup>4)</sup> Deutsche Bauztg. 1901, S. 291.

dem Rückwurf der amphitheatralisch ansteigenden massiven Sitzreihen des antiken Theaters eine vorteilhafte Ergänzung. In gleicher Weise erklärt sich die von H. Pfeifer in der Aula der Technischen Hochschule in Braunschweig gemachte Beobachtung, daß eine Rede besser zu verstehen war, wenn der Hörer sich an der Rückwand des Saales befand und dort außer dem unmittelbaren Schall noch den Rückwurf dieser Wand erhielt, als wenn er sich in der Mitte des Raumes aufhielt, wo die verschiedenen Schallwellen sich weniger günstig überdeckten. Ob die in manchen Schlössern, z. B. in der Einfahrtshalle der Würzburger Residenz sich findenden starken Echobildungen eine zufällige Erscheinung des Entwurfes und der Bauausführung oder als „Barockscherz“ das Ergebnis zielbewußter Überlegung darstellen, mag dahingestellt sein.

In klarer Erkenntnis der den ansteigenden Sitzreihen zukommenden Vorzüge äußerte sich bereits Weinbrenner in der „Leipziger Abendzeitung“ (Jahrgang 1817, Nr. 144) anlässlich seines Theaterumbaus in Leipzig wie folgt<sup>1)</sup>:

„Ich kann, was die innere Construction eines Theaters betrifft, mit Gewissheit darthun, dass für die gehörige Vernehmung der Töne, so wie für das bequeme Sehen, das Auditorium keine andere als die reine Cirkelform in der Grundlage erhalten und die Plätze der Zuschauer amphitheatralisch über einander abwechselnd mit Logen und Gallerien angelegt werden sollten, damit sich die Tonstrahlen gleichzeitig im Innern verbreiten und die Grundtöne durch die von der Decke und den Seitenwänden reflectirenden verstärkt werden, ohne dass sie zurückfallen und eine Art Echo oder Gesumse hervorbringen.“

Ebenso haben Rhode, Langhans und Daly, dann später Davioud und Bourdais mit ihrem Entwurf zu einem 10000 bis 15000 Zuhörer fassenden Volksopernhaus für Paris<sup>2)</sup>, vorgeschlagen, den Zuschauerraum nach dem mittleren, fächerförmig sich verbreiternden Teil des antiken Theaters zu gestalten. Richard Wagner hat diesen Gedanken im Festspielhaus in Bayreuth<sup>3)</sup> verwirklicht und das Prinzregenten-Theater in München<sup>4)</sup> sowie das Schillertheater in Berlin<sup>5)</sup> sind ihm gefolgt. Bei allen diesen Anlagen werden die von der Bühne ausgehenden Schallwellen an den Flächen des Zuschauerraumes durch Rückwurf so weitergeleitet, daß sie überall den unmittelbaren Schall unterstützen und damit den durch die Entfernung sich ergebenden Stärkeverlust desselben zum größten Teil wieder ausgleichen. Es versteht sich danach von selbst, daß für die Theater auch die Deckenbildung sehr wichtig ist. Sie muß so gewählt werden, daß die Schallwellen im vorderen Teil durch eine sehr kräftige Gliederung und eine sachgemäße Flächengestaltung zerstreut werden und keine störenden, hinterherschleppenden Rückwürfe nach unten ergeben. In ihrem letzten Drittel dagegen kann die Decke eben bleiben, weil die von hier ausgehenden Rückwürfe ohne großen Umweg auf die oberen und entfernteren Sitzreihen strömen und dort dem unmittelbaren Schall zu Hilfe kommen. Auch dies weist auf die Bedeutung einer sachgemäßen Formgebung hin. Letztere muß aber, wie schon weiter oben betont, großzügiger Art sein, wenn man sich eine tatsächliche Einwirkung auf die Schallwellen von ihr versprechen will.

Ganz folgerichtig ist daher Littmann beim Bau des Prinzregenten-Theaters in München vorgegangen: „Durch ein weit ausladendes, an jeder Säule sich verkröpfendes Gebälk, durch die freistehenden Säulen, welche Vasen tragen, durch die rückspringenden Nischen mit einem derben rauhen Putz, durch die in sie hineingestellten Figuren und durch reiche Stoffbespannung und Auf-

<sup>1)</sup> A. Valdenaire, Friedrich Weinbrenner, S. 203. Karlsruhe, Müllersche Hofbuchhandlung, 1919.

<sup>2)</sup> Deutsche Bauztg. 1876, S. 343.

<sup>3)</sup> Ebenda 1875, S. 1.

<sup>4)</sup> Handb. d. Arch., 3. Tl., 6. Bd., 3. Aufl., S. 72 u. 73. Stuttgart, Arnold Bergsträsser, 1904. — Deutsche Bauztg. 1901, S. 408 u. 417 mit Tafel.

<sup>5)</sup> Deutsche Bauztg. 1901, S. 4, 29 mit Tafel u. 41.

hängung von Gardinen in den Logen der Rückwand, sowie durch die völlig wagerecht durchgebildete und durch stark vertretende Gurte unterbrochene Decke hofften wir jene Forderungen zu erfüllen, welche die wohl nie in starre Regeln zu bindenden Lehren der Akustik an den Theaterbau stellen<sup>1)</sup>.

Daß die Sitzreihen nicht geradlinig, sondern mit wachsender Überhöhung, also in Kurve ansteigen müssen, um möglichst viele günstige Rückwürfe aufzunehmen, ist ein weiterer für den Architekten bedeutsamer Gesichtspunkt<sup>2)</sup>. Ebenso wird bei Konzert- und Versammlungsräumen die Höherlegung der Seitenplätze, wie sie im großen Saal der Philharmonie in Berlin und in der Festhalle in Karlsruhe<sup>3)</sup> durchgeführt ist, als vorteilhaft empfunden.

Auf die für Kirchen so wichtige Frage der günstigsten Kanzelstellung hier näher einzugehen, würde uns zu weit führen, zumal sie abschließend nur von Fall zu Fall im Zusammenhang mit den einschlägigen architektonischen Gesichtspunkten behandelt werden kann.

### Resonanz.

Wir haben bisher den Verlauf von Schallwellen betrachtet, die von einem Erregungspunkt ausgehend sich nach allen Seiten hin radial fortpflanzen, bis sie auf Raumumschließungen oder Einbauten irgendwelcher Art treffen, von diesen zurückgeworfen auf neue Hindernisse stoßen usf., oder anders gesagt, wir haben die Erscheinungen des Rückwurfes oder der Reflexion verfolgt.

Eine zweite Art von Schallerscheinungen, die wir bei Beurteilung der Hörsamkeit eines Saales zu beachten haben, wenn sie auch in ihrer Bedeutung gegenüber den Rückwürfen zurücktreten, sind die Resonanzen oder Mitschwingungen, welche dadurch zustande kommen, daß ein Körper Schwingungen aufnimmt, die er selbst auszuführen, womöglich sogar auszusenden vermag<sup>4)</sup>. Die Resonanzen helfen den Ton zu verstärken, zugleich aber auch etwas zu dehnen und dadurch weicher und voller zu machen. Sie können sich zunächst einmal in der Weise ergeben, daß die Raumluft des Saales durch irgend einen Ton in Eigenschwingungen versetzt wird und damit diesen verstärkt. Was für ein Ton eine solche Wirkung haben mag, hängt von den Raumverhältnissen ab, derart, daß im allgemeinen jeder nicht gar zu große Raum auf einen ganz bestimmten Ton besonders stark anspricht; dieser liegt um so höher, je kleiner der Raum ist<sup>5)</sup>. Da hierbei außer dem Grundton auch die Obertöne eine Rolle spielen, wäre es eine dankbare Aufgabe für die physikalische Forschung, den bereits von Eichhorn behaupteten, aber von anderer Seite wieder als „phantastischer Spuk“ scharf bestrittenen Zusammenhängen zwischen musikalischem Klang und Raumverhältnis und ihrem Einfluß auf die Hörsamkeit nachzuspüren<sup>6)</sup>. In dem schon durch seine Abmessungen bedeutsamen Kuppelsaal der Stadthalle in Hannover ist, wie hier bemerkt sei, nach den Beobachtungen von Precht ein Eigenton nicht festzustellen.

Eine weitere Erscheinungsform von Resonanz ergibt sich, wenn die Schallquelle, sei es nun ein Redner oder ein Musikinstrument, infolge unmittelbarer körperlicher Berührung Schallschwingungen in die Baumasse entsendet. Dort werden sie vermöge der guten Schalleitungsfähigkeit der meisten Baustoffe unter mehrfachem Hin- und Herwerfen im Innern der Wände, Balken usw. rasch weitergeführt und, wo sie an die Außenflächen derselben treten, wieder auf die Luft des Saales selbst oder

<sup>1)</sup> Deutsche Bauztg. 1901, S. 475.

<sup>2)</sup> Handb. d. Arch., 4. Tl., 1. Halbbd., 3. Aufl., S. 367. Stuttgart, Arnold Bergsträsser, 1904.

<sup>3)</sup> Handb. d. Arch., 4. Tl., 1. Halbbd., 3. Aufl., S. 345 u. 357. Stuttgart, Arnold Bergsträsser, 1904.

<sup>4)</sup> O. D. Chwolson, Lehrb. d. Physik, Bd. 2, 1. Abt., 2. Aufl., S. 107, herausgeg. v. G. Schmidt. Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1919.

<sup>5)</sup> University of Illinois Bulletin Nr. 73, S. 7.

<sup>6)</sup> A. Eichhorn, Der akustische Maßstab f. d. Projektbearb. großer Innenräume. Berlin, Schuster & Bufler, 1899.  
— Deutsche Bauztg. 1909, S. 98. — A. Sturmhoefel, Akustik d. Baumeisters, S. 70. Berlin, Schuster & Bufler, 1894.

auch anderer Räume, die in baulichem Zusammenhang mit ihm stehen, übertragen und damit hörbar gemacht. Tiefe Töne pflanzen sich dabei leichter fort als hohe, so daß z. B. beim Zusammenspiel mehrerer Instrumente die tiefen Begleittöne einer Baßgeige in entfernten Zimmern noch gehört werden, wenn sonstige, höhere Töne nicht mehr durchdringen<sup>1)</sup>.

Die erwähnte hohe Schallgeschwindigkeit in festen Stoffen beträgt, an Stäben gemessen, bei 10 bis 20°C für Eisen 5016 m, für Eichenholz 3381 bis 4316 m, für gebrannten Ton 3652 m in der Sekunde, ist also 10- bis 15mal größer als die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Luft, welche sich nur auf etwa 340 m in der Sekunde beläuft. Infolgedessen sind die Umwandlungen eines Saales nebst Musikpodium usw. fast augenblicklich nach dem Entstehen eines Schalles derart von Schwingungen durchzogen, daß sie solche nahezu gleichzeitig und einheitlich an den umschlossenen Luftraum abgeben, daß sie also in ganzer Ausdehnung als Wellenerreger wirken. Die so erzeugten Wellen kommen kaum später an das Ohr des Hörers als die unmittelbaren Wellen, vermögen also die letzteren sehr vorteilhaft zu verstärken.

Das Wellenbild einer derartigen Resonanz oder Mitschwingung ist vollkommen verschieden von dem eines Rückwurfs. Denn während der letztere von einem Punkt ausgehend sich radial nach allen Richtungen hin ausbreitet und daher kugelförmige Wellen ergibt, lösen sich diejenigen Wellen, welche durch Mitschwingung der Saalumgrenzungen entstehen, von den letzteren als Parallelen zu ihnen ab und sie bleiben auch bei der weiteren Fortpflanzung zu ihnen parallel, etwa wie es Abb. 73 vom Spitzbogen und Abb. 74 (beide auf Taf. XV) von der Stadthalle in Hannover zeigen. Beide Aufnahmen sind mit dem obigen Wellenapparat so gewonnen, daß das Becken stoßartig erschüttert wurde, wobei am inneren Umriss der Einlageschablone Wellen entstanden, die sich allmählich in der freien Wasserfläche verliefen.

Schließlich kann Resonanz noch dadurch entstehen, daß die Umwandlungen des Raumes von der Energie unmittelbarer Schallwellen in Schwingungen versetzt werden, die sich wieder der Raumluft mitteilen.

Als körperliche Erschütterungen hat gewiß schon jedermann bei starkem Orgelspiel Resonanzschwingungen am Fußboden, an Gegenständen in der Hand usw. empfunden. Praktische Verwendung finden sie, wenn man ein Klavier auf einen breiten Unterbau aus Holz, also aus elastischem Stoff stellt, um die Tonschwingungen des Instrumentes auf einer großen Fläche möglichst ausgiebig an die Raumluft abzugeben und dadurch den Ton zu verstärken. Aus gleichem Grund erzeugt der große Resonanzkörper eines Cello oder einer Baßgeige kräftige Töne, besonders wenn er noch auf ein Holzpodium gestellt wird, während die frei getragene, verhältnismäßig kleine Violine an Klangfülle dagegen zurücktritt. Auf Resonanz beruht auch das Mitklingen eines Klaviers oder einer Harfe, sobald ein Instrument in der Nähe gespielt wird<sup>2)</sup>. Daß hölzerne Emporen die Hörsamkeit von Räumen günstig beeinflussen, ist bekannt. Inwieweit sich jedoch anteilig verstärkende Resonanz, Zerstreung von Schallwellen der Raumluft und abschwächende Dämpfung zu diesem Erfolg vereinigen, läßt sich nur vermuten; es wäre aber sehr zu wünschen, daß über diese Frage eingehende wissenschaftliche Untersuchungen Aufschluß geben würden. Hierbei könnte auch die vielumstrittene Frage der Vitruvschen Klanggefäße<sup>3)</sup> geklärt werden, in deren Sinn noch in den 70er Jahren Engert verstärkende Resonanzwirkungen mit Hilfe von Metallplatten hervorzurufen versuchte, wenn auch, wie es scheint, nicht mit besonderem Erfolg<sup>2)</sup>.

1) Sitzungsber. d. Wiener Akademie 1911, Bd. 120, Abt. IIa, S. 631. — Winkelmann, Handb. d. Physik, Bd. 2, Akustik, 2. Aufl., S. 545 u. 546. Leipzig, J. A. Barth, 1909.

2) Engineering, Bd. 28, S. 399, 1879.

3) Vitruv, De Architectura, Lib. 5, C. 5.

Mitschwingungen der Saalkonstruktion sind in erster Linie bei elastischen und stark gespannten Bauteilen, etwa schwer belasteten Stützen und dünnwandigen Platten zu erwarten, wie sie vor allem im Holz- und Eisenbetonbau vorkommen. Das Holz vermag außerdem die hohen Töne und Geräusche stärker als die Töne des musikalischen Bereiches zu dämpfen und ist daher gerade für die Herstellung und Auskleidung von Musik- und Vortragsräumen besonders geeignet. Dementsprechend ist im Tabernakel der Mormonen in Salt Lake City, einem 50 m breiten und 83 m langen Saal mit Holzgewölbe<sup>1)</sup>, dann auch in der Festhalle in Karlsruhe, bei der nur die Außenmauern massiv, das innere Stabwerk, die Galerien, sowie Decke und Dach aus Holz hergestellt wurden, die Hörsamkeit ganz vorzüglich ausgefallen<sup>2)</sup>, und gleiches gilt von dem großen Saal der Flora in Charlottenburg<sup>3)</sup>, wo die Holzdecke nicht nur mitschwingt, sondern überdies durch ihre sichtbare Konstruktion die Rückwürfe kräftig zu zerstreuen hilft. Andererseits können Resonanzen auch störend wirken, vor allem, indem sie dem Schall eine besondere Klangfarbe mitteilen. Unger berichtet in diesem Sinne von einem Fall, wo eine über einem Saal freischwebend angebrachte Rabitzdecke als Ursache stärkster Resonanz und dadurch bewirkter schlechter Hörsamkeit erkannt wurde<sup>4)</sup>. Man wird sich demnach bei Decken aus Rabitz oder Eisenbeton stets zu überlegen haben, ob man von der bei diesen dünnwandigen Konstruktionen zu erwartenden Resonanz einen günstigen oder ungünstigen Einfluß auf die Hörsamkeit zu gewärtigen habe. Dazu kommt, daß bei der harten Oberfläche solcher Decken eine an sich förderliche Resonanz unter Umständen durch die schädigende Wirkung kräftiger Rückwürfe überwogen wird, wie dies bei der Monierdecke der Festhalle in Mannheim der Fall zu sein scheint.

Die einst berühmte Hörsamkeit des alten Gewandhaussaales in Leipzig ist hauptsächlich auf die günstige Resonanzwirkung zurückzuführen, welche dadurch entstand, daß der Saal als Holzkasten aus Fachwerk mit beiderseitiger Bretterverkleidung in den Massivbau des alten Zeughauses hineingesetzt worden war. Ferner waren die Fußbodenbalken auf die Balken des Erdgeschosses und diese wieder auf den Fußboden darunter abgestützt, so daß sie sämtlich wie Resonanzböden zum Mitschwingen gebracht wurden. Außerdem hatten die Holzwände des Saales den Dachstuhl zu tragen und sie wurden dadurch in so hohe Spannung versetzt, daß ihre Empfänglichkeit für Tonschwingungen sich noch ganz besonders steigerte<sup>5)</sup>. Beim Abbruch des Bauwerkes machte man auch sonstige wertvolle Beobachtungen, die in dem allerdings feuersicherer ausgeführten Neubau verwertet werden konnten. Demgemäß erhielten die Wände des Saales unten eine sichtbare Holzvertäfelung und oben eine frei vor dem Mauerwerk angebrachte verputzte Holzverschalung. Die Decke wurde aus Holz hergestellt, an das eiserne Dach angehängt und auf der Unterseite verputzt. Alle Verschalungen und Balkenlagen wurden so angeordnet, daß sich die Schwingungen des Orchester-Unterbaues hemmungslos auf die innere Schale des Saales zu übertragen vermögen und sich dort gleichmäßig verteilen. Sämtliche Umschließungsflächen können daher tonverstärkend mitschwingen, wie es bereits beim alten Saal der Fall gewesen war<sup>6)</sup>.

Noch enger als beim großen Saal konnte man sich baulich, auch in den Abmessungen, bei dem nur 26 m langen und 13 m breiten Kammermusiksaal des Neubaus an das Vorbild des alten Gewandhaussaales halten, so daß es möglich wurde, die Hörsamkeitsvorzüge des letzteren besonders ausgiebig wiederzugewinnen.

<sup>1)</sup> Journ. de phys., 4. Ser., Bd. 6, S. 101, 1907.

<sup>2)</sup> Handb. d. Arch., 4. Tl., 1. Halbbd., 3. Aufl., S. 359. Stuttgart, Arnold Bergsträsser, 1904.

<sup>3)</sup> Ebenda, S. 364.

<sup>4)</sup> Deutsche Bauztg. 1909, S. 98.

<sup>5)</sup> Zentralbl. d. Bauverw. 1895, S. 27.

<sup>6)</sup> Zeitschr. f. Bauwesen 1886, S. 7.

In der Hochschule für Musik in Berlin hat sich die dem Vorbild des alten Gewandhaussaals folgende Bauweise, die Decken und Wände aus Holz u. dgl. unabhängig von den Mauern einzubauen, sehr bewährt, indem sie zu reicher Resonanzbildung und damit zu guter Klangwirkung führte <sup>1)</sup>.

Im ganzen ergibt sich, daß wir imstande sind, durch bauliche Maßnahmen die Resonanzen weitgehend zu beeinflussen. Im einzelnen praktischen Fall müssen wir uns nur klarmachen, ob und wo Mitschwingungen wünschenswert sind. Wir können davon ausgehen, daß der Ton in der Nähe der Schallquelle durch Resonanz verstärkt werden muß und daß dieses so lange möglich ist, als die resonanzbildende Fläche für den Resonanzton nicht mehr als 17 m Umweg oder  $\frac{1}{20}$  Sekunde Zeitunterschied gegen den unmittelbaren Schall ergibt.

### Interferenz.

Die von einem Erregungsmittelpunkt ausgehenden Schwingungen haben, solange keine sonstigen äußeren Einwirkungen stattfinden, die Gestalt sich ausbreitender Kugelwellen. Treffen die Wellensysteme zweier verschiedener Erregungspunkte aufeinander, so durchschneiden sie sich und an den Kreuzungspunkten ergeben sich Interferenzen, d. h. die Amplituden oder Schwingungshöhen addieren sich algebraisch, wobei sie sich entweder verstärken oder tilgen. Am klarsten spricht sich dies dann aus, wenn es sich um Systeme von gleichen Wellenlängen handelt. Wo derartige Wellen sich in gleicher oder annähernd gleicher Richtung fortpflanzen, bilden sie bei der Interferenz ebenfalls fortschreitende Wellen, wobei die entstehenden Maxima und Minima auf Hyperboloidflächen weiterwandern <sup>2)</sup>. Wo aber Wellen von gleicher Länge sich entgegenlaufen, ergeben sich stehende Wellen, z. B. in der Mitte zwischen zwei Erregungspunkten oder, was dem Sinn nach auf dasselbe hinauskommt, wenn ausgehende Wellen auf ihnen entgegenkommende Rückwurfwellen stoßen. Einschlägige Vorgänge bemerken wir z. B. an der Spitze von Abb. 73 und auf Abb. 74 (beide auf Taf. XV).

Aus allgemeinen Betrachtungen dieser Art lassen sich manche auf Interferenz beruhende Schallerscheinungen leicht erklären. Erzeugt man nämlich in einem umschlossenen Raum einen Dauerton, so wird der Schall bei seiner großen Fortpflanzungsgeschwindigkeit schon in einer Sekunde so oft hin und her geworfen, daß alsbald der ganze Raum nach allen Richtungen hin gleichmäßig mit Schall erfüllt, also ein Stetigkeitszustand erreicht ist <sup>3)</sup>. Dadurch bildet sich ein ganz bestimmtes System von Interferenzen heraus, die sich in dem Saal als Stellen besonderer Lautheit oder verhältnismäßiger Stille bemerkbar machen. Über derartige Erscheinungen wurde z. B. bei Eröffnung des Theaters des Westens in Berlin geklagt. Daß sie tatsächlich auftreten können, hat Rayleigh bestätigt, indem er in einem Versuchsraum mit Hilfe eines Harmoniums und eines Resonators nachwies, daß an bestimmten Stellen ein Ton verschwand. In voller Stärke trat dieser aber auf, wenn eine Taste nur für einen Augenblick heruntergedrückt und dann sofort wieder losgelassen wurde, so daß die Zeit nicht ausreichte, um stehende Wellen und ein ausgesprochenes Interferenzsystem mit Schwächungen und Verstärkungen zu bilden <sup>4)</sup>.

In gleicher Richtung hat auch Sabine gearbeitet, wobei er einen rechteckigen Saal mit Bogendecke benutzte und die Schallquelle in der Mitte des Raumes anbrachte. Seine Messungs-

<sup>1)</sup> Deutsche Bauztg. 1905, S. 153.

<sup>2)</sup> van Schaik, Wellenlehre und Schall. Deutsche Ausgabe v. Prof. Dr. Fenkner, S. 79. Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1902.

<sup>3)</sup> Sitz.-Ber. d. Wiener Akad. 1911, Bd. 120, Abt. IIa, S. 613.

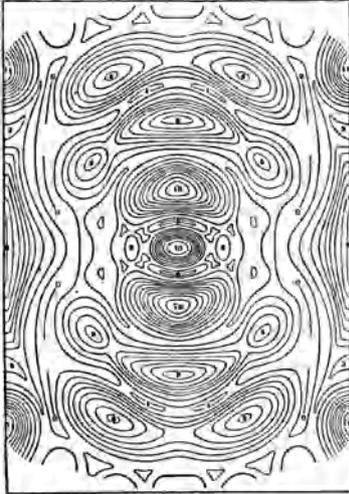
<sup>4)</sup> van Schaik, a. a. O., S. 141.

Michel, Hörsamkeit großer Räume.

ergebnisse trug er in den Grundriß als Stärkelinien ein, die gewissermaßen an die Höhenlinien des Feldmessers erinnern (Abb. 75)<sup>1)</sup>.

Auf Interferenz wird es neben physiologischen Ursachen zurückgeführt, wenn ein Chorvortrag von 300 Sängern nicht zehnmal, sondern nur um ein Geringes stärker klingt, als ein solcher von 30 Sängern<sup>2)</sup>.

Abb. 75.



Interferenzen in einem rechteckigen Saal mit Bogendecke. Schallquelle in der Mitte.

Von der Gestalt und Größe des Saales hängt es ab, welcher Art das sich bildende Interferenzsystem sein wird und bei welchen Tönen am ehesten Interferenzen erwartet werden dürfen. Wo verschiedene Töne auftreten oder, wie bei der menschlichen Stimme, ein Ton noch Obertöne besitzt, entstehen eigene Interferenzen für jeden Einzel- oder Teilton, so daß unter Umständen an Stellen, wo der eine Ton laut zu hören ist, ein anderer sich kaum bemerkbar macht und der Beobachter auf einem der Saalplätze den Grundton, auf einem anderen einen Oberton besonders deutlich vernimmt<sup>3)</sup>. Infolgedessen sind die Interferenzverhältnisse sehr verwickelt, sobald es sich um mehrere Schallquellen und wechselnde Töne handelt, wie dies bei musikalischen Darbietungen der Fall ist. Wenn aber noch Unger die Meinung ausspricht, man solle in bezug auf die Interferenzen lediglich einem gütigen Geschick vertrauen, da man sie doch nicht beherrschen könne, so wird sich ein solcher Standpunkt auf die Dauer nicht vertreten lassen. Dagegen wird man ihm darin beipflichten, daß gegenüber den sonstigen Einflüssen die schädigende Wirkung der Interferenzen keine erhebliche Bedeutung hinsichtlich der Hörsamkeit eines Raumes besitzt<sup>4)</sup>.

Ein Sonderfall der Interferenzen sind die Schwebungen, d. h. Stärkeschwankungen, Tonstöße, die durch Zusammenklingen zweier nahezu gleich hoher Töne entstehen.

<sup>1)</sup> Journ. of the Franklin Institute 1915, Bd. 179, S. 14.

<sup>2)</sup> Handb. d. Arch., 4. Tl., 1. Halbbd., 3. Aufl., S. 365. Stuttgart, Arnold Bergsträsser, 1904. — Weisbach, Bauakustik, S. 11. Berlin, Julius Springer, 1913.

<sup>3)</sup> Engin. Record, Bd. 41, S. 349.

<sup>4)</sup> Deutsche Bauztg. 1909, S. 98.

# Stärke der Schallwellen.

## Abnahme nach der Entfernung.

Nachdem wir im vorstehenden den Verlauf der Tonschwingungen kennen gelernt haben, fragt es sich noch, wie die Stärkeverhältnisse liegen, insbesondere in welchem Maße eine Schallwelle allmählich ausklingt.

Bei der Ausbreitung einer Kugelwelle im freien Raume verteilt sich der Schall auf eine immer größere Kugeloberfläche, und man muß daher, rein theoretisch betrachtet, erwarten, daß seine Stärke im Quadrat des Abstandes vom Erregungsmittelpunkt abnimmt. Eingehende Untersuchungen haben dies aber nicht immer bestätigt, was einerseits darauf zurückzuführen ist, daß der Schall sich nicht nur ausbreitet, sondern sich zum Teil auch in andere Energieformen, vor allem in Wärme umsetzt und daher rascher abnimmt als der wachsenden Kugeloberfläche entspricht. Zu derartigen Ergebnissen kam z. B. Allard<sup>1)</sup>; ebenso Duff<sup>2)</sup>, der vergleichsweise die geringsten Entfernungen feststellte, in denen der Ton von zwei und acht Pfeifen nicht mehr hörbar wurde. Andererseits vermögen Rückwürfe und Mitschwingungen den Ton einer Schallquelle ganz erheblich zu unterstützen, so daß der Eindruck entstehen kann, als ob die Tonstärke in geringerem Verhältnis als im Quadrat des Abstandes abnehme. Daraus erklärt es sich, daß Vierordt mit seinem Schallpendel eine Stärkeabnahme im einfachen linearen Verhältnis der Entfernung beobachtete<sup>3)</sup>, und daß Sieveking und Behm bei ihren Messungen auf einem Kasernenhof zwar Maxima und Minima, aber keine gesetzmäßige Abnahme feststellten<sup>4)</sup>. Die beiden letztgenannten geben selbst an, daß der benutzte Platz trotz seiner Größe von 10000 qm die schädigenden Einflüsse benachbarter Wandflächen nicht ausschalten können. Völlig einwandfreie Bedingungen ohne jeden Rückwurf werden sich allerdings kaum einmal schaffen lassen, es sei denn etwa, daß man Beobachter in Tragkörben unterbringt, welche mittels langer Seile an Luftballonen aufgehängt sind.

Man wird demnach eine Abnahme der Schallstärke im quadratischen Verhältnis der Entfernungen als das theoretisch richtige anzusehen haben, während für viele praktische Fälle eine geringere Abnahme, bis herab zum linearen Verhältnis, der Wirklichkeit näher kommt.

Für die bei den einschlägigen Untersuchungen vorzunehmenden Messungen ist eine lediglich relative Bestimmung nicht ausreichend, vielmehr müssen absolute Zahlenwerte gewonnen werden, die sich auf eine genau festgelegte Einheit beziehen. Die letztere darf aber nicht vom persönlichen Empfinden abhängig sein, und es ist daher eine „Reizschwelle“<sup>5)</sup> im allgemeinen nicht brauchbar,

<sup>1)</sup> Gesundheits-Ing. 1914, S. 189.

<sup>2)</sup> van Schaik, a. a. O., S. 130. — O. D. Chwolson, Lehrb. d. Physik, Bd. 2, 1. Abt., 2. Aufl., S. 24 (herausgeg. von G. Schmidt). Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1919.

<sup>3)</sup> A. Sturmhoefel, Akustik des Baumeisters, S. 26. Berlin, Schuster & Bufleb, 1894. — Winkelmann, Handb. d. Physik, Bd. 2, Akustik, 2. Aufl., S. 550. Leipzig, J. A. Barth, 1909.

<sup>4)</sup> Ann. d. Physik. 4. Folge, Bd. 15, Heft 1904, S. 807.

<sup>5)</sup> A. Sturmhoefel, Akustik des Baumeisters, S. 18. Berlin, Schuster & Bufleb, 1894.

weil sie bei jeder Person anders liegt und selbst bei ein und derselben Person zu verschiedenen Zeiten, wie auch bei längerer Dauer eines Versuches wechselnden Wert hat.

Die bisher vorgeschlagenen Meßverfahren sind so zahlreich, daß über sie auf die betreffenden Quellen verwiesen werden muß<sup>1)</sup>. Sie haben aber bisher leider noch keine handliche, einfache Vorrichtung gebracht, die gerade für praktische Versuche geeignet wäre, also leicht transportiert und rasch in Gebrauch genommen werden könnte, ohne die wünschenswerte Genauigkeit vermissen zu lassen. Meistens handelt es sich um feine Laboratoriumsversuche, die eine sehr empfindliche Einstellung und Handhabung erfordern, vielfach auch an örtliche Kraftquellen gebunden sind oder gar nur auf so geringe Entfernungen wirken, daß sie für bauliche Verhältnisse keinen Wert haben. Auch die Schwierigkeit, eine stets gleichmäßig ansprechende und gleichbleibende Schallquelle zu finden, ist nicht gering. Vielleicht bietet da die Elektronenröhre neue Möglichkeiten<sup>2)</sup>. Bis jetzt scheint am meisten noch der von Sabine angegebene Apparat, besonders in der von Precht verfeinerten Ausbildung, den Anforderungen der Praxis zu entsprechen<sup>3)</sup>.

Die der Entfernung, also dem Zeitverlauf seit Entstehung des Schalles, entsprechende Ausbreitung und dadurch bewirkte Stärkeabnahme läßt sich sehr gut mit Hilfe von zeichnerisch aufgetragenen Wellenbildern schätzen. Am einfachsten ist dies bei Schallwellen, die von einer ebenen Fläche wiederkehren. Etwas umständlicher wird die Ermittlung aber, wenn die zurückwerfende Fläche gekrümmt ist. Die Einfallslote sind dann nicht mehr parallel und es werden daher die Strahlen je nach der Art der Krümmung stärker oder schwächer gesammelt oder zerstreut, gelegentlich auch nach vorherigem Ineinanderlaufen erst im Weitergang über einen Brennpunkt hinaus verteilt (Abb. 15). Zur genaueren Beurteilung dieser Verhältnisse sei als Einheit eine Fläche von 1 qm in 10 m Entfernung vom Erregungsmittelpunkt angenommen.

Der dementsprechende Teil einer unmittelbaren oder von einer ebenen Wand zurückgeworfenen Kugelwelle breitet sich nach 30 m Weglänge auf eine Fläche von etwa  $3,16 \times 3,16$  m = rund 10 qm aus (Abb. 76), und es besitzt dann die Schallstärke nur noch  $\frac{1}{10}$  ihres in 10 m Abstand von der Schallquelle vorhandenen Wertes.

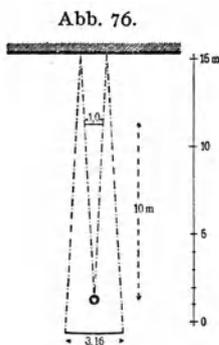


Abb. 76.  
Schallausbreitung bei Rückwurf von ebener Fläche.

Bringen wir an die Stelle der zurückwerfenden Ebene eine Kugelkalotte von Viertelkreis-Querschnitt, so wird dieselbe Welleneinheit bei gleicher Weglänge von 30 m in der Zeichenebene auf rund das 17fache, im Raum auf rund das 300fache zerstreut (Abb. 77). Ähnlich verhält sich der Rückwurf einer entsprechenden Hohlkalotte, nur daß hier die links auftreffenden Strahlen nach rechts zurückgeworfen werden und umgekehrt (Abb. 78).

Bei den zeichnerischen Rückwurfdarstellungen wird man sich daher nicht damit begnügen dürfen, lediglich festzustellen, daß und in welcher Form ein Rückwurf entsteht, sondern man muß auch fragen, welcher Zerstreuungsgrad sich aus der Gestalt der zurückwerfenden Fläche ergibt. In Abb. 62 z. B. rührt ein stark ins Auge fallender Rückwurf erster Ordnung von der kleinen Hohlkehle am Rande der Decke her und ebenso ein Rückwurf zweiter Ordnung vom Podium und ebenderselben Hohlkehle. Da aber auf die letztere bei ihrer geringen Größe und dem dadurch gegebenen kleinen Öffnungswinkel der äußersten auf sie zugehenden Schallstrahlen nur eine verhältnismäßig geringe Schallmenge entfällt, diese aber sehr stark

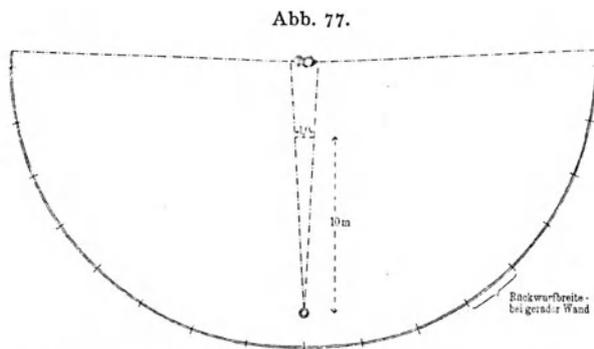
<sup>1)</sup> Deutsche Bauztg. 1894, S. 24. — Zentralbl. d. Bauverw. 1897, S. 591. — Ann. d. Physik, Bd. 21, S. 131, 1906. — Ebenda, 4. Folge, Bd. 26, S. 79, 1908. — Winkelmann, Handb. d. Physik, Bd. 2, Akustik, 2. Aufl., S. 232. Leipzig, J. A. Barth, 1909. — Gesundheits-Ing. 1914, S. 185.

<sup>2)</sup> Kosmos 1919, S. 267.

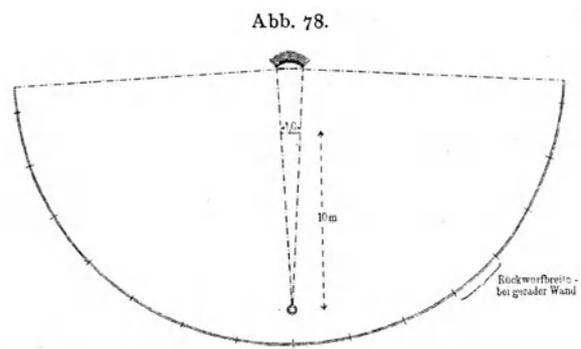
<sup>3)</sup> Eng. Record, Bd. 41, S. 376, 1900.

zerstreut wird, so können die Rückwürfe nur schwach sein und daher in Wirklichkeit sich nicht so eindringlich bemerkbar machen wie in der Zeichnung.

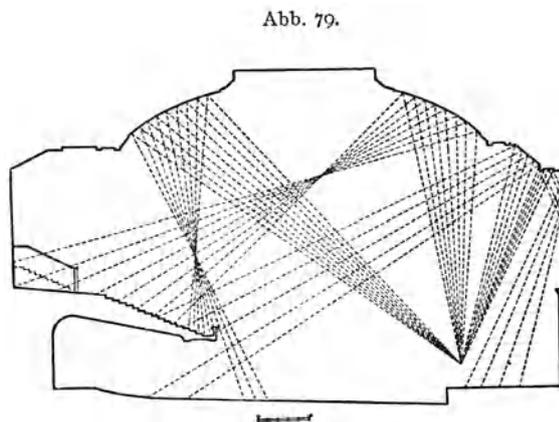
Um über Fragen dieser Art und über den Weg, den der Schall an einzelnen wichtigen Punkten nimmt, Aufschluß zu erhalten, ist es ratsam, aus der gesamten Schallmenge kleine Strahlenbündel herauszugreifen und ihren Weg zu verfolgen, wie dies bereits Orth für die Zionskirche in Berlin und



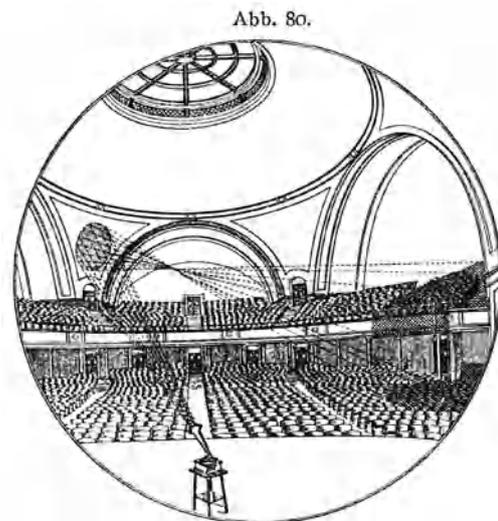
Schallausbreitung bei Rückwurf von Viertelkreis-Kalotte.



Schallausbreitung bei Rückwurf von Viertelkreis-Hohlkalotte.



Verfolgung einzelner Gruppen von Schallstrahlen.



Schallrückwurf von unbelegtem Zwickel der Rückwand.

die Nicolaikirche in Potsdam <sup>1)</sup>, sowie neuerdings Watson für das Auditorium der Universität Illinois <sup>2)</sup> getan hat (Abb. 79 u. 80). Dieses Verfahren empfiehlt sich vor allem bei vielgestaltigen Raumüberdeckungen, wie sie in Kirchen mit mehreren Schiffen und Jochen von busigen Kreuzgewölben auftreten können. Derartige Formen lassen sich nicht völlig eindeutig und erschöpfend in einer aus Längs- oder Querschnitt hervorgehenden Umrißlinie wiedergeben und sind daher für die zeichnerische Konstruktion von Gesamtwellenbildern wie auch für den Wellenapparat oder die Schlierenphotographie weniger geeignet als die einfachen, großen Formen einer geraden Überdeckung, einer Tonne oder einer Kuppel.

<sup>1)</sup> Zeitschr. f. Bauwesen 1872, S. 213 u. 220.

<sup>2)</sup> University of Illinois Bulletin Nr. 73, S. 17.

### Dämpfung bei Rückwurf.

Bei der Beurteilung der Schallstärke von Rückwürfen darf man sich nicht auf die rein geometrisch zu ermittelnde Minderung beschränken, welche sich aus der Ausbreitung der Schallwellen ergibt, sondern es ist noch mit einer weiteren Schwächung zu rechnen, welche dadurch zustande kommt, daß jede von Schallwellen der Luft getroffene Fläche einen bestimmten Bruchteil der auffallenden Schallmenge durch die Poren des Stoffes <sup>1)</sup> in benachbarte Räume oder in freie Luft entweichen läßt, und zwar steht dieser Anteil in umgekehrtem Verhältnis zur Dichte des Körpers. Ferner wird ein Teil der Schallkraft absorbiert, d. h. gedämpft, und nur der verbleibende Rest an der Oberfläche der Wand oder, bei porösen Stoffen, in verschiedenen Tiefen derselben wieder zurückgeworfen. Bei der Dämpfung treten die Schallschwingungen in andere Form, etwa in Wärme über <sup>2)</sup> oder sie werden zu mechanischer Arbeit verbraucht, indem sie die getroffene Wand in Schwingungen versetzen und damit zu einer Zwischenschallquelle machen, die ihrerseits wieder ihre Schwingungen an die Luft auf beiden Seiten der Wand mitteilt <sup>3)</sup>. Die Wand macht dabei den Eindruck, als ob sie besonders stark schalldurchlässig sei, obwohl dies in Wirklichkeit nicht der Fall ist. Das gesamte Aufnahme- und Umwandlungsvermögen ist abhängig von der Art des zurückwerfenden Stoffes. Ist letzterer dicht und glatt, z. B. polierter Granit, so wird ein viel größerer Bruchteil zurückgeworfen, als wenn wir es etwa mit weichen Teppichen zu tun haben. Außerdem kommt die Wandstärke in Betracht.

Der starke Nachhall in dem oben erwähnten, nur 9 m weiten Konfirmandensaal der Petrikerche in Leipzig erklärt sich daher, abgesehen von der ungünstigen Gestalt der gewölbten Decke, hauptsächlich durch die völlig massive Ausführungsweise. Das gleiche gilt von der Garnisonkirche in Stuttgart <sup>4)</sup>, welche durchaus gewölbt und mit sichtbarem Steinmaterial der Wände und Gewölbe, ohne jeden Putz hergestellt worden ist. Ganz besonders stark aber dröhnt und rauscht der ungedämpft zurückgeworfene Schall in den mit poliertem Marmor an den Wänden und Fußböden ausgekleideten Nationalbauten der Walhalla bei Regensburg und der Befreiungshalle bei Kelheim <sup>5)</sup>. Man kann sich daher nur dem von H. Pfeifer geprägten Satz anschließen: „Je monumentaler ein Raum ausgestattet wird, desto schlechter ist seine Hörsamkeit.“ Das Gegenstück bilden nur locker und behelfsmäßig aus Holz oder Leinen hergestellte Baulichkeiten, von denen Unger <sup>6)</sup> über günstige Erfahrungen berichtet, so daß die Forderung „autant baroque que possible“ <sup>7)</sup> als eine gute Richtschnur für den Architekten angesehen werden kann.

Um im einzelnen Falle die richtigen Stoffe zur Bekleidung einer Rückwurffläche wählen zu können, hat Sturmhoefel <sup>8)</sup> eine Anzahl derselben auf ihre Dämpfungskraft hin untersucht und dabei gefunden, daß im Vergleich zu dem auf freiem Felde hörbaren unmittelbaren Schall bei gleichen Entfernungen die nach einmaligem Rückwurf zu erwartende geringere Stärke etwa wie folgt einzuschätzen ist:

<sup>1)</sup> Ann. d. Physik, 4. Folge, Bd. 15, Heft 1904, S. 810.

<sup>2)</sup> Zentralbl. d. Bauverw. 1912, S. 240.

<sup>3)</sup> F. Weisbach, Versuche über Schalldurchlässigkeit, Schallreflexion und Schallabsorption, S. 38 u. 63. Dissertation, Leipzig 1910. — Ders., Bauakustik, S. 34 ff. Berlin, Julius Springer, 1913.

<sup>4)</sup> Architekton. Rundschau 1885, Heft 5, Taf. 42.

<sup>5)</sup> Deutsche Bauztg. 1900, S. 74, mit Innenansicht auf S. 77.

<sup>6)</sup> Ebenda 1909, S. 98.

<sup>7)</sup> Zeitschr. f. Bauwesen 1886, S. 5.

<sup>8)</sup> A. Sturmhoefel, Akustik des Baumeisters, S. 36. Berlin, Schuster & Bufler, 1894.

Bei Wasserspiegel . . . . .	zu 95 Proz.
„ polierter Steinwand . . . . .	„ 95 „
„ „ oder lackierter Holztäfelung . . . . .	„ 95 „
„ gestrichener Holztäfelung . . . . .	„ 90 „
„ glattgeputzter Wand . . . . .	zu 80—85 „
„ gefugter Wand . . . . .	zu 75 „
„ reliefierter Wandfläche mit glattgeputztem Grund . . . . .	„ 64 „
„ glattgestrichenem Rappputz . . . . .	„ 50 „
„ ebengetreter Kiesfläche . . . . .	„ 50 „
„ einem mit kurzem Besen gerauhten Putz, sogenanntem Stippputz . . . . .	„ 35 „
„ ausgesteifter Theaterdekoration . . . . .	„ 30 „
„ faltiger Plüschdraperie . . . . .	„ 20 „

Alle derartigen Werte dürfen aber nur als ungefähr zutreffend angesehen werden, da sie noch durch sonstige Umstände beeinflußt werden. So nimmt nach Taylor die dämpfende Kraft eines Stoffes zu, wenn der Abstand zwischen ihm und der dahinter liegenden Wand vergrößert wird<sup>1)</sup>. Die dahingehenden Versuche wurden hauptsächlich an Preßkork, mit 2, 5, 10 und 20 mm Zwischenraum durchgeführt. Ferner hat Jäger gefunden, daß ein auf eine unporöse Wand treffender Ton um so weniger gedämpft wird, je höher er ist und je mehr Masse die Flächeneinheit der zurückwerfenden Wand besitzt<sup>2)</sup>. Infolgedessen erhält jeder Rückwurf durch teilweise Abgabe des Grundtones eine schärfere Klangfarbe als der Urton. Poröse Stoffe dagegen dämpfen mehr die hohen Töne als die tiefen. Damit stimmt die Beobachtung von Sabine überein, daß in einem leeren Saale eine Violine und eine Baßgeige gleiche Stärke zeigten, im gefüllten Saale aber zwei Violinen nötig wurden, um gleiche Tonstärke wie beim Baß zu erzielen<sup>3)</sup>. Eine weitere Folge ist die, daß bei einem musikalischen Ton der Hauptton andere Stärkeverluste als die Nebentöne zeigt<sup>4)</sup>, und daß man demnach in der Lage sein kann, durch dämpfende Stoffe, die man in den betreffenden Saal bringt, die Nebentöne gegenüber dem Hauptton zurückzudrängen, also diesen reiner erscheinen zu lassen. Es sind auch dies Gesichtspunkte, welche für die technische Durchbildung einer Saalanlage sehr ins Gewicht fallen.

Gehen wir aber der Einfachheit halber von den obigen Zahlenwerten aus, so erhalten wir eine immerhin ganz praktische Handhabe, um unter Berücksichtigung der zurückgelegten Wegelänge die für irgend einen Punkt des Saales zu erwartende Stärke eines Schalles oder Schallrückwurfs wenigstens annähernd zu schätzen.

Mehrere gleichzeitige oder annähernd gleichzeitige Rückwürfe addieren sich in ihren Stärken. Befindet sich z. B. ein Sprecher vor der einen und ein Hörer vor der anderen Schlußwand eines langen Korridors von 4 m Höhe und 6 m Breite, so ergeben sich an seinen sechs glattgeputzten Umschließungsflächen auch sechs Rückwürfe, deren Wegeunterschiede gegen den unmittelbaren Schall nur ganz gering sind, also im Vergleich zu dem letzteren keine besondere Stärkeeinbuße herbeiführen<sup>5)</sup>. Demnach macht sich nur der durch das Zurückwerfen selbst entstehende Dämpfungsverlust geltend, so daß die Rückwürfe zusammen eine Stärke von nahezu  $6 \times 0,8 = 4,8$  ergeben, also fast fünfmal stärker sind als der beim Hörer eintreffende unmittelbare Schall, dessen Stärke gleich 1 gesetzt sei.

Sobald jedoch ein Rückwurf erheblich später als der ursprüngliche Schall oder ein anderer Rückwurf eintrifft, d. h. sobald der Umweg mehr als 17 m, der Zeitunterschied mehr als  $\frac{1}{20}$  Sekunde beträgt, ist eine gegenseitige Verstärkung nicht mehr möglich, macht sich vielmehr ein getrennter Schalleindruck bemerkbar, d. h. es entsteht ein Widerhall oder Echo; es empfiehlt sich dann, die zurückwerfende Fläche mit einem möglichst guten Schalldämpfer zu belegen. In dieser Hinsicht muß der Architekt

<sup>1)</sup> Physical Review, 2. Ser., Bd. 2, S. 283, 1913.

<sup>2)</sup> Sitz.-Ber. d. Wiener Akad. 1911, Bd 120, Abt. II a, S. 630.

<sup>3)</sup> Proc. of the Amer. Acad. of arts and sciences, Bd. 42, Nr. 2, S. 51, 1906.

<sup>4)</sup> Weisbach, Bauakustik, S. 48. Berlin, Julius Springer, 1913.

<sup>5)</sup> A. Sturmhoefel, Akustik des Baumeisters, S. 47. Berlin, Schuster & Bufe, 1894.

bei Kirchen und Versammlungsräumen hauptsächlich auf die Wände vom Fußboden bis 2 oder 3 m über dem letzten Emporen- oder Galeriesitz achten, dann auf die Schlußwände von Quer- und Mittelschiffen und endlich auf die Fußbodenflächen vor Kanzel, Altar oder Rednerplatz, sowie in den Gängen zwischen den Sitzreihen.

Betrachten wir nach den dargelegten Gesichtspunkten den Raum des Pantheons in Rom (Abb. 24) und nehmen wir eine Schallquelle in 10 m Abstand von der Wand links an, so ist ein in der Mitte bei *A* befindlicher Hörer etwa 12 m von der Schallquelle entfernt. Ein unmittelbarer Schall erreicht bei einer Schallgeschwindigkeit von 340 m in der Sekunde den Hörer bereits nach  $\frac{12}{340} = 0,035$  Sekunde. Der Rückwurf erster Ordnung der Wand rechts, also *1.Wr*, gelangt nach *A*, nachdem der Schall einen Weg von 56 m zurückgelegt hat, somit nach  $\frac{56}{340} = 0,165$  Sekunde, und zwar gleichzeitig mit dem Rückwurf zweiter Ordnung, welcher vom Fußboden und der Wand rechts stammt und mit *2.u Wr* bezeichnet ist. Beide Rückwürfe verstärken sich also, wobei sie mit dem beträchtlichen Wegeunterschied von  $56 - 12 = 44$  m bereits störend hinter dem unmittelbaren Schall herlaufen, und zwar um  $0,165 - 0,035 = 0,13$  Sekunde.

Noch mehr gilt solches von der nächsten Gruppe, in welcher hauptsächlich die Rückwürfe *2.Wl Wr* und *3.u Wl Wr* hervortreten. Beide treffen nach weiteren 20 m, also nach einem Gesamtwege von 76 m, im Punkte *A* ein, bleiben also um  $76 - 12 = 64$  m oder  $\frac{64}{340} = 0,188$  Sekunde hinter dem unmittelbaren Schall zurück.

Dicht hinter ihnen folgen als dritte Gruppe nach einem Gesamtwege von 87 m die Rückwürfe des Gewölbes, nämlich *1.Gr* und *2.u Gr*. Gegenüber dem unmittelbaren Schall haben beide einen Weg von  $87 - 12 = 75$  m zurückgelegt, was einer Verspätung von  $\frac{75}{340} = 0,22$  Sekunde entspricht.

Als vierte Gruppe endlich kommen, wie aus Abb. 25 ersichtlich ist, noch Rückwürfe, die nach einem Gesamtwege von 100 m sich um  $100 - 12 = 88$  m oder  $\frac{88}{340} = 0,26$  Sekunde gegenüber dem unmittelbaren Schall verspäten. Dazu gehören vom Gewölbe her die Rückwürfe *2.Wl Gr* und *3.u Wl Gr*, dann von links die Rückwürfe *2.Wr Wl* und *3.u Wr Wl*, sowie allenfalls noch die Rückwürfe *2.Gr Wl* und *3.u Gr Gl*. Schließlich tritt dazu von rechts her neben kleineren Rückwürfen höherer Ordnung hauptsächlich noch ein Rückwurf *2.Gl Wr*.

Wollen wir jetzt die Stärkeverhältnisse überschlagen, so sei mit Sturmhoefel<sup>1)</sup> angenommen, daß die Kraft des unmittelbaren Schalles einer mäßig laut, aber deutlich sprechenden Stimme auf 25 m Entfernung für das Verständnis ausreichend und mindestnotwendig sei und als Einheit gelten könne. Diese Schallstärke ist aber nicht rein, sondern enthält aus den tatsächlichen örtlichen Verhältnissen heraus mehr oder weniger starke und im einzelnen nicht immer feststellbare Anteile an Rückwürfen vom Fußboden, von nahebefindlichen Bauteilen usw., wie schon weiter oben hervorgehoben worden ist. Nehmen wir mit Rücksicht darauf und, um mit dem für die Hörsamkeit ungünstigsten Fall zu rechnen, an, die Schallstärke vermindere sich tatsächlich nur im einfachen Verhältnis der Entfernungen, und sehen wir von dem Einfluß der gekrümmten Grundrißgestalt ab, so ergibt sich folgende Betrachtung:

In dem Augenblick, wo der unmittelbare Schall bei *A* eintrifft, besitzt er eine Stärke von  $\frac{25}{12}$ , also gleich dem Zweifachen des Mindestnotwendigen. Der aus dem Längsschnitt (Abb. 24) ersichtliche Rückwurf *1.Wr* behält nach einem Wege von 56 m eine Stärke von nur noch  $\frac{25}{56} = 0,5$ . Infolge der Rückwurfdämpfung vermindert sich diese bei marmorverkleideter Wand, also einer

<sup>1)</sup> A. Sturmhoefel, Zentralbau oder Langhaus? S. 44. Berlin, W. Ernst & Sohn, 1897.

Nutzwirkung von 95 Proz., noch weiter auf  $0,5 \cdot 0,95 = 0,48$  des geringst erforderlichen Wertes. Zu diesem Schall kommt durch den Rückwurf *2.uWr*, wenn man den Fußboden als polierte Steinfläche mit 95 Proz. ansetzt, ein Betrag von  $0,48 \cdot 0,95 = 0,46$ . Dies macht zusammen  $0,48 + 0,46 = 0,94$ . Die bei *A* gleichzeitig eintreffende erste Gruppe von Rückwürfen ist also in ihrem gemeinsamen Wirken beinahe ebenso stark, wie es bei einer menschlichen Stimme auf 25 m Entfernung zum Verständnis notwendig ist.

Bei der nächsten Gruppe, nämlich den Rückwürfen *2.WlWr* und *3.uWlWr*, haben wir aus den Wegelängen ein Stärkeverhältnis von  $\frac{25}{76} = 0,33$ , also unter Berücksichtigung der Rückwurfämpfung bei dem ersteren eine Stärke von  $0,33 \cdot 0,95 \cdot 0,95 = 0,298$ , bei dem letzteren eine solche von  $0,298 \cdot 0,95 = 0,283$ . Beide zusammen haben demnach einen Wert von  $0,298 + 0,283 = 0,581$ , sind also beinahe  $\frac{2}{3}$  so stark wie die erste Gruppe.

Die in der dritten Gruppe zusammengefaßten Rückwürfe *1.Gr* und *2.uGr* erfahren aus der Weglänge eine Stärkeverminderung auf  $\frac{25}{87} = 0,29$ . Wird das Gewölbe als verputzt, also mit einer Nutzwirkung von 85 Proz. angenommen, so ergibt sich unter Berücksichtigung der Rückwurfchwächung bei dem ersteren der beiden Rückwürfe eine Stärke von  $0,29 \cdot 0,85 = 0,25$ , bei dem zweiten eine solche von  $0,25 \cdot 0,95 = 0,24$ , also zusammen  $0,25 + 0,24 = 0,49$ .

Die vierte Gruppe von Rückwürfen endlich trifft nach einem Gesamtwege von 100 m bei *A* ein und ergibt demnach aus der Weglänge ein Schallstärkeverhältnis von  $\frac{25}{100} = 0,25$ . Unter den in dieser Gruppe enthaltenen Rückwürfen wird, im Längsschnitt (Abb. 25) betrachtet, ein vom Gewölbe kommender Rückwurf etwa im Verhältnis 12:7 stärker zerstreut als ein Wandrückwurf. Wird auch dieses berücksichtigt, so ergibt sich für die vierte Gruppe folgende Wirkung:

Rückwurf 2. Ordnung	„Wand links, Gewölbe rechts“	0,25 · 0,95 · 0,85 · $\frac{7}{12}$	= 0,118
„ 3. „	„Fußboden, Wand links, Gewölbe rechts“	0,116 · 0,95	= 0,112
„ 2. „	„Wand rechts, Wand links“	0,25 · 0,95 · 0,95	= 0,226
„ 3. „	„Fußboden, Wand rechts, Wand links“	0,226 · 0,95	= 0,215
„ 2. „	„Gewölbe rechts, Wand links“	0,25 · 0,85 · 0,95 · $\frac{7}{12}$	= 0,118
„ 3. „	„Fußboden, Gewölbe rechts, Gewölbe links“	0,25 · 0,95 · 0,85 · $\frac{7}{12}$ · 0,85 · $\frac{7}{12}$	= 0,058
„ 2. „	„Gewölbe links, Wand rechts“	0,25 · 0,85 · 0,95 · $\frac{7}{12}$	= 0,118
			0,965

Obwohl also alle diese einzelnen Rückwürfe nur schwach sind, verstärken sie sich doch durch ihr Zusammentreffen derart, daß sie vereint ebenso kräftig sind wie die erste Gruppe und fast doppelt so stark wie die zweite. Sie wirken außerdem dadurch störend, daß sie sehr spät bei *A* ankommen, nämlich 0,26 Sekunde später als der unmittelbare Schall, während die Verspätung nicht mehr als 0,05 Sekunde betragen darf, wenn Nachhall oder Echo vermieden werden sollen.

Wie wir gesehen haben, folgen dem unmittelbaren Schall vier Rückwurf-Hauptgruppen, denen sich nachklingend noch schwächere Rückwürfe anschließen. Diese vier Hauptgruppen sind mit den zeitlichen Abstufungen von 0,13 — 0,188 — 0,22 und 0,26 Sekunde um mehr als 0,05 Sekunde, also so weit vom unmittelbaren Schall getrennt, daß sie ihn nicht mehr unterstützend überdecken. Nimmt man dazu noch die vorerwähnten Stärkeverhältnisse, so bestätigt sich das frühere Ergebnis, wonach wir im Pantheon sehr ungünstige Hörsamkeitsverhältnisse haben. In Übereinstimmung damit stehen die Beobachtungen in dem nach den Maßen des Pantheons erbauten Kuppelsaal der Stadthalle in Hannover.

## Nachhall.

Um ein Bild von den Hörsamkeitsverhältnissen eines Saales zu gewinnen, haben wir bisher die Entstehung, den Verlauf und das Zusammenwirken von Rückwürfen verfolgt sowie den Einfluß von Resonanzen und Interferenzen berücksichtigt.

Nach dem gleichen Ziel hin können wir auch die Gesamterscheinung der von den Raumumschließungen stammenden Rückwürfe ins Auge fassen, die als Nachhall und Echo den Begriff der schlechten Hörsamkeit in erster Linie bedingen, während nur in seltenen Fällen eine zu geringe Stärke der Schallquelle, etwa der Stimme eines Redners, schuld sein kann. Ein Raum ist also um so günstiger, je geringer die Nachhalldauer ist und je mehr es uns erforderlichenfalls gelingt, die letztere mit Hilfe geeigneter Dämpfungsmstoffe zu verringern.

Als allgemeinen Anhalt kann man annehmen, daß es für die meisten Zwecke genügt, wenn die Umschließungsflächen eines Raumes durchschnittlich  $\frac{1}{10}$  bis  $\frac{1}{7}$  der auf sie entfallenden Schallkraft absorbieren, also nicht zurückwerfen. Als Vergleichseinheit gilt die Dämpfung von 1 qm Fläche einer größeren, ins Freie führenden Öffnung<sup>1)</sup>. Genaue Untersuchungen hierüber haben Exner<sup>2)</sup> und Heger<sup>3)</sup>, vor allem aber Sabine an Räumen mittlerer Größe vorgenommen. Der letztere kam dabei zu folgenden Feststellungen<sup>4)</sup>:

1. Die Dauer des Nachhalls ist an allen Stellen des Raumes fast dieselbe, d. h. sie ist bei feststehender Schallquelle nahezu unabhängig vom Standort des Beobachters.

2. Die Dauer des Nachhalls ist fast unabhängig von der Stellung der Schallquelle, d. h. sie ändert sich im großen und ganzen nicht, wenn man die Schallquelle an verschiedenen Stellen anordnet, während der Beobachter an ein und derselben Stelle verbleibt.

3. Die Wirkung eines Schalldämpfers ist fast unabhängig von der Stelle, an welcher er angebracht wird.

Nach den Messungen von Precht geht die Abnahme des Nachhalls nicht stetig, sondern sprungweise in bestimmten Stufen vor sich. Dabei klingen tiefe und hohe Töne wesentlich schneller ab als solche der Mittellage, und in geräuschvoller Umgebung werden die tieferen Töne mehr als die höheren gedämpft. Auf welche Ursachen die Ungleichmäßigkeit in der Abnahme der Nachhallstärke zurückzuführen ist, ob etwa immer wieder eintreffende Rückwürfe oder vielleicht Schwebungen, also Interferenzen die Veranlassung dazu bilden, müssen die noch im Gang befindlichen Untersuchungen ergeben. Für die praktische Beurteilung der Hörsamkeit genügt es, auf diejenige Abnahme sein Augenmerk zu richten, welche sich innerhalb der ersten 2 Sekunden vollzieht.

---

<sup>1)</sup> Zentralbl. d. Bauverw. 1912, S. 240.

<sup>2)</sup> Winkelmann, Handb. d. Physik, Bd. 2, Akustik, 2. Aufl., S. 581. Leipzig, J. A. Barth, 1909.

<sup>3)</sup> Zeitschr. f. Archit. u. Ingenieurwesen 1911, S. 309.

<sup>4)</sup> Eng. Record. Bd. 41, S. 349 u. 377, 1900.

Auf Grund ihrer Beobachtungen haben Sabine und Jäger<sup>1)</sup> Formeln entwickelt, mit deren Hilfe die voraussichtliche Nachhalldauer für einen im Entwurf vorliegenden Raum also lediglich an Hand der Zeichnungen berechnet werden kann. Die Formel von Sabine lautet für überschlägliche Ermittlung:

$$\text{Nachhalldauer } t = K \cdot \frac{V}{a} \text{ Sekunden.}$$

Hierin bedeutet:  $V$  = Inhalt des Saales.  $a$  = Dämpfungs- oder Absorptionsvermögen der Wände, Vorhänge, Einrichtungen und Personen.  $K$  = Zahl, die durch Versuche festgestellt wurde und von Tonhöhe, Klangfarbe und Nachhallstärke abhängig ist und im Mittel zu 0,164 angenommen werden kann<sup>2)</sup>. Franklin fand sie mit 0,1625 bestätigt<sup>3)</sup>.

Für  $a$  hat Sabine folgende Werte erhalten:

Bekleidung in Hartfichte . . . . .	0,061
Glas, einfache Dicke . . . . .	0,027
Putz auf Holzschalung . . . . .	0,033
Putz auf Ziegel . . . . .	0,025
Ziegelmauerwerk . . . . .	0,025
Linoleum am Fußboden . . . . .	0,12
Vorhänge . . . . .	0,23
Ölbild mit Rahmen . . . . .	0,28
Dicker Teppich . . . . .	0,29

Alle diese Zahlen beziehen sich auf 1 qm Fläche im Vergleich zu der Dämpfung von 1 qm offener Fensterfläche.

An weiteren Zahlen sind noch folgende bemerkenswert:

Einzelner Mann . . . . .	0,48	} bei größerer Anzahl mindestens 0,44
Einzelne Frau . . . . .	0,54	
Publikum auf 1 qm Saalfläche . . . . .	0,96	

Aus der obigen Formel geht hervor, daß zur Erzielung einer kurzen Nachhalldauer und damit einer guten Hörsamkeit der Rauminhalt  $V$  klein, der Wert  $a$  aber groß sein muß. Am besten ist also ein kleiner Saal mit einer verhältnismäßig großen Fläche an stark dämpfenden Stoffen, etwa mit vielen Vorhängen, Teppichen, Möbeln usw. Dagegen wird man störenden Nachhall zu erwarten haben, wenn der Rauminhalt groß und die Ausstattung mit dämpfenden Stoffen nur spärlich ist.

In welcher Weise sich nach dem Gesagten eine Nachhalldauer überschlagen läßt, möge noch ein Beispiel erläutern. Als es sich nämlich um die Errichtung der Boston Music Hall handelte, beabsichtigte man sie in vergrößerter Gestalt des Gewandhaussaales in Leipzig auszuführen, da die Hörsamkeit des letzteren allgemein als gut anerkannt war. Um feste Vergleichspunkte zu erhalten, bestimmte Sabine zunächst die voraussichtliche Nachhalldauer des Gewandhaussaales. An Hand der Zeichnungen fand er, daß der Saal enthielt:

Putz auf Lattung . . . . .	2206 qm	
Glas . . . . .	17 "	
Holz . . . . .	235 "	
Vorhänge . . . . .	80 "	
Ferner Sitzplätze im Saal . . . . .	990	} 1517 Personen
"    "    auf dem 1. Rang . . . . .	494	
"    "    "    "    2. " . . . . .	33	
Orchester . . . . .	80 Mann	

<sup>1)</sup> Sitz.-Ber. d. Wiener Akad., Bd. 120, Abt. IIa, S. 622, 1911.

<sup>2)</sup> Eng. Record, Bd. 41, S. 503, 1900.

<sup>3)</sup> Univ. of Illinois Bull. Nr. 73, S. 10.

Mit den entsprechenden Dämpfungszahlen multipliziert, ergab dies:

Putz auf Lattung . . . . .	2206.0,033 =	73
Glas . . . . .	17.0,027 =	0,4
Holz . . . . .	235.0,061 =	14,0
Vorhänge . . . . .	80.0,23 =	18,0
Zuhörer . . . . .	1517.0,44 =	667,0
Orchester . . . . .	80.0,48 =	38,0
		810

Der Rauminhalt des Saales wurde zu 11200 cbm ermittelt und danach konnte der Wert für  $t$  zu 2,3 festgestellt werden.

Nun wurde dieselbe Berechnung für den fertig vorliegenden Entwurf zur Boston Music Hall durchgeführt. Hierbei ergab sich  $t = 3,02$ , also ungünstiger. Infolgedessen wurde ein neuer Entwurf ausgearbeitet, für den  $t = 2,31$ , also annähernd in gleichem Wert wie beim Gewandhaussaal errechnet wurde, und der demnach als Grundlage für die Ausführung dienen konnte.

Wie aus dem Gesagten hervorgeht, genügt es zur Erzielung guter Hörsamkeit in einem Saale nicht, diesen als Kopie, d. h. in den Raumverhältnissen und Hauptformen eines schon bestehenden Saales von anerkannt guter Hörsamkeit zu errichten, denn die technischen Bedingungen und Ausführungsweisen wie auch die architektonische Ausgestaltung werden immer etwas abweichen und damit zu anderen Hörsamkeitsergebnissen führen.

Neben dem besprochenen angenäherten Verfahren bringt Sabine auch eine genauere rechnerische Lösung. Auf diese einzugehen, würde aber hier zu weit führen und es sei deshalb auf die betreffende Veröffentlichung verwiesen <sup>1)</sup>.

Zu ähnlichen Schlüssen wie Sabine kam Jäger <sup>2)</sup>, indem er nachwies, daß der Nachhall um so kürzer ausfalle, je größer das Verhältnis Oberfläche/Volumen des Raumes sei und demnach weiterhin, je mehr oberflächenreiche Verzierungen, Leuchter, Personen usw. man hinzufüge. Andererseits ist es unmöglich, einen Raum hörsam zu gestalten, der für beschränkte Stimmittel, etwa für Kammermusik oder einen nicht sehr kräftigen Redner, zu groß ist. Dieser Fall liegt z. B. beim Sitzungssaal des österreichischen Abgeordnetenhauses vor, welcher ungefähr 11000 cbm umfaßt gegenüber rund 9000 cbm des Sitzungssaales im deutschen Reichstagsgebäude.

Versuche, die Sabine am Neubau des New England Conservatory of Music mit verschiedenartiger Ausstattung, vom nahezu leeren Zustande bis zur vollständigen Einrichtung anstellte, ließen als beste Schallwirkung eine Nachhalldauer von rund 1,1 Sekunde erkennen <sup>3)</sup>. In gleichem Sinne prüfte Marage <sup>4)</sup> mit Hilfe von Vokalsirenen eine Anzahl von Sälen in Paris, unter denen der größte, derjenige des Trocadéro, bei 63000 cbm Rauminhalt, 58 m Durchmesser und 55 m Kuppelhöhe im leeren Zustande eine Nachhalldauer von 2 Sekunden, bei Vollbesetzung eine solche von 1,45 Sekunde ergab. Der kleinste Saal war der Physiologiesaal der Sorbonne mit 646 cbm Inhalt und 150 Zuhörern. Er wies leer eine Nachhalldauer von 1,4, besetzt eine solche von 0,7 Sekunde auf. Als das Vorteilhafteste für Sprechen erklärte Marage eine Nachhalldauer von nicht mehr als  $\frac{1}{2}$  bis 1 Sekunde. Lehrreich ist demgegenüber, daß Precht für die schon oben erwähnte Stadthalle in Hannover (Abb. 27 u. 28) bei leerem Saal in der Nacht eine Nachhalldauer von 4,96 Sekunden gemessen hat, und daß er dieses Ergebnis rechnerisch in dem nur wenig davon abweichenden Wert von 4,94 Sekunden bestätigt fand. Für den gefüllten Saal ergab die Rechnung eine Nachhalldauer von 3,14 Sekunden.

<sup>1)</sup> Eng. Record, Bd. 41, S. 450, 1900.

<sup>2)</sup> Sitz.-Ber. d. Wien. Akad., Bd. 120, Abt. IIa, S. 622, 1911.

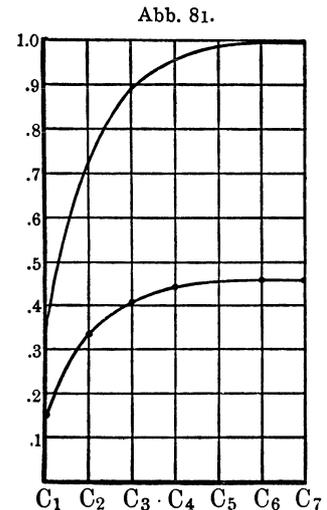
<sup>3)</sup> Proc. of the Amer. Acad. of arts and sciences, Bd. 42, Nr. 2, S. 51, 1906.

<sup>4)</sup> Compt. Rend., Bd. 142, S. 878, 1906.

Leider ist es bis jetzt nicht möglich gewesen, eine genaue Messung bei vollbesetztem Haus durchzuführen. Daß sich hier verhältnismäßig hohe Werte gegenüber den vorher erwähnten Beobachtungen ergaben, beruht zum Teil auf den ungünstigen Hörsamkeitsverhältnissen der Stadthalle, zum anderen Teil aber sicherlich in der höheren Empfindlichkeit des von Precht angewandten Meßverfahrens.

Sabine benutzte zu seinen Untersuchungen zunächst nur eine einzige Orgelpfeife, nämlich eine solche von 512 Schwingungen. Dann ging er auf Töne verschiedener Höhe ein und stellte dafür die Schalldämpfung von Personen, Holzvertäfelungen, Polsterungen, Stühlen usw. fest<sup>1)</sup>. Danach zeigt beifolgende Darstellung (Abb. 81) die Dämpfung durch Personen, und zwar in der unteren Kurve die Dämpfung durch eine einzelne Person, in der oberen diejenige durch Publikum auf 1 qm Saalfläche. Die senkrechten Ordinaten beziehen sich auf die vollkommene Dämpfung von 1 qm Fläche. Die bei der Untersuchung benutzten Töne waren C 1 64, C 2 128, C 3 256, C 4 512, C 5 1024, C 6 2048 und C 7 4096.

Aus seinen Messungen fand Sabine, daß es ausreiche, Räume, die zum Sprechen bestimmt seien, nur mit einer einzigen Tonquelle, am besten mit einer solchen von 800 Schwingungen, durchzuprüfen, daß es aber bei dem abweichenden Verhalten der verschiedenen Töne ratsam sei, Musiksäle womöglich für die ganze Reihe der musikalischen Tonleiter, nämlich für etwa 7 Oktaven, von C 1 mit 64 Schwingungen bis C 7 mit 4096 Schwingungen, zu studieren. Demgemäß führte er seine Untersuchung an Hand der für mehrere Töne gewonnenen Lehren durch, als es sich darum handelte, zum Bau des Little Theatre in New York aus drei verschiedenen Bauentwürfen den günstigsten auszuwählen<sup>2)</sup>.



Dämpfung für verschiedene Noten.  
Untere Kurve für eine Person, obere Kurve  
für Publikum auf 1 qm Saalfläche.

<sup>1)</sup> Proc. of the Amer. Acad. of arts and sciences, Bd. 42, Nr. 2, S. 51, 1906. — Journ. of the Franklin Inst., Bd. 179, Nr. 1, S. 9 ff., 1915.

<sup>2)</sup> The Amer. Architect, Bd. 104, S. 263, 1913.

## Verbesserung schlechter Hörsamkeit.

Wir haben uns bisher bemüht, Verfahren ausfindig zu machen, um zeichnerisch, durch Versuch oder mittels Rechnung die in irgend einem vorhandenen Raume auftretenden Schallwirkungen zu analysieren oder sie für einen noch geplanten Saal nach Maßgabe seiner Gestalt wie auch der in Aussicht genommenen Baustoffe im voraus abzuwerten.

Eine weitere Aufgabe, welche von der Praxis öfter gestellt wird, ist die, eine als schlecht erkannte Hörsamkeit noch nachträglich am fertigen Bau zu verbessern. Die hierfür einzuschlagenden Wege ergeben sich nach dem oben Gesagten von selbst: In erster Linie muß man, wenn es irgend geht, die Raumform so umgestalten, daß die entstehenden Rückwürfe dem unmittelbaren Schall zu Hilfe kommen; sodann muß man die Resonanzverhältnisse prüfen und verbessern und schließlich ist dafür zu sorgen, daß störender Schall auf eine stark dämpfende Fläche trifft und dort sein Ende findet, günstiger Schall aber von glatten, festen Flächen mit möglichst geringem Dämpfungsverlust zurückgegeben wird.

Das erstere Ziel wird meistens durch ablenkende und zerstreue Einbauten, etwa Emporen oder dergleichen, durch Tieferlegen der Decke usw. erreicht. Auch die von Orth empfohlenen Deflektoren<sup>1)</sup>, wenigstens wenn sie im großen Maßstab ausgeführt werden, und die Reflektoren und Schalldeckel gehören hierher. Ihre Wirksamkeit beschränkt sich aber auf den unmittelbaren Rückwurf; auf den Nachhall sind sie, wie u. a. die Versuche von P. P. Whitmann<sup>2)</sup> bestätigt haben, im großen und ganzen ohne Einfluß, vermutlich weil bei diesem die schon vielfach hin und her geworfenen Schallwellen zu stark zerrissen und zerklüftet sind.

Eine Dämpfung von Widerhall und Nachhall wird vielfach durch Ausspannen von Fäden angestrebt. So hat man in der Kathedrale Saint-Fin-Barre in Cork (Irland) in einer Höhe von 6 bis 8 m über dem Fußboden Fäden zwischen den Mauern des Kirchenschiffes angebracht, und in der neuen Kirche Notre Dame des Champs in Paris zog man am Gewölbebeginn 3 mm starke Baumwollfäden nach der Quere und der Diagonale ein, wodurch sich angeblich die Hörsamkeit erheblich verbesserte<sup>3)</sup>. Auch das in den Jahren 1855 bis 1864 von Cornelius Ortschorn erbaute „Palys voor Volkslyt“ in Amsterdam wurde mit derartigen sich kreuzenden Fäden versehen<sup>4)</sup>. Noch weiter ging man in den 80er Jahren im Chemie-Hörsaal der technischen Schule in South Kensington und in der Kapelle des Keble-College in Oxford, wo Stahl- und Kupferdrähte 1 bis 2 m unter der Saaldecke netzartig ausgespannt und an ihren Kreuzpunkten mit Spiralfedern verbunden wurden. Durch entsprechende Vorrichtungen ließen sie sich in ganz bestimmtem Spannungszustand erhalten, der sie

---

<sup>1)</sup> Deutsche Bauztg. 1881, S. 9.

<sup>2)</sup> Science (New York), Bd. 38, S. 707, 1913.

<sup>3)</sup> Deutsche Bauztg. 1877, S. 330.

<sup>4)</sup> Rombergs Zeitschr. f. praktische Baukunst 1879, S. 13.

befähigte, Schallschwingungen aufzunehmen und zu vernichten. Auch hier wird ein tatsächlicher Erfolg gerühmt<sup>1)</sup>. Dagegen versagte derselbe in der 1875 bis 1879 erbauten Stuttgarter Garnisonkirche.

Ein anderer mit derartigen Vorkehrungen verfolgter Zweck war gelegentlich der, den Schall von seiner Quelle nach entfernten Stellen im Saal schneller als durch die Luft zu leiten und dadurch gewissermaßen dem Widerhall durch Resonanz zuvorzukommen<sup>2)</sup>.

Aus neuerer Zeit ist der Kuppelsaal der Stadthalle in Hannover zu nennen, wo ein wage-rechtes Fadennetz in Höhe des Gewölbebeginns angebracht und darüber noch ein Gardinentüll von etwa 2 bis 3 mm Maschenweite verlegt wurde. Beides blieb aber ohne merkbare Wirkung, was um so verständlicher ist, wenn man bedenkt, daß Fäden und Drähte nur sehr geringe Masse besitzen und daher keine erheblichen Schwingungsmengen aufzunehmen vermögen. Bereits Sturmhoefel hat derartigen Vorkehrungen jeden Wert abgesprochen<sup>3)</sup> und Beobachtungen, die von Heger<sup>4)</sup> und neuerdings von Precht vorgenommen worden sind, haben dies nur bestätigt. Watson<sup>5)</sup> erklärt, noch keinen Raum gefunden zu haben, in dem eine ausgesprochene Verbesserung durch ausgespannte Drähte herbeigeführt worden sei, selbst nicht, nachdem man in einem Falle 5 km Draht verarbeitet habe. Demnach scheinen die früheren subjektiven Berichte über günstigen Erfolg auf Selbsttäuschung zu beruhen und vor der Kritik exakter Messung nicht standhalten zu können.

Schon eher ist eine merkbare Wirkung von dichten Tüchern zu erwarten. So schreibt Dove, daß man in der Paulskirche in London an einem einzigen Tage im Jahre, nämlich zu Weihnachten, den Prediger verstehe, weil dann die Kirche mit Draperien verziert werde<sup>6)</sup>. Über ähnliche Beobachtungen in römischen Kirchen, deren Pfeiler und Säulen mit Stoffen, vermutlich nicht nur zu äußerem Prunk, umkleidet wurden, berichtet Keller<sup>7)</sup>. Dieser erzählt auch, daß unter anderem in der gotischen Kirche St. Maria sopra Minerva in Rom bei Predigten ein etwa 4 m breites Schalltuch über einen Teil des Mittelschiffes ausgespannt werde, um die Hörsamkeit zu verbessern.

Nachträglich wurden Stoffschleier und -ausfütterungen in der 1870 erbauten Albert Hall in London<sup>8)</sup>, in der Kaiser-Friedrich-Halle in M.-Gladbach<sup>9)</sup> und im großen Saale der städtischen Ausstellungshalle in Dresden<sup>10)</sup> mit guter Wirkung angebracht. Und die Rückwände des Gewandhaus-saales in Leipzig<sup>11)</sup> sowie der weiter oben besprochenen Hill Memorial Hall in Michigan (Abb. 69, 70 u. 71, Taf. XV) wurden sogar von vornherein mit dämpfenden Verkleidungen versehen.

Zu eingehenden Untersuchungen über Dämpfungen gab der nach einer Ellipse gestaltete Saal des Trocadéro in Paris Veranlassung<sup>12)</sup>, über dessen Hörsamkeit sich zunächst lebhaftere Klagen erhoben hatten. Lyon stellte mit Hilfe einer Anzahl von Beobachtern, welche über den Saal verteilt waren und auf einen bestimmten Klang zu horchen hatten, zunächst fest, welche Plätze Widerhall erhielten und von welchen Teilen des Podiums dieser ausging. Dann wurden die Rückwurfstellen geometrisch ermittelt und Nachprüfungen mit einem Horchapparat vorgenommen. Durch weitere Versuche wurde als die beste Möglichkeit einer Rückwurfdämpfung die Verwendung von zwei Molton-

1) Zentralbl. d. Bauverw. 1882, S. 78.

2) Engineering, Bd. 30, S. 136, 1880.

3) A. Sturmhoefel, Zentralbau oder Langhaus? S. 45. Berlin, W. Ernst & Sohn, 1897.

4) Zeitschr. f. Arch. und Ingenieurwesen 1911, S. 322.

5) Univ. of Illinois Bull., Nr. 73, S. 12.

6) Zeitschr. f. Bauwesen 1871, S. 245.

7) Zentralbl. d. Bauverw. 1891, S. 188.

8) Handb. d. Arch., 4. Tl., 1. Halbbd., 3. Aufl., S. 353. Stuttgart, Arnold Bergsträsser, 1904.

9) Zentralbl. d. Bauverw. 1909, S. 302.

10) Zeitschr. f. Arch. u. Ingenieurwesen 1911, S. 321.

11) Zeitschr. f. Bauwesen 1886, S. 1.

12) La Nature 1909, S. 326. — Zentralbl. d. Bauverw. 1909, S. 302.

vorhängen erkannt, die unter sich 5 bis 6 cm, von der verhängten Fläche etwa 30 cm Abstand hatten. Dadurch wurde zwar eine gewisse Besserung erzielt, aber ganz ließ sich der Nachhall nicht beseitigen<sup>1)</sup>.

In der Lukaskirche in Dresden hat sich nach Heger<sup>2)</sup> ein Borchersscher Dämpfer als besonders wirksam erwiesen. Dieser bestand aus einer 5 cm starken Korkplatte, welche mit einer Schicht grobgeschnittener Korkstücke bedeckt war. Sehr günstige Ergebnisse zeitigte auch ein Versuch in der evangelischen Garnisonkirche in Dresden, wobei Heger den Fußboden des Altarplatzes, die Gänge im Schiff, einen Teil der Wandfläche am Altar und hinter den Emporen sowie die Emporenbrüstungen, zusammen 673 qm mit wollenen Militärschlafdecken auslegte.

Durch üblen Wider- und Nachhall im Auditorium der Universität von Illinois wurde Watson zu umfangreichen Prüfungen und entsprechenden technischen Maßnahmen geführt<sup>3)</sup>. Der Saal ist mit einer etwa 30 m weiten Hängekuppel überdeckt, die auf vier großen Gurtbögen ruht und eine rund 9 m betragende Oberlichtöffnung aufweist. Zur Ermittlung der Stellen, von denen die Rückwürfe kamen, wurde eine Wechselstromlampe benutzt, welche im Brennpunkt eines parabolischen Schirmes angebracht war und in Richtung seiner Achse nicht nur ihr Licht, sondern auch den ihr eigentümlichen brummenden Ton ausstrahlte. Wurde der Schirm nach verschiedenen Richtungen gedreht und gab auf einmal der Ton der Lampe einen Rückwurf, so konnte als Rückwurfstelle ohne weiteres derjenige Punkt angesehen werden, auf welchen in diesem Augenblick das Licht des Scheinwerfers fiel. Durch kleine Spiegel, welche an diesen Stellen auf der zurückwerfenden Fläche befestigt wurden, ließ sich der weitere Verlauf des Rückwurfes leicht verfolgen. Außerdem wurde zur Nachprüfung der Weg einzelner Strahlenbündel zeichnerisch festgestellt (Abb. 79 u. 80).

Um die beobachteten Schallmängel zu beheben, wurde zunächst ein Reflektor, der nach dem Viertel eines Rotationsparaboloids gestaltet war<sup>4)</sup>, angebracht und damit ein Teil der gesamten Schallmenge von der Kuppeldecke ferngehalten und unmittelbar in die Zuhörerreihen zurückgeworfen (Abb. 82, Taf. XVI). Die Wirkung war gut, aber ein solcher Schaldeckel war naturgemäß nur für einzelne Redner anwendbar, nicht für Orchesteraufführungen u. dgl., bei denen sich zahlreiche Schallquellen über die ganze Bühne verteilen.

Zur weiteren Nachprüfung des Raumes wurde nach dem Verfahren von Sabine mit Hilfe einer Orgelpfeife von 526 Schwingungen die Nachhalldauer zu 5,9 Sekunden ermittelt, während die Rechnung 6,4 Sekunden ergab. Mehrere Jahre später wurde die Nachhalldauer wieder bestimmt, nachdem die Bühne mit dickem Teppichbelag, mit Sammetvorhängen von rund  $6 \times 10$  m Fläche und mit einem etwa 40 qm großen Gemälde auf Leinwand ausgestattet worden war. Die Nachhalldauer betrug nunmehr nur 4,8 Sekunden. Auch diese Zeitspanne verringerte sich noch, sobald Publikum zugegen war, und weiterhin, nachdem man zur Beseitigung des neben dem Nachhall bemerkbaren Widerhalls Maßnahmen getroffen hatte. Gewöhnliche Stoffbehänge auf den Wandflächen hatten zu diesem Zweck nicht ausgereicht. Erst vier große, frei unter der Decke baldachinartig aufgehängte Schalltücher (Abb. 83, Taf. XVI) ließen den Widerhall im ganzen Raume verschwinden. Da sie aber häßlich aussahen, konnten sie für die Dauer nicht beibehalten werden, vielmehr mußte eine gleiche Wirkung wie bei ihnen durch eine weniger ins Auge fallende dämpfende Wandverkleidung erzielt werden<sup>5)</sup>. Zu diesem Zwecke wurde die westliche Wandfläche mit Filzstreifen von 30 Zoll Breite belegt, die 30 Zoll voneinander entfernt senkrecht an der Wand herunterliefen und auf dünnen, wagerechten

<sup>1)</sup> Handb. d. Arch., 4. Tl. 1. Halbbd., 3. Aufl., S. 353. Stuttgart, Arnold Bergsträsser, 1904.

<sup>2)</sup> Zeitschr. f. Arch. u. Ingenieurwesen 1911, S. 318.

<sup>3)</sup> Univ. of Illinois Bull. Nr. 73, S. 13 ff. — Physical Review, Bd. 32, S. 231, 1911.

<sup>4)</sup> Physical Review, Bd. 1, 2. Ser., S. 241, 1913.

<sup>5)</sup> Univ. of Illinois Bull. Nr. 87, S. 7.

Futterstreifen, also in geringem Abstand von der Wandfläche befestigt waren (Abb. 84, Taf. XVI). Das Ganze wurde mit Rips von geeigneter Farbe überzogen.

In ähnlicher Weise wurde auch die Kuppelfläche ausgekleidet. An der östlichen Balkonwand wurde der Filz auf Holzrippen derart angebracht, daß er einen Fuß Abstand vom Wandputz erhielt. Auch die rückwärtige Nische wurde mit Dämpfung versehen.

Der Erfolg war im ganzen befriedigend, jedoch verblieb noch ein geringer Widerhall, der, wie mit Hilfe von Schalltrichtern und parabolischen Reflektoren festgestellt werden konnte, hauptsächlich von einigen nicht verkleideten Zwickelflächen kam (Abb. 80). Diese Resterscheinungen waren aber so bedeutungslos, daß weitere Maßnahmen nicht mehr notwendig erschienen. Durch die angebrachten Widerhalldämpfungen wurde, wie schon angedeutet, zugleich die Nachhalldauer verkürzt, und zwar auf etwa 1,8 Sekunde, also auf ein Maß, das für einen Raum von der Größe des hier besprochenen Auditoriums genügend gering ist, um in ihm Musik wie auch Rede verständlich sein zu lassen.

In gewissem Grade wirkt die Zeit verbessernd auf die Hörsamkeit eines Saales, indem z. B. das Mauerwerk austrocknet und damit einerseits an Schalleitungsfähigkeit verliert, andererseits an Resonanzkraft gewinnt<sup>1)</sup>. Dazu kommt, daß allem Anschein nach das Gefüge des Bauwerkes sich ähnlich wie bei einer Geige, die jahrelang gespielt wird, im Laufe der Zeit allen möglichen Tönen anpaßt und damit die Fähigkeit gewinnt, auf sie mit Resonanz einzugehen<sup>2)</sup>, so daß sich damit der Ausspruch von Garnier rechtfertigt „que les salles se font à la longue comme le vin mis en bouteille“<sup>3)</sup>.

In gleicher Richtung bewegt sich eine Äußerung von Albert Hofmann bei Eröffnung des neuen Schillertheaters in Charlottenburg: „Wenn erst die Feuchtigkeit ganz aus den Mauerkörpern gewichen sein wird und sich der Staub abgelagert hat, dann wird der Ton auch die klangvolle Abrundung zeigen, die den alten Theatern eigen ist“<sup>4)</sup>.

Während unser hauptsächlichstes Bestreben dahin gehen muß, jede störende Schallwirkung zu beseitigen, haben andererseits gelegentliche Beobachtungen gezeigt, daß man, wenigstens bei musikalischen Aufführungen, Stoffbehänge in nicht zu großem Umfange anwenden darf. So war beim Trauerschmuck für A. v. Menzel in der Hochschule für Musik in Berlin die starke Dämpfung der Töne zwar dieser Veranstaltung angemessen, aber für andere Zwecke wäre sie zu reichlich gewesen<sup>5)</sup>.

<sup>1)</sup> F. Weisbach, Bauakustik, S. 38. Berlin, Julius Springer, 1913.

<sup>2)</sup> O. D. Chwoison, Lehrb. d. Physik, Bd. 2, 1. Abt. Die Lehre vom Schall, herausgeg. von G. Schmidt, S. 109. Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1919.

<sup>3)</sup> Handb. d. Arch., 4. Tl., 1. Halbbd., 3. Aufl., S. 370. Stuttgart, Arnold Bergsträsser, 1904.

<sup>4)</sup> Deutsche Bauztg. 1907, S. 30.

<sup>5)</sup> Zentralbl. d. Bauverw. 1905, S. 153.

## Schluß.

Fassen wir die Ergebnisse unserer Betrachtung kurz zusammen, so empfiehlt sich für die Hörsamkeitsuntersuchung eines großen Raumes etwa folgendes Vorgehen.

Zunächst trägt man in die Zeichnungen, vor allem in den Längsschnitt, dann aber auch in den Querschnitt und in den in Höhe der Schallquelle genommenen Grundriß das Bild einer Schallwelle für mehrere, kurz hintereinander folgende Zeitpunkte ein.

Nach dem daraus ersichtlichen Verlauf des Schalles und seiner Rückwürfe läßt sich die Gefahr besonders ungünstiger Schallwirkungen, Echobildungen u. dgl. beurteilen. Auch ist es möglich, zu überschlagen, in welchem Maße die Schallstärke sich durch Ausbreitung der Welle und durch Dämpfung beim Rückwurf voraussichtlich vermindern wird und auf welche Verstärkung andererseits durch gleichzeitiges Eintreffen mehrerer Schallwellen an irgend einem Punkt gerechnet werden darf. Zur weiteren Klarstellung hierüber kann man außerdem für bestimmte Stellen, von denen man ungünstige Rückwürfe befürchtet, den Weg einzelner Strahlenbündel zeichnerisch verfolgen.

Ergänzend treten zu diesen Untersuchungen noch photographische Momenteinzelbilder oder Kinematogrammaufnahmen mit Hilfe des angegebenen Wellenapparates oder nach dem von Sabine in dieser Richtung ausgebildeten Toeplerschen Schlierenverfahren.

Endlich wäre noch die Flächengröße der zur Raumumschließung benutzten Baustoffe festzustellen und danach die zu erwartende Nachhalldauer zu berechnen, sowie die etwaige Notwendigkeit und Möglichkeit einer Dämpfung zu beurteilen.

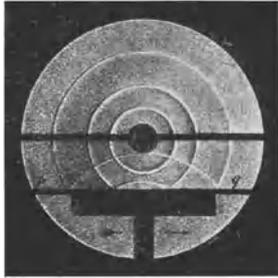
Der so skizzierte Untersuchungsgang kommt sowohl in Betracht, wenn es sich erst um die Planung eines Bauwerkes handelt, wenn also zunächst nur Zeichnungen vorliegen, die auf ihre Eignung hin geprüft und je nach Erfordernis noch geändert werden sollen, dann aber auch, wenn ein schon bestehender Raum nach etwaiger Verbesserungsmöglichkeit untersucht werden soll.

Im letzteren Falle ist man überdies in der Lage, durch Messungen und örtliche Versuche, wie sie Watson und andere vorgenommen haben, die Schallverhältnisse zu klären und vor allem diejenigen Stellen der Umschließungsfläche zu ermitteln, welche den Schall ungünstig zurückwerfen.

Wir sehen also, daß wir heute den Fragen der Hörsamkeit doch nicht mehr so hilflos gegenüberstehen, wie man es im allgemeinen noch anzunehmen pflegt, und daß sich insbesondere dem Architekten und Musikverständigen die verschiedensten Mittel und Wege bieten, um einerseits einen Bauentwurf auf seine Geeignetheit zu prüfen und damit nachträgliche unliebsame Überraschungen zu vermeiden, andererseits in einem vorhandenen Saale die Ursachen einer unbefriedigenden Hörsamkeit festzustellen und für Abhilfe der Mängel zu sorgen.

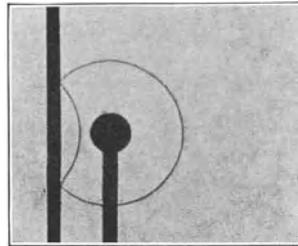
---

Abb. 3.



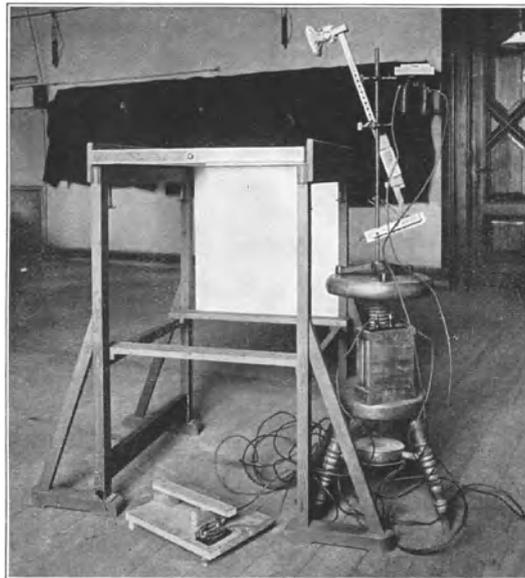
Schallrückwurf von Spiegelglasplatte.

Abb. 9.



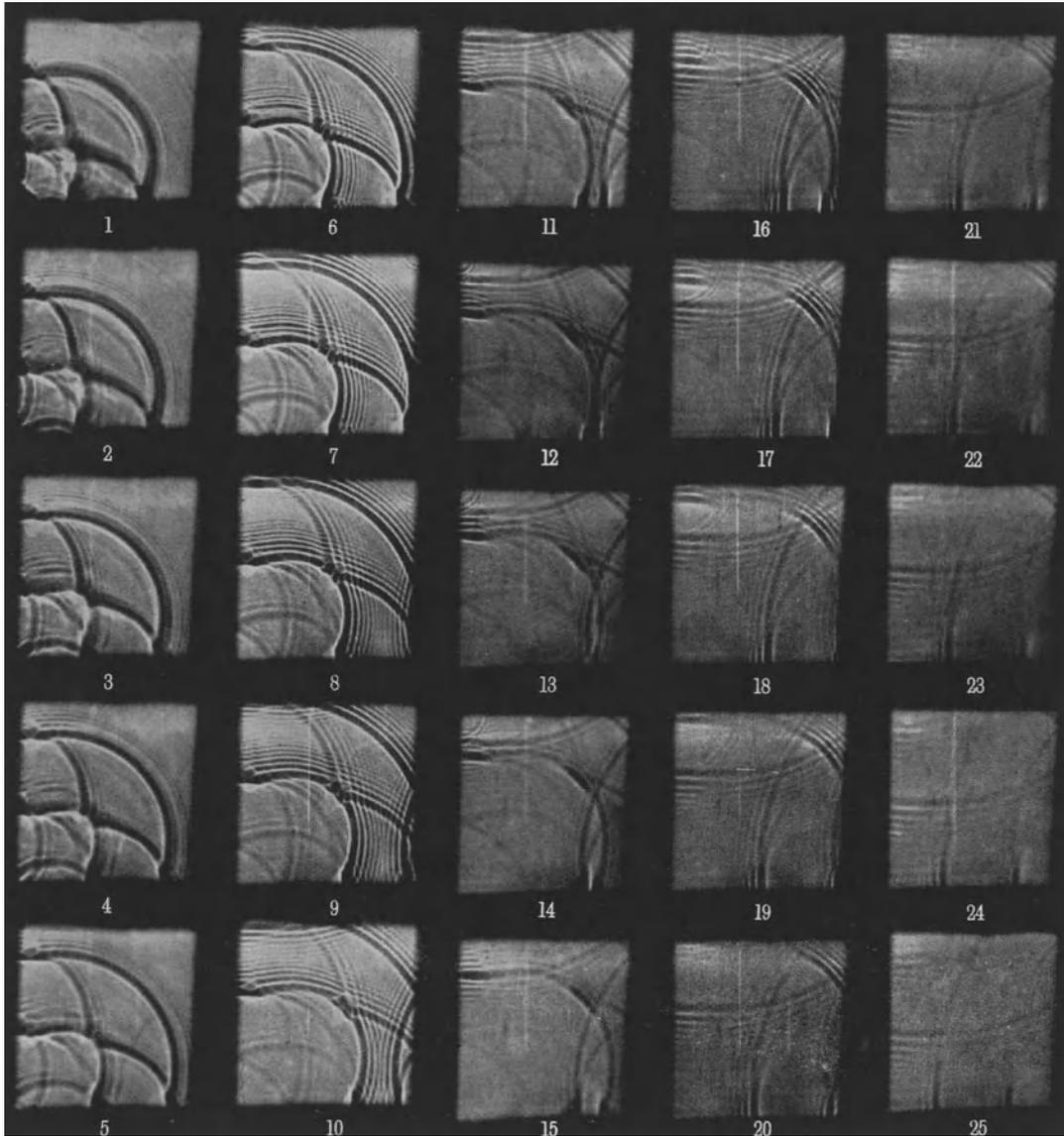
Kreiswelle  
von ebener Fläche zurückgeworfen.

Abb. 11.



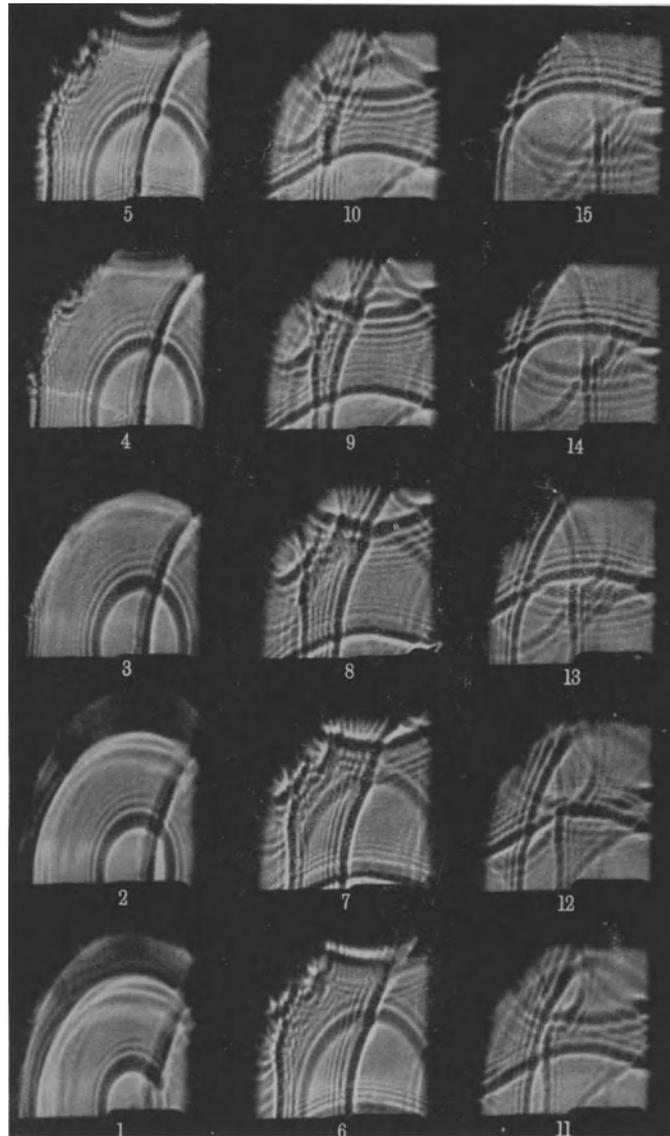
Wellenapparat.

Abb. 12.



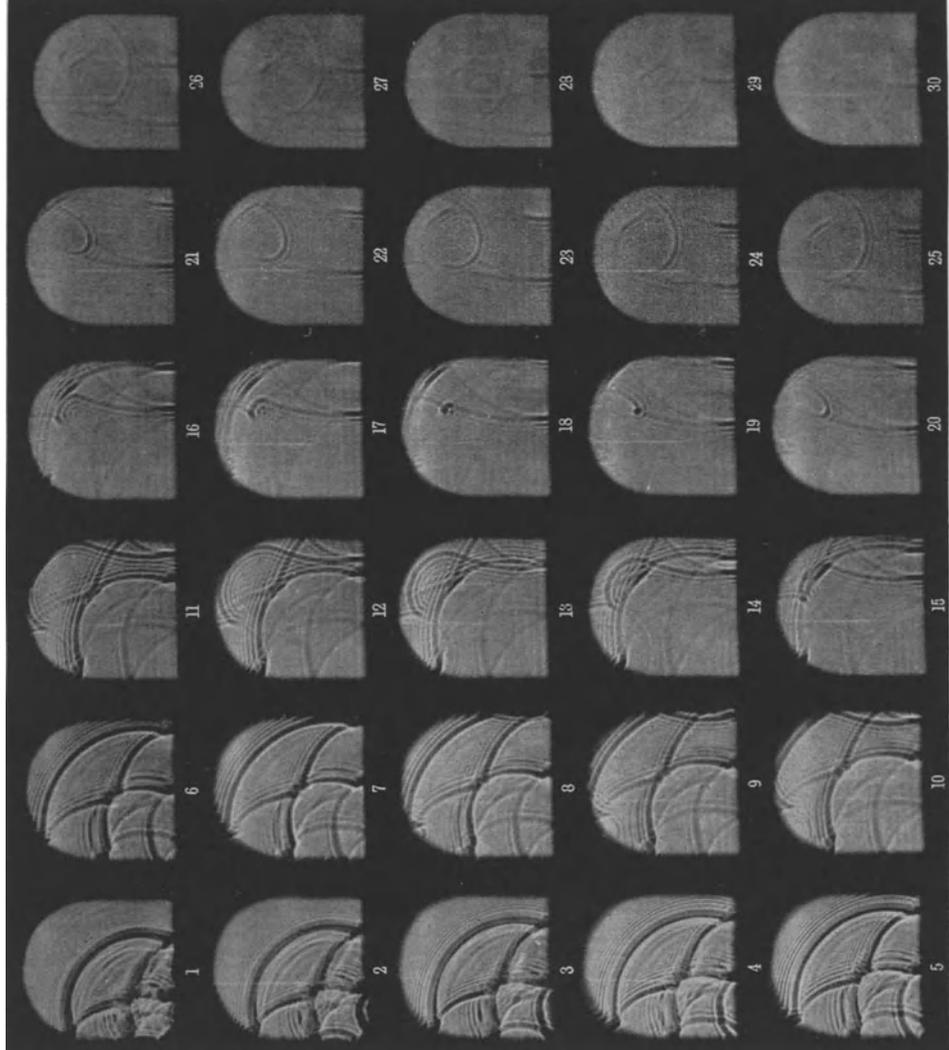
Rückwurf in Rechteckumgrenzung.

Abb. 20.



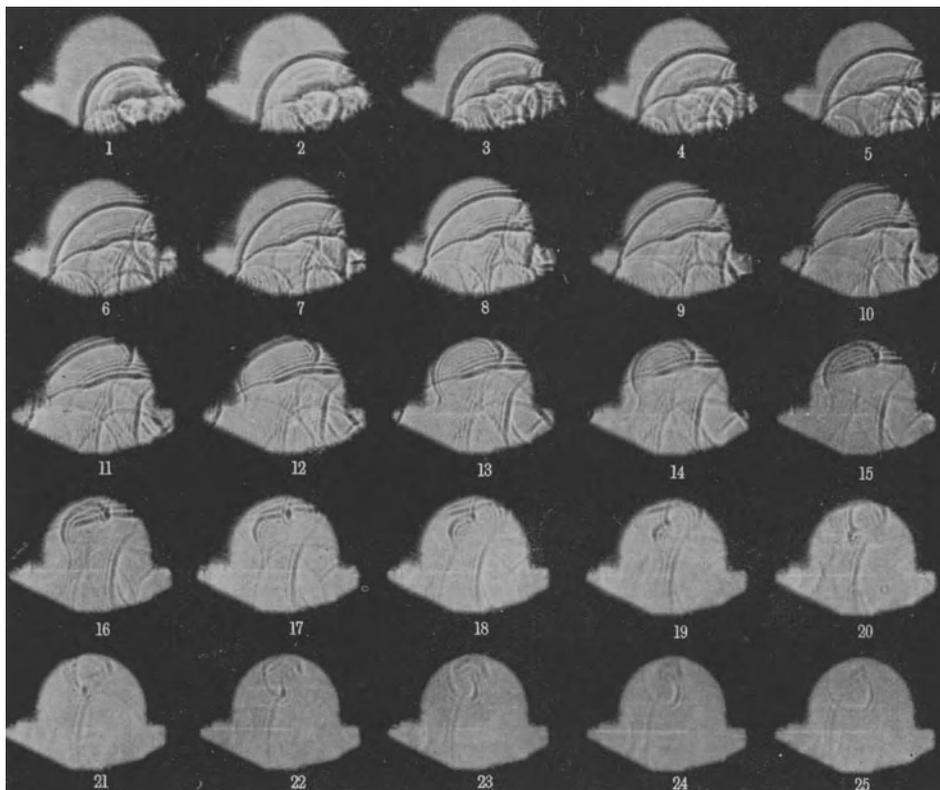
Rückwurf an Gesims.

Abb. 23.



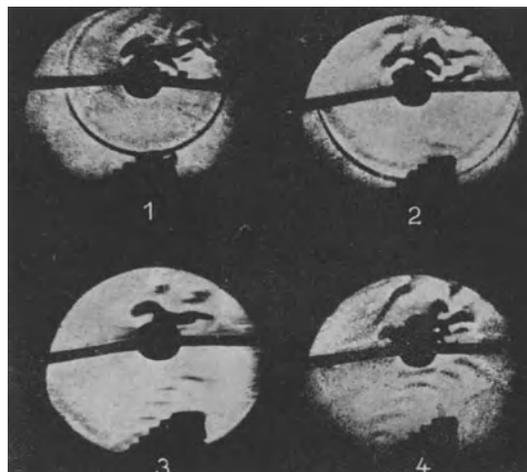
Rückwurf in Rechteckumgrenzung mit Halbkreisabschluss.

Abb. 28.



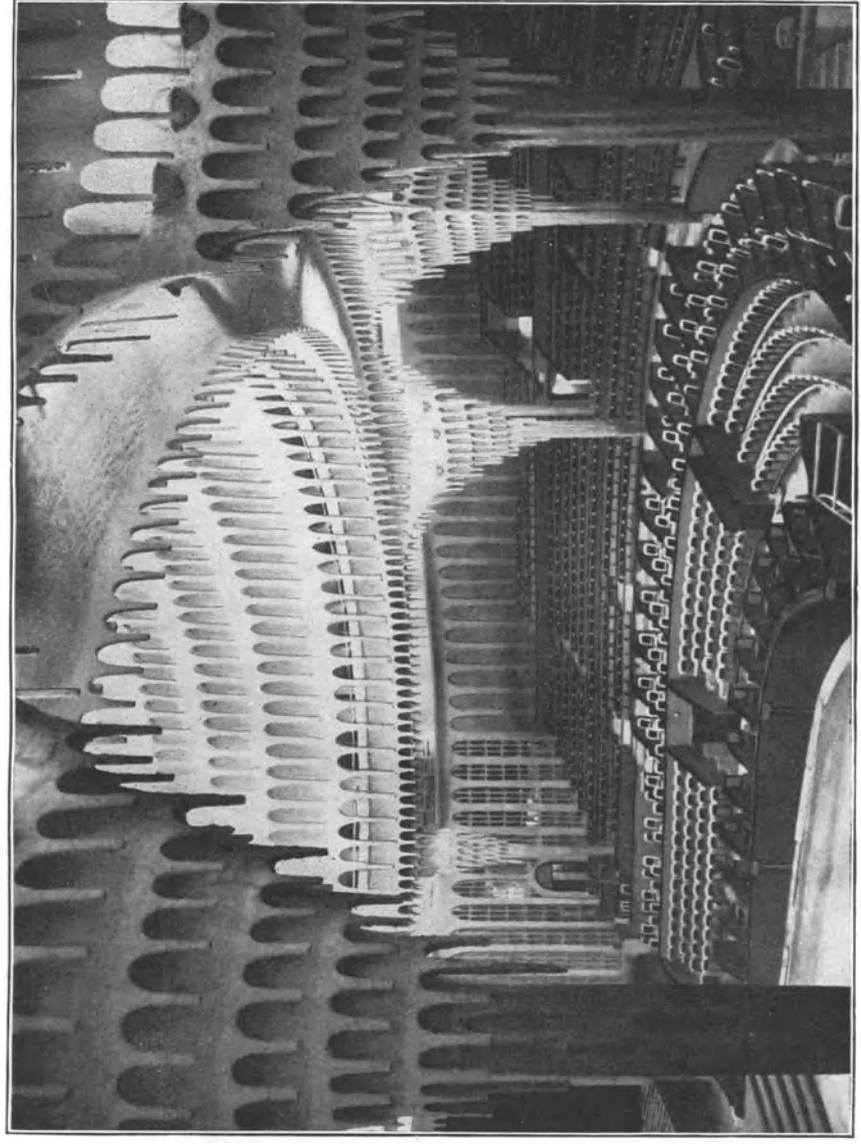
Rückwurf im Längsschnitt der Stadthalle in Hannover.

Abb. 29.



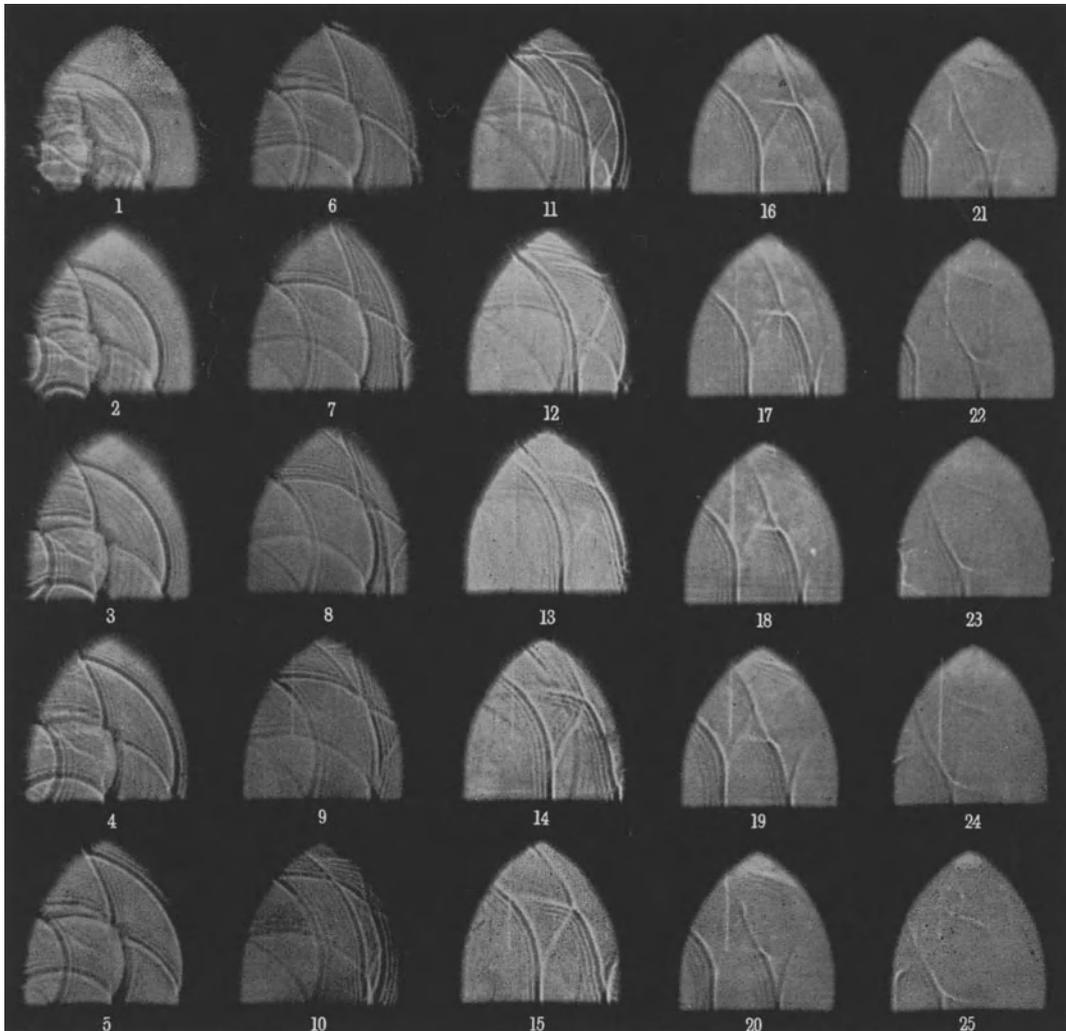
Rückwurf einer Luftwelle an Treppenprofil (nach Wood).

Abb. 30.



Großes Schauspielhaus in Berlin. Zuschauerraum.

Abb. 37.



Rückwurf in Rechteckumgrenzung mit Spitzbogenabschluß.

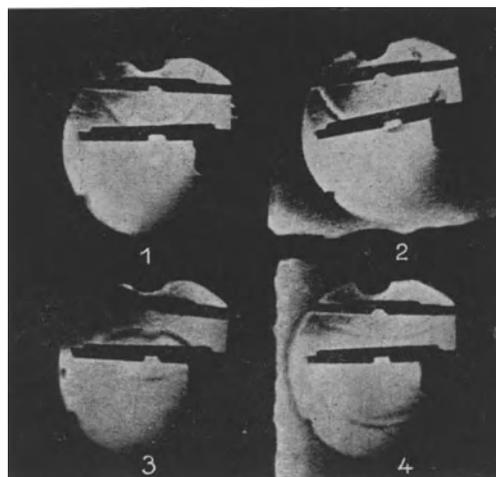
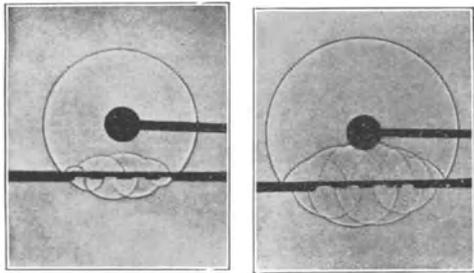


Abb. 41.  
Wellendurchgang  
durch Plattenöffnung  
(nach Wood).

Abb. 42.



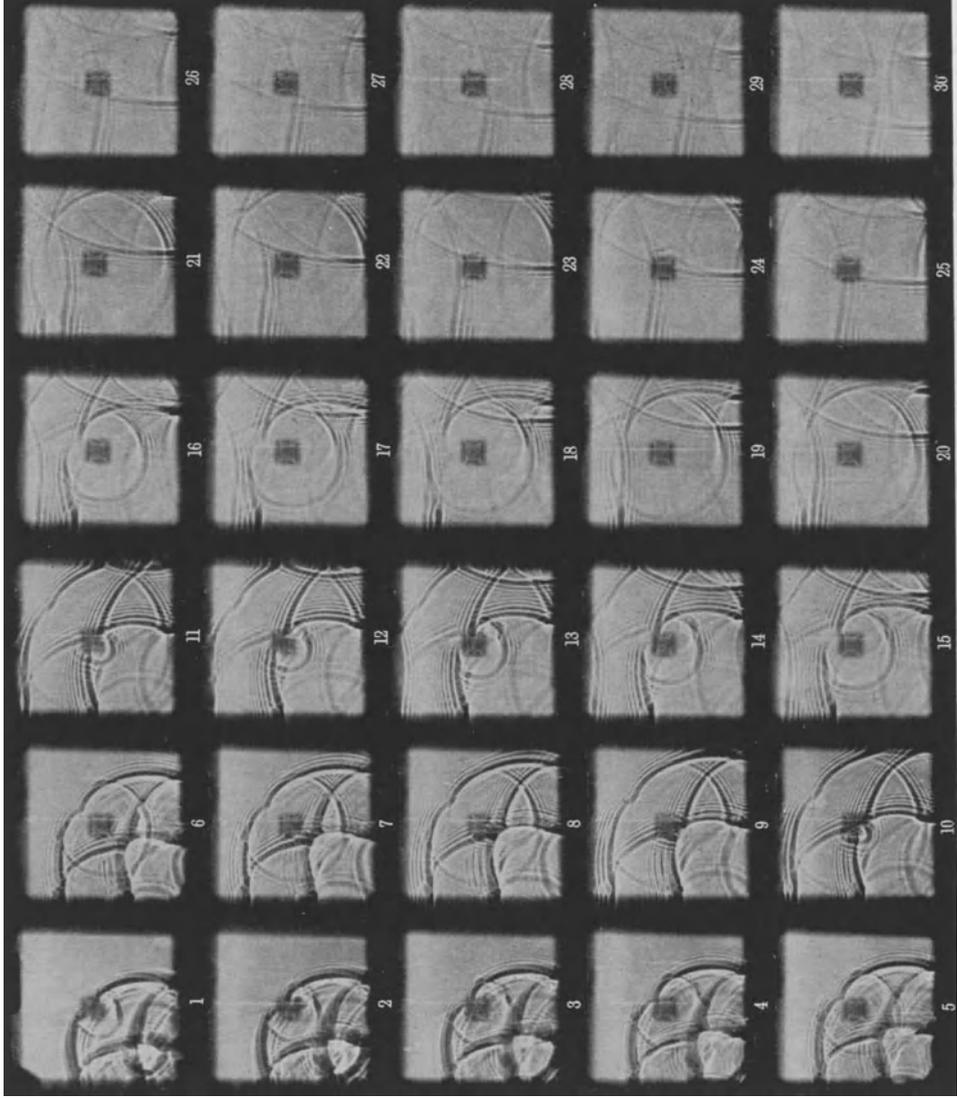
Wellendurchgang durch Plattenöffnungen  
(nach Foley und Souder).

Abb. 44.



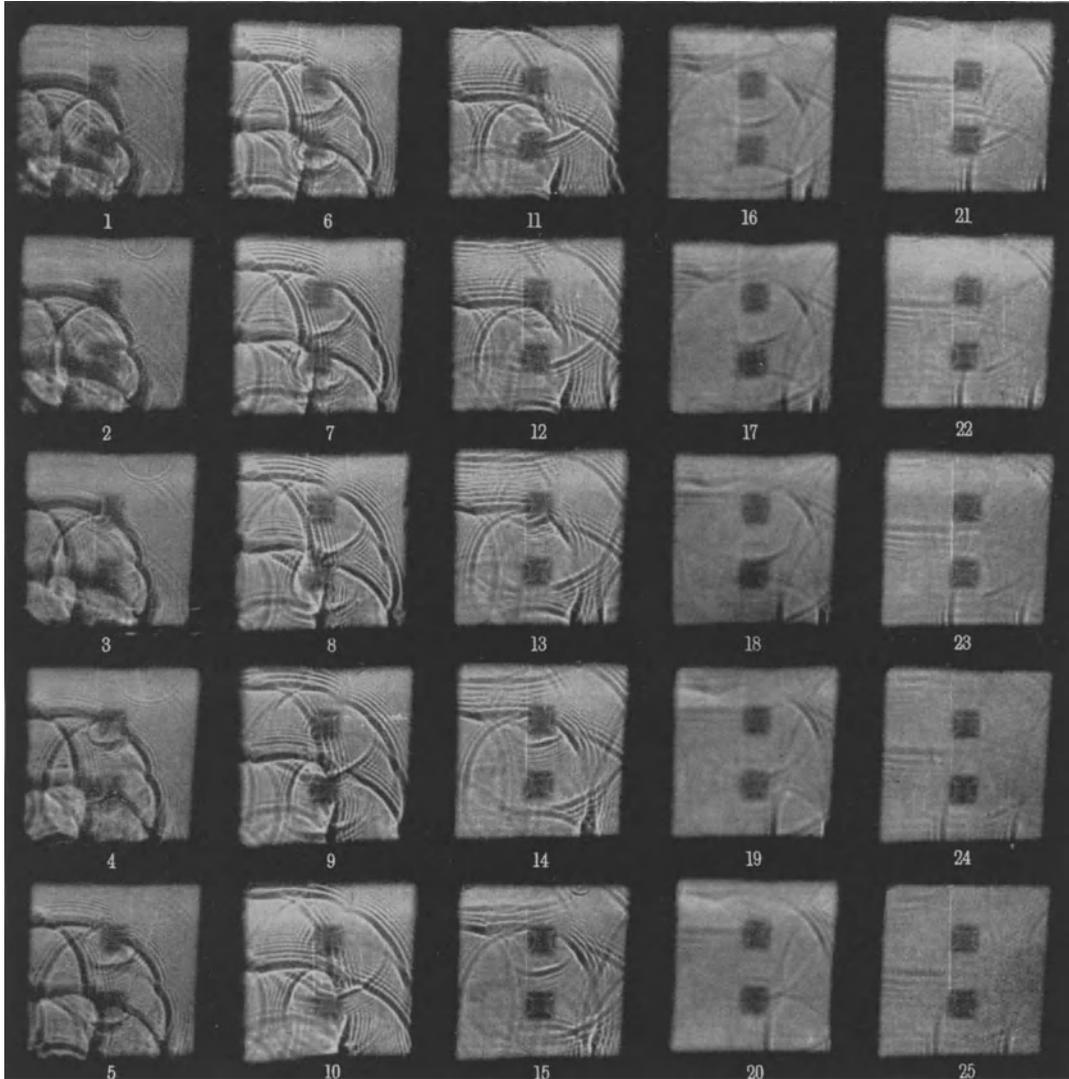
Welle beim Vorübergang an einem Hindernis.

Abb. 50.



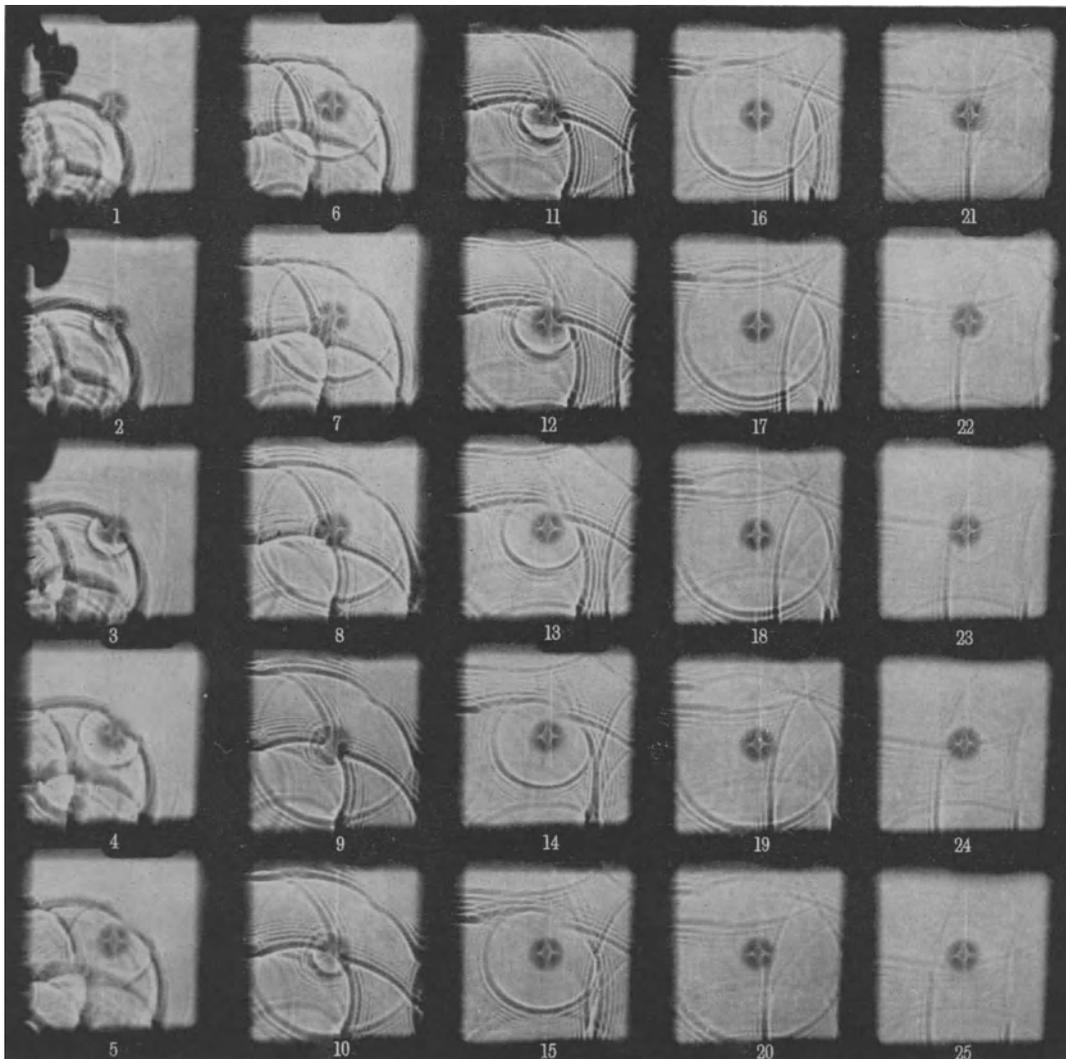
Rückwurf in Rechteckungrenzung. Ein quadratischer Mittelpfeiler.

Abb. 51.



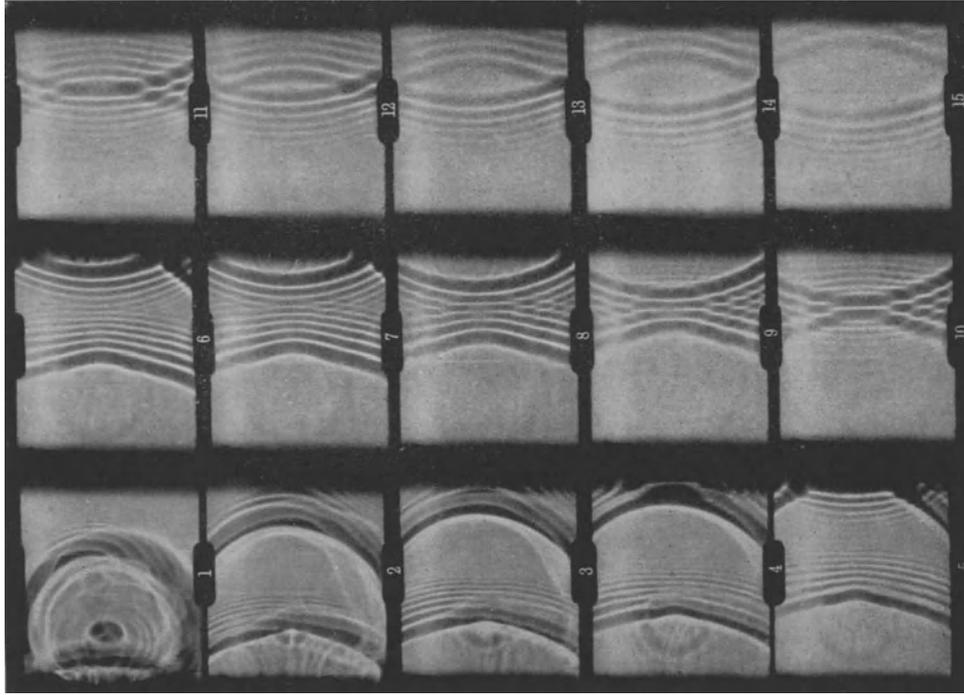
Rückwurf in Rechteckumgrenzung. Zwei quadratische Pfeiler.

Abb. 54.



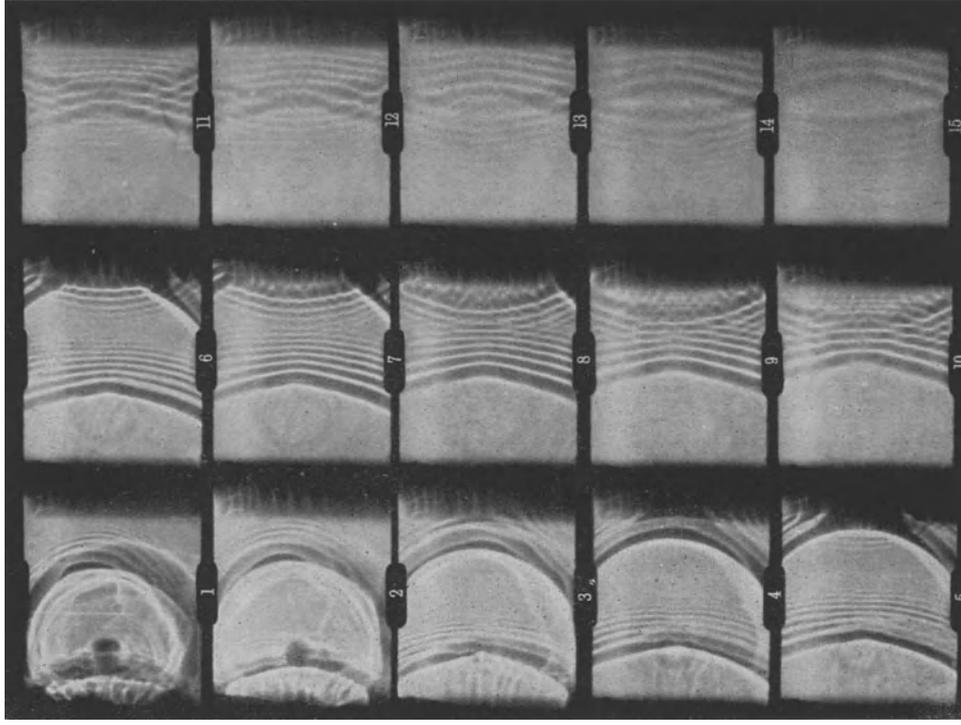
Rückwurf in Rechteckumgrenzung. Runder Mittelpfeiler.

Abb. 56.



Rückwurf an gerader Holzleiste (Bildrand rechts).

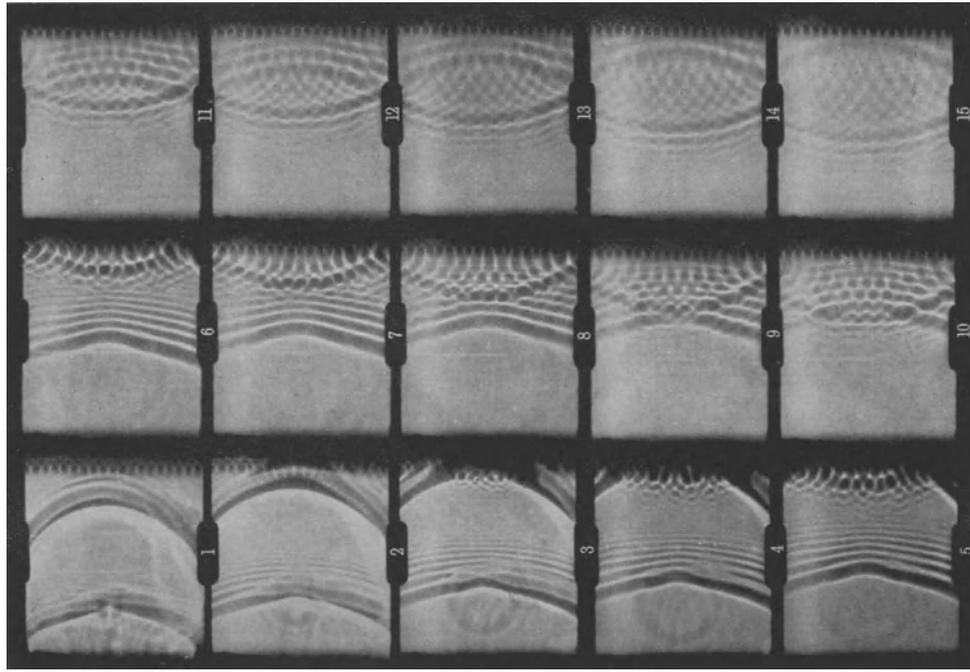
Abb. 57.



Rückwurf an Bürstenleiste (Bildrand rechts).

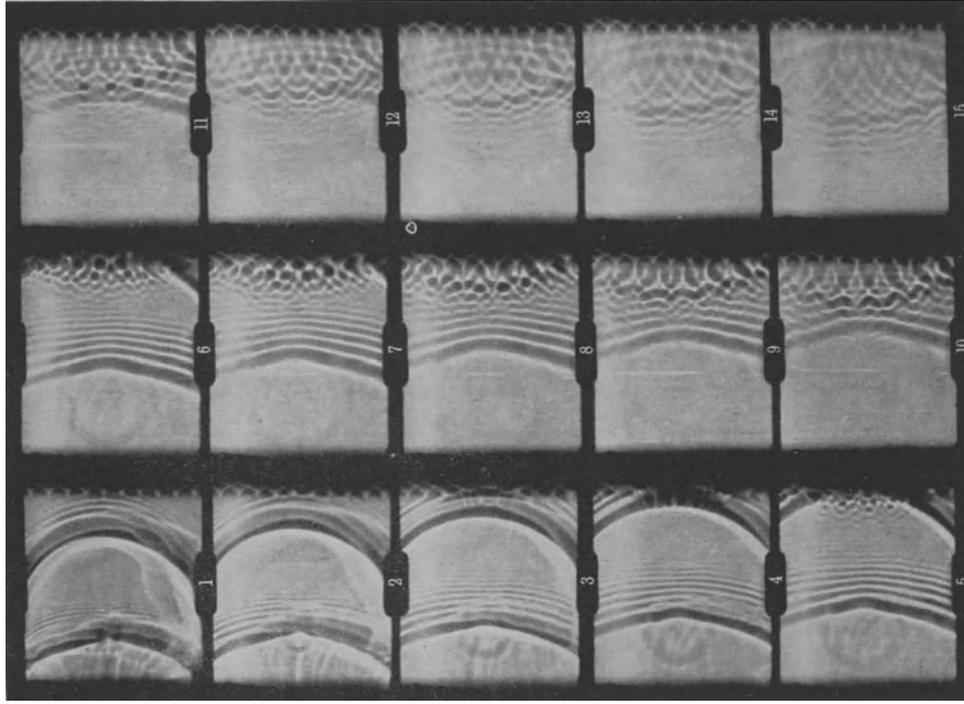
Michel, Hörsamkeit großer Räume.

Abb. 58.



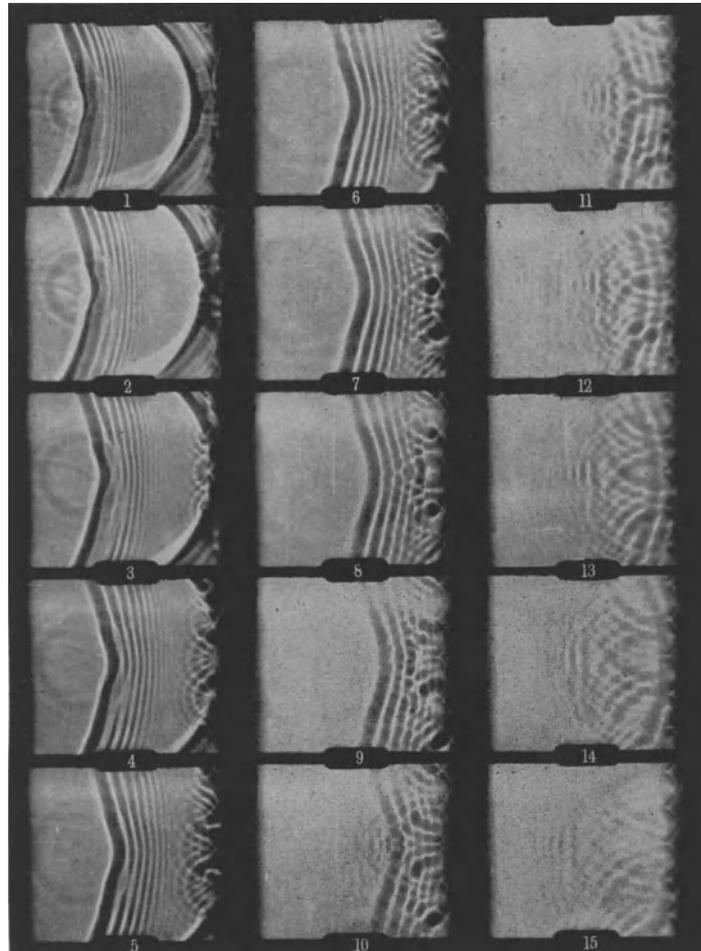
Rückwurf an Zahnleiste (Bildrand rechts). Zahnlänge 1 cm.

Abb. 59.



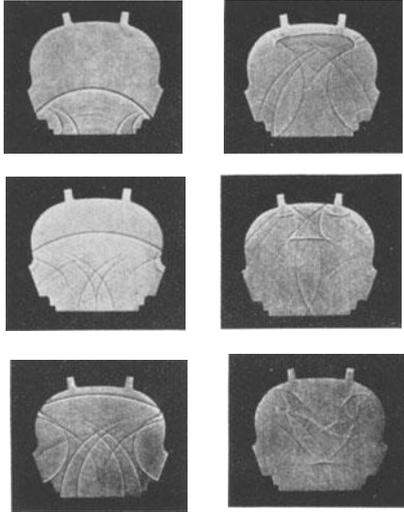
Rückwurf an Zahnleiste (Bildrand rechts). Zahnlänge 2 cm.

Abb. 60.



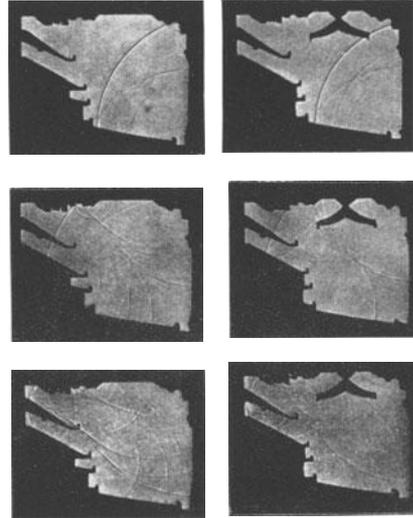
Rückwurf an Zahnleiste (Bildrand rechts). Zahnlänge 4 cm.

Abb. 65.



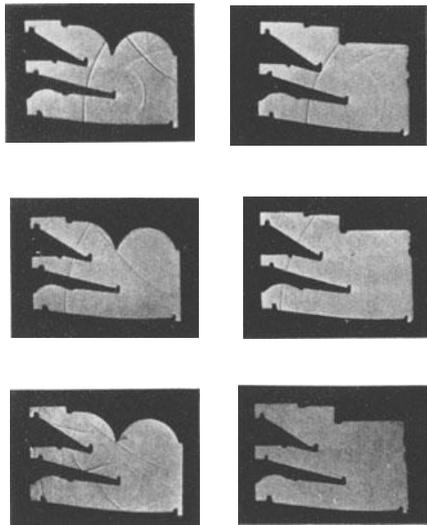
New Theatre, New York.

Abb. 66.



New Theatre, New York. Rechts mit Baldachin.

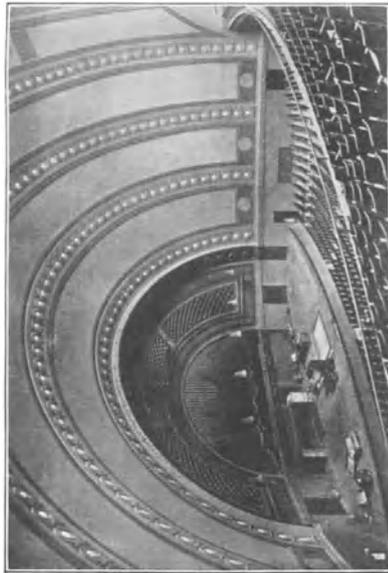
Abb. 68.



Scollay Square Theatre.  
Links Skizze, rechts endgültiger Entwurf.

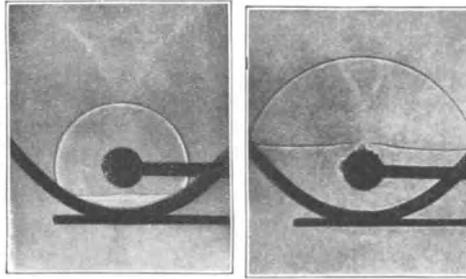
Michel, Hörsamkeit großer Räume.

Abb. 71.



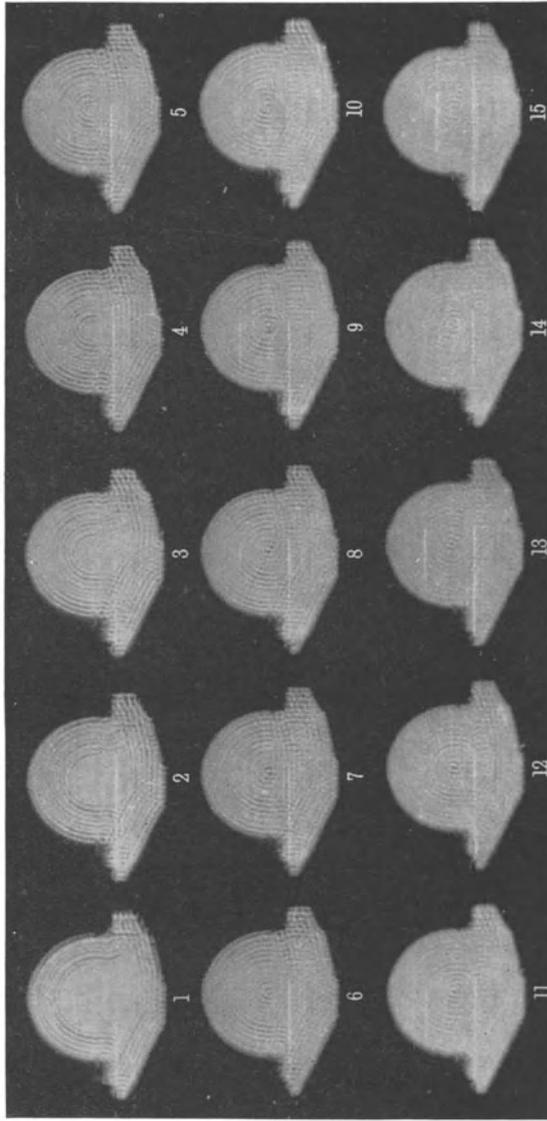
Hill Memorial Hall Michigan.

Abb. 72.



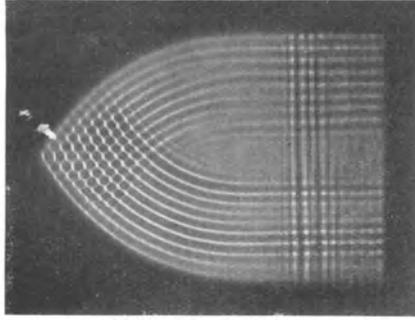
Rückwurf einer sphärischen Welle in parabolischem Spiegel.

Abb. 74.



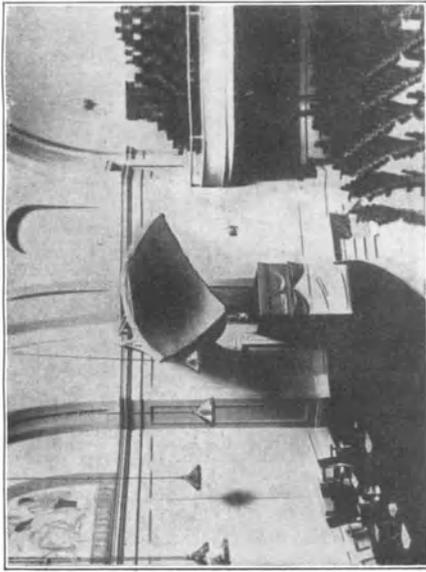
Stadthalle in Hannover. Längsschnitt. Mitschwingungen.

Abb. 73.



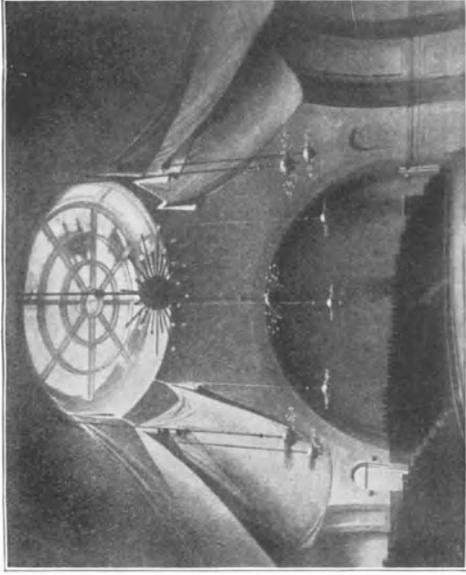
Mitschwingung bei Spitzbogen.

Abb. 82.



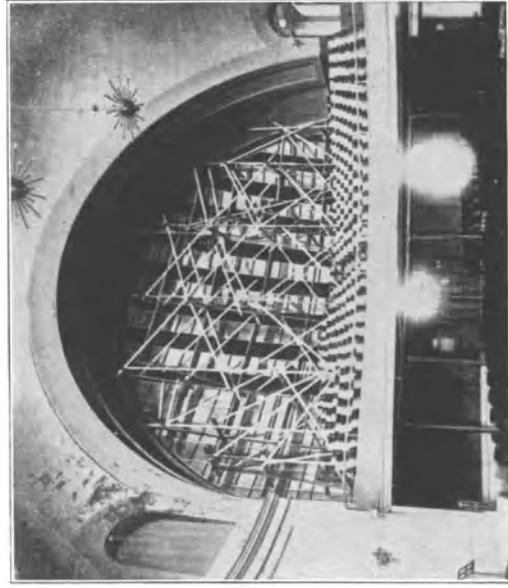
Schallreflektor.

Abb. 83.



Schalltrichter.

Abb. 84.



Wandverkleidung mit Filzstreifen.