

HEINRICH-HERTZ-INSTITUT FÜR SCHWINGUNGSFORSCHUNG
BERLIN-CHARLOTTENBURG

Technischer Bericht Nr. 96

Impulsmessungen in Freilufttheatern

von

Dipl.-Ing. Ralf Kürer

B e r l i n

1 9 6 8

Impulsmessungen in Freilufttheatern

Zusammenfassung:

In zwei Freilufttheatern - Epidauros in Griechenland und Wald-
bühne in Berlin - wurden Impulsmessungen vorgenommen. Sie dien-
ten der Ermittlung von Ausbreitungsgesetzen und der Untersuchung
von Zeitstrukturen der eintreffenden Schallsignale.

Die Ausbreitungsmessungen ergaben keine entscheidenden Abweichungen
vom theoretischen Entfernungsgesetz. Günstige geometrische Kon-
struktionen führen bei beiden Theatern zum Überwiegen der nütz-
lichen Schallanteile. In Epidauros ergeben sich durch die natür-
liche Mulde und die dadurch, bei sowieso geringem Wind, geschütz-
te Lage, sowie durch Fehlen von Verkehrsgeräuschen die Voraus-
setzungen zu möglichst störungsfreien Schallausbreitungsvorgän-
gen. Starke Überhöhungen der Zuschauerflächen führen zu sehr gün-
stigen Schalleinfallswinkeln.

Heinrich - Hertz - Institut für Schwingungsforschung
Berlin - Charlottenburg

Der Bearbeiter

Ralf Kürer
(Dipl.-Ing. Ralf Kürer)

Der Abteilungsleiter

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

Der Institutsdirektor

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

Berlin - Charlottenburg, den 24. Juni 1968



Inhaltsübersicht

Literaturverzeichnis	3
1. Einleitung	4
2. Vorliegende Berichte über die akustischen Verhältnisse in Epidauros	5
3. Ausbreitungsmessungen	6
3.1 Allgemeines	6
3.2 Angewandtes Meßverfahren	7
3.21 Schwankungserscheinungen	8
3.3 Ergebnisse der Ausbreitungsmessungen	10
4. Echogrammuntersuchungen	15
5. Subjektive Eindrücke	17
6. Abschließende Bemerkungen	18
7. Abbildungen	19

Literaturverzeichnis

- / 1 / Arnim von Gerkan
Wolfgang Müller-Wiener
Das Theater von Epidauros,
Kohlhammer-Verlag, Stuttgart 1961
- / 2 / U. Altop
Studienarbeit am Institut für
Technische Akustik, TU Berlin
1966
- / 3 / F. Canac
5^e Congres international
d'acoustique,
Liege (Belgique) 1964, G 13
- / 4 / F. Canac
IV. Budapesti Akusztikai Kon-
ferencia,
Budapest 1967 17 PL
- / 5 / B. Papathanaso-
poulos
Proceedings of the Third In-
ternational Congress on
Acoustics
Vol. II Page 962
- / 6 / B. Papathanasopoulos
5^e Congres international
d'acoustique,
Liege (Belgique) 1965, G45
- / 7 / L. Cremer
Statistische Raumakustik,
Verlag Hirzel, Stuttgart 1961
§ 10
- / 8 / H. Sieg
Über die Schallausbreitung
im Freien und ihre Abhängig-
keit von den Wetterbedingun-
gen,
Elektrische Nachrichtentech-
nik, Bd. 17 Heft 9 (1940) S. 193

1. Einleitung

Wohl jedem in der raumakustischen Beratung tätigen Akustiker wird früher oder später die Frage gestellt, warum zu Zeiten, als die naturwissenschaftliche Forschung weniger fortgeschritten war als heute, so gute Räume zum Anhören von Musik und Sprache errichtet werden konnten. Sicher dauert es dann auch nicht mehr lange, und es wird der Vorschlag gemacht die Verhältnisse der antiken griechischen Theater zu kopieren.

Die Akustik der hier angesprochenen im Freien liegenden Rundtheater wird ja nicht nur von Laien als hervorragend bezeichnet. Es handelt sich bei diesen Bauten um Anordnungen, bei denen in meist natürlich vorhandenen Mulden konzentrische Zuhörerreihen ansteigend eingebettet liegen. Eine Seite der Mulde wird durch ein relativ niedriges Bühnenhaus mit Proszenium abgeschlossen. Bühnenhaus und Zuschauerreihen umschließen eine große, gut reflektierende Fläche, die Orchestra. Anordnungen dieser Art führen, für den Fachmann auch ohne Messungen sofort erkennbar, zu großer Deutlichkeit der dargebotenen Schallereignisse. Diese Deutlichkeit ist für Sprechdarbietungen wünschenswert - keinesfalls jedoch für das Anhören von Musik.

Ein weiterer Vorteil der Freilufttheater besteht darin, daß man ohne allzu große bauliche Erstellungskosten Anordnungen schafft, die einer sehr großen Personenzahl gestatten, an Aufführungen teilzunehmen. Deshalb werden Bauten dieser Art auch bei uns und den hier vorliegenden klimatischen Verhältnissen immer wieder errichtet. Es entsteht nun die Frage, ob man hier bei Übernahme aller wesentlichen Charakteristika der griechischen Theater ähnlich gute akustische Verhältnisse erreichen kann.

Das besterhaltene griechische Freilufttheater ist das 14 000 Plätze umfassende und in seiner heute wieder restaurierten Form im 2. Jahrhundert v. Chr. vollendete Theater von Epidauros.

Abbildung 1, die einem Buch von Arnim von GERKAN und Wolfgang MÜLLER - WIENER /1/ entnommen ist, zeigt das Theater ungefähr in dem Zustand, in dem man es heute besichtigen kann.

In diesem Theater wurden im Juli 1966 unter Leitung von Professor L. CREMER und unter Mitarbeit von G. PLENGE sowie des Berichters Messungen durchgeführt. Die Reise wurde mit dem Meßbus des Instituts für Technische Akustik der TU Berlin durchgeführt.

Vorbereitende und vergleichende Messungen wurden ebenfalls im Jahre 1966 in der Berliner Waldbühne im Rahmen einer Studienarbeit von Ugur ALTOP /2/ durchgeführt. Die Waldbühne hat Platz für etwa 24 000 Zuschauer und ist damit beträchtlich größer als das Theater von Epidauros. Dies wird in den beiden Bildern Abb. 2, einem Vergleich der Grundrisse, und Abb. 3, einem Vergleich der Querschnitte veranschaulicht.

Bei den hier beschriebenen meßtechnischen Untersuchungen handelt es sich um Impulsmessungen. Sie sollten zur Ermittlung der Schallausbreitungsverhältnisse und zur Beurteilung der zeitlichen Struktur der eintreffenden Schallereignisse benutzt werden.

2. Vorliegende Berichte über die akustischen Verhältnisse in Epidauros.

CANAC hat im Rahmen seiner umfangreichen Arbeiten über antike Theater die Wichtigkeit vom Zusammenwirken einer zeitlich sehr kurz nach dem Direktschall eintreffenden Bodenreflexion und von großen Schalleinfallswinkeln hervorgehoben. Über Berechnungen der diesbezüglichen Verhältnisse in Epidauros berichtete er 1965 auf dem V. ICA /3/ und 1967 in Budapest /4/.

Von PAPATHANASOPOULOS liegen nicht nur theoretische Betrachtungen, sondern auch Berichte über Messungen in Epidauros vor /5/ /6/. Er errechnete Isophonen (Kurven gleicher Lautstärke) für einen am Proszeniumsrande stehenden Sprecher und gibt an, daß diese meßtechnisch bestätigt werden konnten. Hierzu benutzte er, über einen Lautsprecher abgestrahltes, weißes Rauschen als Sendesignal und bestimmte die Lautstärke über ein Oktavfilter bei 1000 Hz Mittenfrequenz. Er nahm also an, daß die Richtcharakteristik des Lautsprechers bei 1000 Hz der des menschlichen Mundes entspricht und verglich Lautstärken die sich beim gesprochenen Wort ergeben mit denen, die er mit einem stationären Signal ermittelte.

Während allerdings zur Lautstärkeempfindung von kurzen Signalen nur die dicht dem Direktschall folgenden Reflexionen beitragen, überlagern sich bei Verwendung von Dauergemäuschen auch die späteren zu einem gemeinsamen Meßwert.

PAPATHANASOPOULOS berichtete außerdem über Sprachverständlichkeitsmessungen und über ein Klangecho von 395 Hz.

3. Ausbreitungsmessungen

3.1 Allgemeines

Bei Ausbreitungsmessungen mit der Impulsmethode werden Spitzenamplituden von Druckstößen in verschiedenen Entfernungen gemessen. Für den kugelförmig strahlenden Sender ergibt sich dabei ein Amplitudenverhältnis das umgekehrt proportional dem Abstandsverhältnis ist:

$$\hat{p}(r) = \hat{p}_0(r_0) \cdot \frac{r_0}{r} \tag{1}$$

Hierbei ist $\hat{p}(r)$ die Abhängigkeit der Spitzenamplitude des Druckes vom Abstand r .

Diese Gleichung formt man zweckmäßig um und gibt die Verhältnisse im logarithmischen Maß an:

$$20 \lg \frac{\hat{p}_0(r_0)}{\hat{p}(r)} = 20 \lg \frac{r}{r_0} \tag{2}$$

Bildet man die Differenz D dieser logarithmischen Maße. So erhält man aus der Nullabweichung einen Vergleich zwischen der wirklichen Entfernungsabhängigkeit des Schalldrucks und der erwarteten.

$$D = 20 \lg \frac{r}{r_c} - 20 \lg \frac{\hat{p}_0(r_0)}{\hat{p}(r)} \tag{3}$$

Negative Werte von D weisen auf eine stärkere Abnahme als mit $1/r$ hin, wie sie infolge von Dissipationsverlusten zu erwarten sind. Wind-, Temperatur- und Interferenzeinflüsse können dagegen sowohl negative als auch positive Werte von D hervorrufen.

Um eine Abschätzung der üblichen zusätzlichen Abnahmen zu erhalten, seien hier einige Werte angegeben. Der Dissipationseinfluß wurde gemäß Formel

$$\frac{m}{2} = 0,074 \frac{(f/\text{kHz})^2}{(\varphi/\%)^2} \quad \text{dB/m}$$

(siehe § 10 in /7/),

für die in Epidaurus maximal auftretende Entfernung von 70 m, für 2 Extremwerte der Luftfeuchtigkeit $\varphi = 30\%$ und $\varphi = 80\%$, wie sie bei den Aufführungen vorkommen können, und für eine Temperatur von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ berechnet.

φ	$f = 2\text{ kHz}$	4 kHz	8 kHz	} dB/70 m
30 %	0,7	2,8	11,2	
80 %	0,26	1,05	4,2	

Bei Aufführungen, die an Tagen mit erhöhter Luftfeuchtigkeit, also etwa nach Regen stattfinden, dürfte daher die Sprachverständlichkeit durch geringere Dämpfung der hohen Frequenzen, die besonders in den Konsonanten enthalten sind, verbessert sein.

Auch der Einfluß von Windgradienten auf die örtlich vorzufindende Schallintensität kann in einer Rechnung abgeschätzt werden. ALTOP /2/ hat ein Beispiel durchgerechnet bei dem er die absolute Windgeschwindigkeit $w_0 = 2\text{ m/s}$,

den Windgradienten $k = 0,5\text{ m/s/m}$ und einen mittleren Empfängerpunkt in 20 m Entfernung annahm. Er erhält erst Intensitätsveränderungen in der Größenordnung einiger Zehntel Dezibel, wobei so große Windgradienten üblicherweise nur sehr selten auftreten /8/. Intensitätsschwankungen, wie sie durch Linsenbildung bei Turbulenzballungen auftreten, sind dagegen um eine Größenordnung stärker. (s. auch 3.21 und /8/).

3.2 Angewandtes Meßverfahren

Bei den Messungen fanden Gaußtöne (s. Bild 4) mit folgendem Zeitverlauf Verwendung:

$$p(t) = \hat{p} \cdot e^{-\pi \left(\frac{t}{\Delta t}\right)^2} \cdot \cos 2\pi f_{\text{Tr}} t \quad (4)$$

Es wurden Trägerfrequenzen f_{Tr} von 500, 1000 und 2000 Hz mit unterschiedlichen Impulsdauern Δt von 1 bis 8 ms benutzt.

Außerdem standen Knallsignale von Pistolen zur Verfügung. (s. Abb. 5)

Diese erwiesen sich allerdings für die Ausbreitungsmessungen wegen ihrer geringen Amplitudenkonstanz als nicht brauchbar.

Die oben beschriebenen Gaußtöne wurden mit einer Folgefrequenz von etwa $1/2$ Hz von einem Tonband abgespielt (s. Abb. 6). Nach entsprechender Verstärkung wurden sie über ein Druckkammersystem mit angekoppeltem Röhrrchen abgestrahlt. Der Spitzenwert des Schalldrucks war dabei in 1 m Abstand etwa 120 dB (bezogen auf $2 \cdot 10^{-4}$ μ bar). Die Austrittsöffnung des Röhrrchens war senkrecht auf die Meßlinie gerichtet, so daß auch im ungünstigsten Fall in der Meßrichtung keine Abhängigkeit von der Richtcharakteristik des Senders auftreten konnte. Die Strahlerhöhe betrug 1,60 m. Das Sendesignal wurde entweder von einem Mikrofon in konstantem Abstand empfangen, verstärkt und auf den Kanal B eines Zweistrahloszillografen gegeben, oder Kanal B wurde parallel zum Eingang des Druckkammersystems geschaltet. Das hier empfangene Signal löste die Zeitablenkung des Oszillografen aus. Das von Kanal A empfangene Signal eines ortsveränderlichen Mikrofons erschien dann um die Zeit t , entsprechend dem Laufzeitunterschied r/c (c = Schallgeschwindigkeit) später auf dem Oszillografenschirm. Die Entfernung r zwischen Sender und Empfänger wurde durch Auswertung dieser Verzögerungszeit oder durch eine direkte Entfernungsmessung ermittelt. Wenn man nun durch Kontrolle des Kanals B

das Sendesignal immer auf gleicher Höhe hielt und das an verschiedenen Orten empfangene Signal von Kanal A durch veränderte Verstärkung (Verstärker V 76 in 6 dB-Stufen, Eichleitung in 0,1 dB-Stufen) auf gleiche Höhe brachte, so hatte man die Möglichkeit, aus den unterschiedlich eingestellten Verstärkungen auf die unterschiedlichen Schalldruckamplituden zu schließen und daraus die Entfernungsabhängigkeit zu berechnen. Als Empfangsmikrofone wurden solche mit kugelförmiger Richtcharakteristik benutzt. Sie wurden in 1,20 m Höhe, also etwa Ohrhöhe aufgestellt.

3.21 Schwankungserscheinungen

Bei Schallmessungen über größere Entfernungen treten unvermeidliche Schwankungen der Amplituden auf.

Bei unseren Messungen wurde das Oszillographenbild nach Augenschein auf möglichst gute Amplitudengleichheit von Meßimpuls (Kanal A) und Vergleichsimpuls (Kanal B) eingestellt. Anschließend wurde aus 10 oder mehr aufeinanderfolgenden Messungen der arithmetische Mittelwert der schwankenden Amplitude in Kanal A festgestellt. Wichtiger als dieser vom Sollwert (Amplitude Kanal B) ab, so wurde dies später in der Auswertung entsprechend berücksichtigt.

Diese Schwankungen werden nicht allein durch Windeinflüsse hervorgerufen. Dies soll an Hand der nächsten Bilder von Messungen in Epidauros demonstriert werden. Abb. 7 und Abb. 8 zeigen Auftragungen der relativen Amplituden über Vielfachen der zeitlichen Impulsabstände. Während bei den Messungen für Abb. 7 dem subjektiven Eindruck nach völlige Windstille herrschte, wurden bei Messungen für Abb. 8 die in dem Diagramm angezeigten Windverhältnisse ermittelt. Der Pfeil deutet dabei die Windrichtung, jedes Fähnchen einen Wert von 1 m/s des Windes an.

Daß in Abb. 8 kaum eine Beziehung zwischen Wind- und Amplitudenverhältnissen zu erkennen ist, kann nicht verwundern. Für die Amplitudenschwankungen sind ja nicht nur die absoluten Windverhältnisse am Meßort, sondern auch die durch Windgradienten und durch Turbulenzballungen unterwegs entstehenden Schallablenkungen verantwortlich. Zu solchen Veränderungen der Schallbahnen kann es aber auch durch Temperatureinflüsse kommen, so daß damit die auch bei völliger Windstille auftretenden Schwankungen ihre Erklärung finden.

Während es jedoch in beiden Fällen zu etwa gleichen Erhöhungen (etwa 2 dB) der Schallamplituden kommt, zeigen sich bei vorhandenem Wind häufiger abgeschwächte und auch absolut schwächere Werte. Bei einem Vergleich der beiden Meßreihen in einem Diagramm der Summenhäufigkeiten der relativen Amplituden (s. Abb. 9) erkennt man für die Messungen bei Windstille aus der fast symmetrisch um den arithmetischen Mittelwert liegenden Kurve, daß die erhöhten Amplituden fast ebenso häufig sind wie die abgeschwächten, während unter Windeinfluß die abgeschwächten ganz eindeutig überwiegen.

Während des Zeitraumes in dem unsere Untersuchungen in Epidauros stattfanden, traten Windverhältnisse, wie sie für Abb. 9 zutreffen, nur sehr selten und dann auch nur stundenweise über Mittag auf. Die meiste Zeit war es windstill, bzw. es traten sehr niedrige Windgeschwindigkeiten von unter 1,5 m/s auf. Über Mittag wurden Temperaturen von 32 °C im Schatten und relative Luftfeuchtigkeiten von 28% gemessen.

Anders sieht es mit den Windverhältnissen in der Waldbühne aus. Hier ist eine ständige Brise eher die Regel, und es gelang uns nur einmal, einen Tag relativer Windstille für unsere Messungen auszunutzen.

3.3 Ergebnisse der Ausbreitungsmessungen

Die Messungen in Epidauros wurden am frühen Morgen von 5 bis 9 Uhr und am Abend nach 19 Uhr durchgeführt. Zu anderen Zeiten waren die Störgeräusche durch andauernden Touristenbesuch zu groß. In den von uns ausgenutzten Zeiten waren noch immer Störgeräusche in der Größenordnung von 33 dB(A) am Morgen und 40 dB(A) am Abend vorhanden. Ähnliche Werte werden von Papathanasopoulos bei seinen Messungen angegeben /6/. Das erhöhte Störgeräusch am Abend kam vorwiegend durch intensives Grillenzirpen zustande.

In Abb. 10 werden die von uns untersuchten Sender- und Empfängerpositionen angegeben. Abb. 11 zeigt die entsprechenden Anordnungen beim Messen in der Waldbühne. Hier wurden die Untersuchungen im wesentlichen auf die Mittellinie beschränkt.

In den folgenden Tabellen werden die Entfernungen zwischen Sende- und Empfangsplätzen, r , sowie die zeitliche Differenz zwischen Direktschall und Bodenreflexion Δt_1 , für die beiden untersuchten Theater angegeben.

Tabelle I Epidaurus

Sende- punkt	Empfänger- punkt	Entfernung r /m	zeitl. Differenz Δt_1 /ms
A	1	2	5,2
	1	4	2,9
	2	10	1,16
	3	12,4	0,87
	4	25	2,9
	5	39,5	3,76
	6	42,4	4,06
	7	51,6	4,54
8	60,3	4,93	
B	1 _m	2	5,2
	3 _m	23,2	0,58
	4 _m	36,1	1,74
	5 _m	50,4	2,03
	6 _m	53,6	2,32
	7 _m	62,4	2,61
	8 _m	70,5	2,9

Tabelle II Waldbühne

Sendepunkt	Empfängerpunkt	Entfernung r/m	zeitl. Differenz Δt_1 /ms
A	1	1,6	5,88
	2	14,3	1,1
	3	24,5	1,57
	4	40	1,89
	5	42,1	2,23
	6	55	2,16
	7	65,5	2,41
	8	68,6	2,49
	9	81,5	2,68
B	1	17	1,82
	2	34	1,24
	3	43,5	2,21
	4	57,8	3,00
	5	61,2	3,70
	6	68,6	3,76
	7	85	4,31
	8	91,7	4,86

Man kann den Tabellen entnehmen, daß der Laufzeitunterschied zwischen Direktschall und Bodenreflexion z. T. in der Größenordnung der benutzten Impulslängen liegt.

In Abb. 12 werden Meßergebnisse für Epidauros angegeben. Es handelt sich um Ausbreitungsmessungen bei Schallanregung in der Mitte der Orchestra mit Gaußtönen von 2 kHz Trägerfrequenz und 2 ms Impulsdauer. Die Größe D ist noch einmal formelmäßig angegeben und es bedeutet, wie bereits erwähnt, positives D eine schwächere, negatives D eine stärkere Abnahme des Schalldrucks als es dem Entfernungsgesetz entspräche.

Durch Schraffur ist der Bereich gekennzeichnet, in dem es, bei den verwendeten Impulsen von 2 ms Länge, noch zu nennenswerten Amplitudenüberhöhungen infolge von Interferenzen zwischen Direktschall und Bodenreflexion kommen kann. Werden zwei Gaußtöne gleicher Amplitude aber mit zeitlicher Verschiebung gegeneinander linear überlagert, so kann man den resultierenden Zeitverlauf wie folgt schreiben:

$$p(t) = \hat{p} e^{-\pi \left(\frac{t}{\Delta t}\right)^2} \left[\cos 2\pi f_{Tr} t + e^{-\frac{\tau^2 + 2\tau t}{\Delta t^2} \pi} \cos 2\pi f_{Tr} (t - \tau) \right] \quad (5)$$

Hierbei sind f_{Tr} und Δt wie in Formel (4) die Trägerfrequenz und Impulsdauer der Gaußtöne, während τ die zeitliche Verschiebung gegeneinander ist. Für die vorliegende Untersuchung genügt es Formel (5) bezüglich der Hüllkurvenüberlagerung im Zeitpunkt $t = 0$ auszuwerten, denn dadurch werden die maximal möglichen Überhöhungen erfaßt. Es ist dann:

$$\frac{p(0)}{\hat{p}} = 1 + e^{-\pi \left(\frac{\tau}{\Delta t}\right)^2} \quad (6)$$

In Abb. 13 ist der Verlauf dieser Funktion in logarithmi-

schem Maß in Abhängigkeit von veränderlichen Verhältnissen $\zeta/\Delta t$ angegeben. Ferner sind die zu berücksichtigenden Interferenzüberhöhungen für einige Meßpunkte in Epidauros angegeben. Dabei wurde die Impulsdauer der 2kHz Gaußstöne, also 2 ms, den Berechnungen zugrunde gelegt.

In Abb. 14 ist die gleiche Ausbreitungsmessung wie in Abb. 12 noch einmal dargestellt, allerdings unter Berücksichtigung der Impulsüberlagerung.

Für einen mittleren Meßpunkt (A 5_m) in Epidauros wurden vor und nach den verschiedenen Meßreihen zu unterschiedlichen Tageszeiten und bei unterschiedlichen Wind- und Temperaturverhältnissen Kontrollmessungen durchgeführt. Die dabei notierten Mittelwerte wurden noch einmal gemittelt. Es zeigte sich, daß dabei dieser Mittelwert genau mit dem rechnerischen Ausbreitungswert übereinstimmt. Die mittlere quadratische Abweichung betrug $\pm 0,6$ dB und sie ist ebenfalls in Abb. 14 eingetragen.

Man erkennt, daß die Abweichungen vom $1/r$ -Gesetz so gering sind, daß man nicht geneigt ist, hierin eine Erklärung für besondere akustische Verhältnisse zu suchen.

In Abb. 15 sind die Ergebnisse einer anderen Serie von Ausbreitungsmessungen in Epidauros dargestellt. Die Signale sind die gleichen wie vorher, nur der Sendepunkt und zum Teil die Meßlinien sind verändert. Eine Korrektur für die Bodenreflexion erfolgte nicht, da die geometrischen Beziehungen für die Seitenlinien kompliziert sind. Der Bereich, in dem es zu Überlagerungen kommt, ist angegeben. Hier sind die Abweichungen vom $1/r$ -Gesetz zwar größer als im vorigen Bild, aber doch auch hier nicht so groß, daß sie für eine Erklärung in Betracht gezogen werden müssen.

Die Ausbreitungsmessungen in der Waldbühne brachten erstaunlicherweise ebenfalls keine nennenswerten Abweichungen vom $1/r$ -Gesetz. Die Abweichungen der Ergebnisse liegen für das Gebiet der Zuschauerflächen in der Größenordnung von ± 2 dB.

4. Echogrammuntersuchungen

Die während der Ausbreitungsmessungen benutzten impulsförmigen Anregungssignale gestatten auch Untersuchungen der zeitlichen Struktur der Schallereignisse an den verschiedenen Empfängerplätzen. Diese Untersuchungen sind in der Raumakustik sehr verbreitet, und zur Veranschaulichung, wie verschieden die zeitliche Struktur solcher Echogramme sein kann, werden in Abb. 16 die Echogramme von drei verschiedenen Theatern gezeigt. Es wird der linear registrierte Druckverlauf über der Zeit dargestellt. Die zeitliche Auflösung beträgt 15 ms/Teilung. Man sieht, daß am Ende des gezeigten Bereiches in den Freilufttheatern das Schallereignis weitgehend beendet ist, während in der Philharmonie auch nach 150 ms noch Reflexionen aus der in geschlossenen Räumen auftretenden Nachhallschleppe herausragen.

Es ist allgemein üblich anzunehmen, daß alle Schallereignisse, die innerhalb eines Zeitraumes von 30 - 50 ms nach dem Direktschall eintreffen, vom Ohr mehr oder weniger integriert werden und damit zu einer Lautstärkeerhöhung führen. Auf jeden Fall kann man sagen, daß starke Reflexionen in diesem Bereich zu einer guten Deutlichkeit der Schallereignisse beitragen, während alle Reflexionen, die später als 100 ms nach dem Direktschall eintreffen, und die dabei in der Amplitude über der durch den Nachhall gegebenen Hüllkurve liegen, als Störungen z. B. durch Minderung der Deutlichkeit oder sogar als Echos in Erscheinung treten.

In den folgenden Bildern werden von den in Abb. 10 und 11 angegebenen Sender- und Empfängerkombinationen in Epidauros und der Waldbühne in einer Übersicht Echogramme gezeigt. In Epidauros erkennt man deutlich (s. Abb. 17 und 18), daß starke Reflexionen nur im Bereich der ersten 30 ms auftreten. Sie rühren vom Boden der Orchestra den Resten der Szene und den nächsthöher gelegenen Stufen her. In allen Fällen in denen hiervon Ausnahmen zu erkennen sind, kommen die Reflexionen von Stellen, die bei den Aufführungen durch Publikum besetzt sind.

Auch die in den Bildern B 4_m bis B 8_m etwa 65 ms nach dem Direktschall erkennbaren starken Reflexionen treten bei den Aufführungen nicht auf, da sie von den Resten des, früher gemauerten, Bühnenhauses herrühren. Bei heutigen Aufführungen wird aber mit einer mobilen Holzkulisse gearbeitet, wie sie in Abb. 19 zu erkennen ist.

Man achte darauf, daß es infolge von Windeinflüssen ohne weiteres zu Bodenreflexionen kommt, die stärker sind als der Direktschall. In Abb. 20 wird eine Serie von Echogrammen gezeigt. Sie sind alle in gleicher Sender-Empfängerposition in einem Zeitraum von 2 Minuten bei Windgeschwindigkeiten am Empfängerplatz von bis zu 6 m/s aufgenommen worden. Wie man sieht, besteht also ohne weiteres die Möglichkeit, daß der Lautstärkeindruck infolge der Integration durch das Ohr von Direktschall und frühen Reflexionen, trotz Schwankungen der Teilereignisse konstant bleibt.

In Abb. 21 werden Echogramme aus der Berliner Waldbühne gezeigt. Es handelt sich hier um Verläufe, die sich bei einer Knallanregung ergaben, wobei im Empfangsteil ein Oktavfilter von 2000 Hz Mittenfrequenz eingeschaltet war. Eine Rasterteilung auf den Bildern entspricht jetzt 30 ms.

Man erkennt auch auf diesen Bildern, daß es durchweg zu starken, zeitlich günstig liegenden Bodenreflexionen kommt. Sie werden wie in Epidauros durch die große Orchestra begünstigt, und es scheint im Frequenzbereich der Untersuchungen unwesentlich zu sein, daß diese Fläche in Epidauros aus hartgestampften Lehm Boden und in der Waldbühne durch einen Rasen gebildet wird. Man sieht aber auch, daß es in diesem Theater zu späteren Reflexgruppen kommt. Sie rühren von, anscheinend nach der ursprünglichen Errichtung hinzugefügten, Seitentritten hinter der Bühne und von Begrenzungsflächen neben der Bühne her. Da dieses Freilufttheater i. a. sowieso elektroakustisch beschallt wird, sind diese Rückwürfe nicht kritisch, denn der Lautsprecherschall kann ja als Stützreflexion im Bereich zwischen früheren und späteren Rückwurfgruppen vorgesehen werden.

Zum Abschluß der Betrachtungen über die Zeitstrukturen seien noch zwei Echogramme gezeigt (Abb. 22), die das Phänomen des sogenannten Klangechos in den beiden untersuchten Theater darstellen. Durch die Sitzbankanordnung kommt es

zu periodischen Rückwürfen, die besonders stark wahrgenommen werden, wenn man sich im geometrischen Mittelpunkt der konzentrischen Sitzreihen befindet. Es entsteht dabei der Eindruck eines Klanges. Da die Sitzreihen den gleichen Abstand d haben, folgen die Rückwürfe mit einer zeitlichen Periode $2d/c$ (c = Schallgeschwindigkeit) entsprechend einer Grundfrequenz von $c/2d$ Hz. In Epidauros ist die von uns festgestellte Frequenz des Klangechos 230 Hz. Dies entspricht auch dem rechnerischen Wert, wenn der Stufenabstand von 75 cm eingesetzt wird. In der Waldbühne müssen die drei unterschiedlichen Neigungen der Zuschauerflächen berücksichtigt werden. Man empfindet dort auch tatsächlich einen Klang der sich aus drei nacheinander aintreffenden Tönen mit Frequenzen zwischen 210 und 230 Hz zusammensetzt.

5. Subjektive Eindrücke

Wenn man Messungen in einem Freilufttheater innerhalb der mediterranen Klimazone durchführt, so wird man dies sicher nicht im Monat Juli, also in der heißesten Jahreszeit tun, es sei denn, man will an den auch heute noch in Epidauros stattfindenden Aufführungen teilnehmen. Wie uns vom Regisseur des griechischen Nationaltheaters, Herrn Minotis, mitgeteilt wurde, können die Aufführungen nur in den Sommermonaten durchgeführt werden, da selbst bei den dortigen Temperaturen ein stundenlanges Ausharren auf den Steinbänken zu anderen Jahreszeiten nicht zumutbar ist.

Zur subjektiven Beurteilung kann folgendes gesagt werden: die Aussage über eine ausreichende Lautstärke ist unvollständig, wenn nicht gleichzeitig über den vorliegenden Störpegel berichtet wird. Erst dadurch, daß dieser in Epidauros sehr niedrig ist und zwar dies sowohl klimatisch (kein Windrauschen), als auch lagebedingt (kein Verkehrslärm s. 3.3), kommt es zu einem in freier Natur nur selten beobachteten Klangerlebnis. Die durch diese Kombination, aber auch durch Anordnung des Theaters in der Mulde erzielten, fast störungsfreien und idealen Ausbreitungsbedingungen, scheinen die einzigen wesentlichen Eigenschaften der

antiken griechischen Theater zu sein, die nicht überall hin verpflanzbar sind.

Die große Deutlichkeit der dargebotenen Schallereignisse kann nach den Echogrammuntersuchungen auch nicht mehr überraschen. Sie ist allerdings, wie nicht anders zu erwarten, Schwankungen unterworfen je nach Platz der Sprecher auf der Orchestra. Außerdem führen Sprecherplätze im publikumsnahen Teil der Orchestra nicht nur zu verschleppten Bühnenwandreflexionen, sondern auch infolge der dann streifender einfallenden Bodenreflexion zu deutlich erkennbaren Abnahmen der Lautstärke.

6. Abschließende Bemerkungen

Zusammenfassend kann bemerkt werden, daß sich die Impulsmethode zur Untersuchung von akustischen Verhältnissen in Freilufttheatern gut bewährt hat. Als störend erwies sich lediglich die Überlagerung der sehr dicht folgenden Bodenreflexion. Diese könnte jedoch bei aufwendigeren Untersuchungen vermieden werden. Schwankungen infolge von veränderlichen Umweltbedingungen konnten berücksichtigt werden. Hierbei zeigte es sich, daß durch unsymmetrische Verteilungskurven die benutzten arithmetischen Mittelwerte nur in Fällen von geringen klimatischen Störungen mit den häufigsten Amplitudenwerten übereinstimmten.

Die Ausbreitungsmessungen ergaben keine entscheidenden Abweichungen vom $1/r$ -Gesetz. In beiden Theatern fallen die Rückwürfe vom Boden so günstig ein, daß es zu Erhöhungen der Lautstärke kommt. In Epidauros treten keine späten Reflexionen auf, so daß bedingt durch die geometrische Konstruktion des Theaters sehr große Deutlichkeit der Schallvorgänge vorhanden ist. Die in Epidauros gleichzeitig klimatisch und lagebedingten sehr geringen Geräuschpegel, sowie der durch starke Überhöhung der Zuschauerplätze große Schalleinfallswinkel erlauben, auch noch über die großen Entfernungen eines Freilufttheaters, gutes Verfolgen der Schallvorgänge im Bühnengebiet.

Abschließend sei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung bei der Durchführung der Untersuchungen gedankt.

Herrn Tonmeister G. Plenge, dessen große Erfahrung bei elektroakustischen Meßverfahren dem glatten Ablauf der Messungen sehr förderlich war, sei Dank für die sehr produktive Zusammenarbeit bei der Durchführung der Meßreise ausgesprochen.



Abb. 1 Ansicht des Freilufttheaters in Epidauros

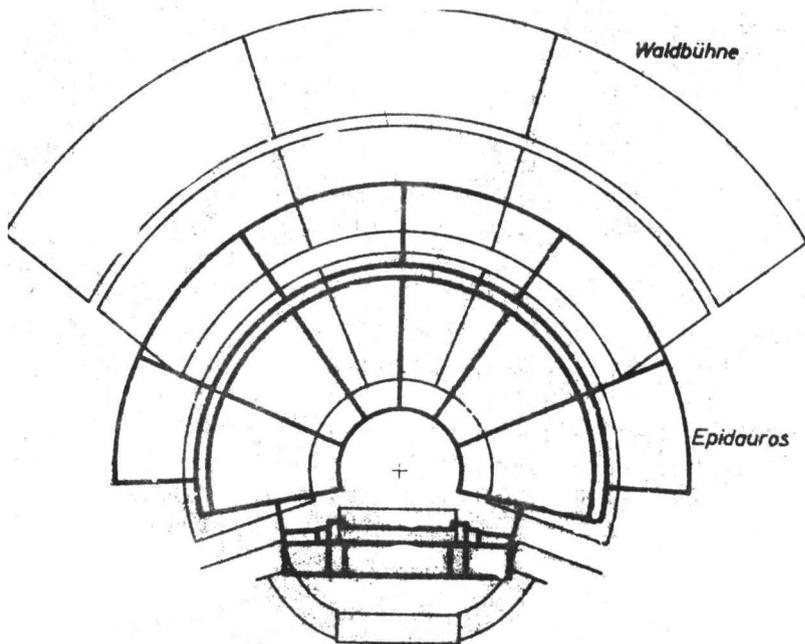


Abb. 2 Größenvergleich der Grundrisse
Epidauros - Berliner Waldbühne

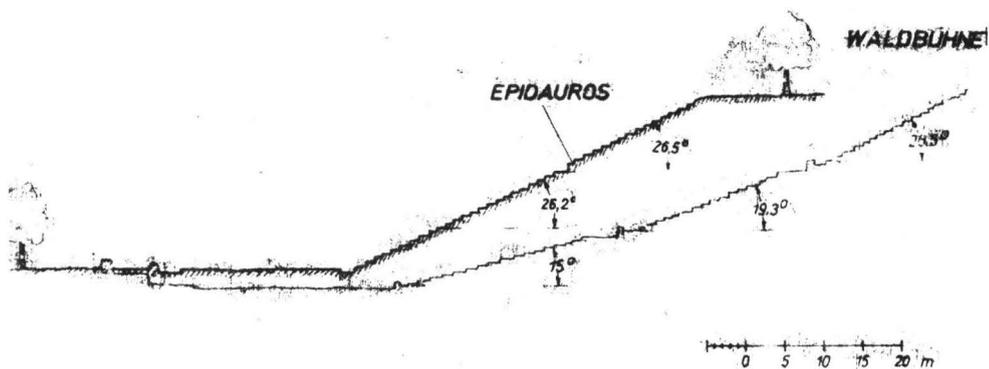


Abb. 3 Größenvergleich der Querschnitte
Epidauros - Berliner Waldbühne

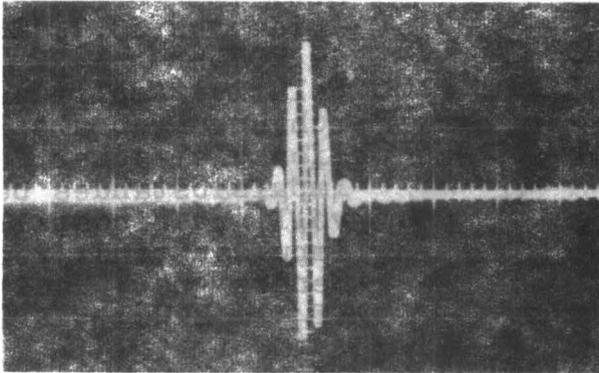


Abb. 4 Druck-Zeit-Verlauf:
Gaußton
Trägerfrequenz $f_{Tr}=2\text{kHz}$
Impulsdauer $\Delta t=2\text{ms}$
2 ms/Teilung

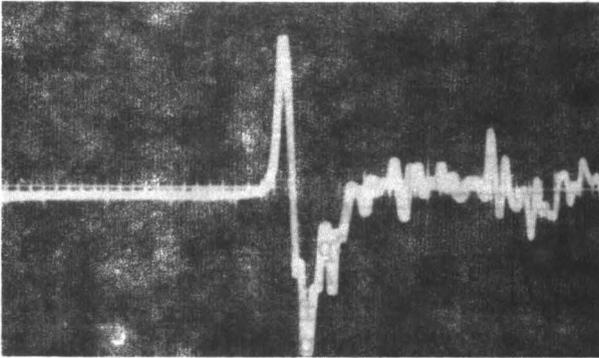


Abb. 5 Druck-Zeit-Verlauf
Schuß
0,5 ms/Teilung

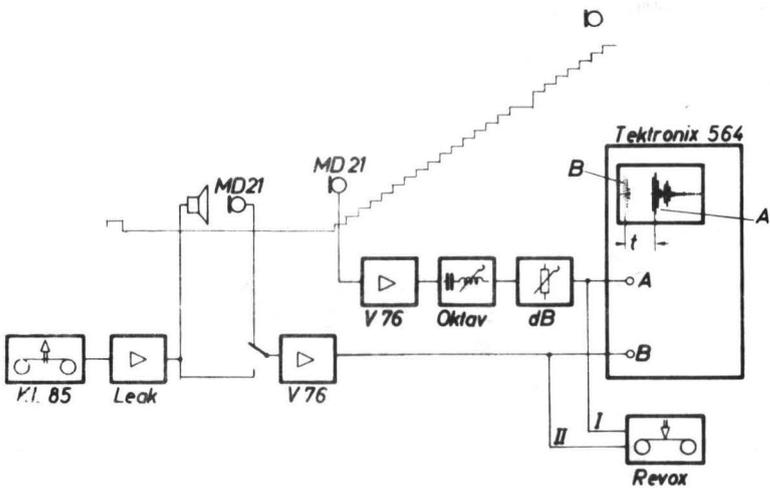


Abb. 6 Meßanordnung für Schall-
ausbreitungsmessungen
mit der Impulsmethode

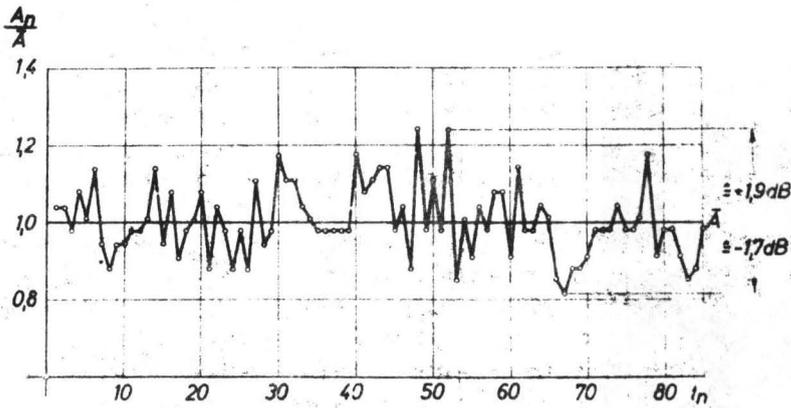


Abb. 7
Epidauros 29.7.1966
19.20 Uhr.
Relative Amplitudenschwankungen als Funktion Vielfacher des Impulsabstandes bei völliger Windstille. Impulsabstand: 2 sec Sendesignal: Gaußton ($f_{Tr} = 2\text{kHz}; \Delta t = 2\text{ms}$).

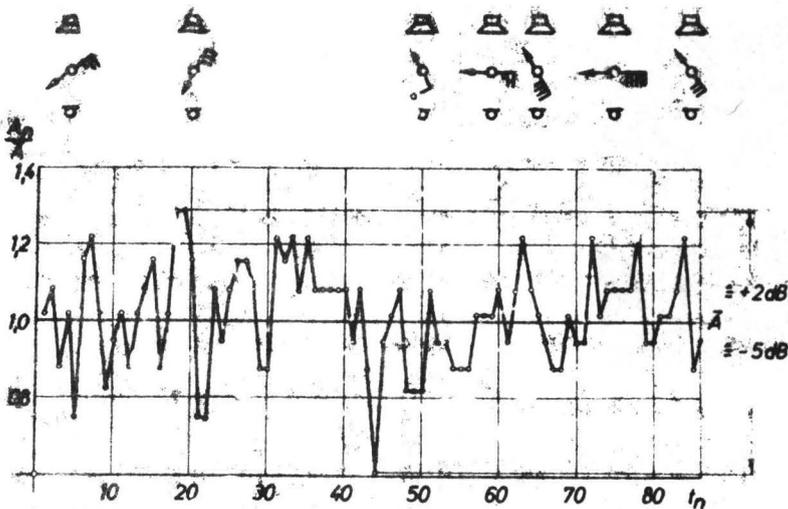


Abb. 8
Epidauros 28.7.1966
14.30 Uhr
Auftragung und Anordnung wie in Abb. 7. Wind von 1 - 6 m/s (jedes Fähnchen entspricht 1 m/s; Pfeil zeigt Windrichtung).

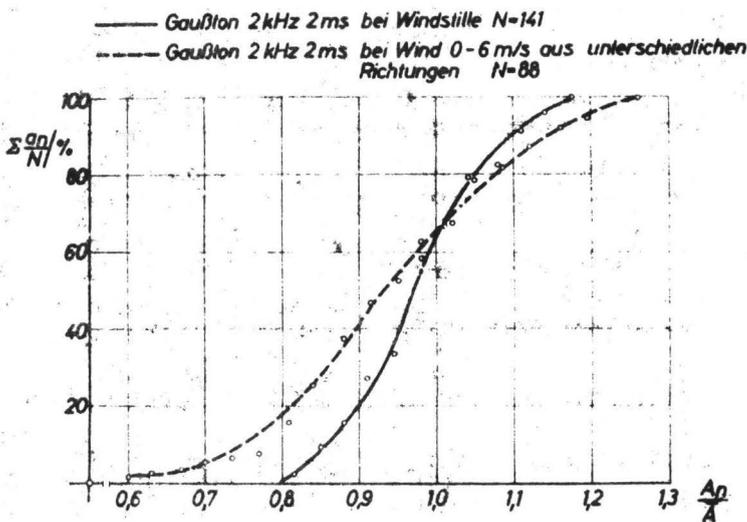


Abb. 9
Summenhäufigkeit der relativen Schalldruckamplitude.

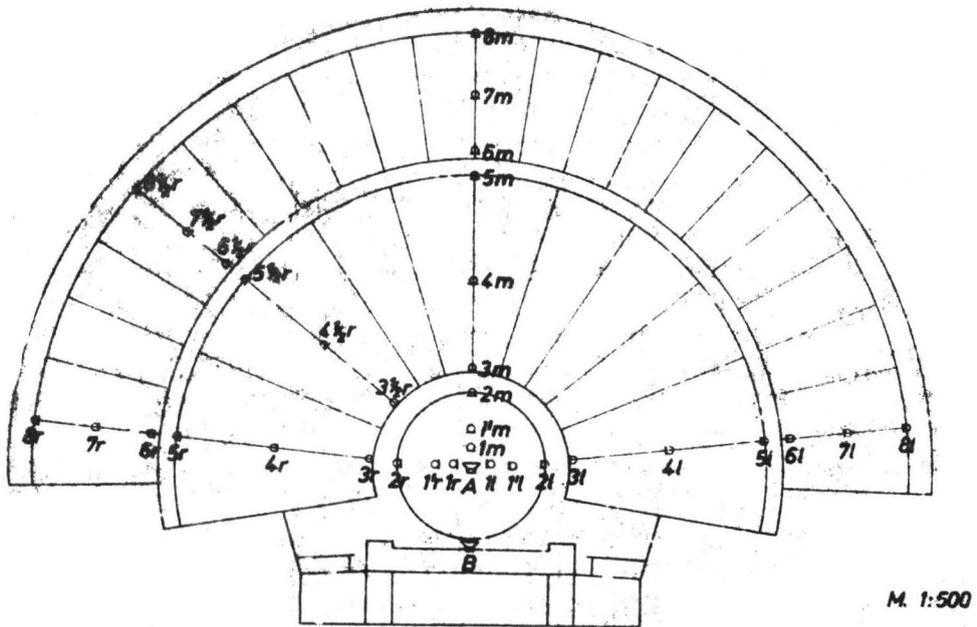


Abb. 10
Sende- und Empfangspunkte in Epidauros

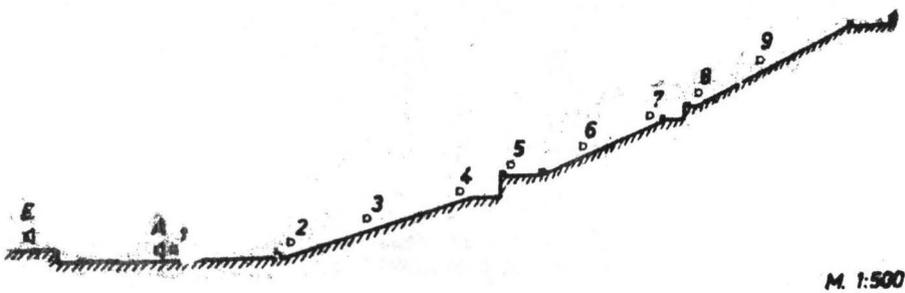


Abb. 11
Sende- und Empfangspunkte in der Berliner
Waldbühne

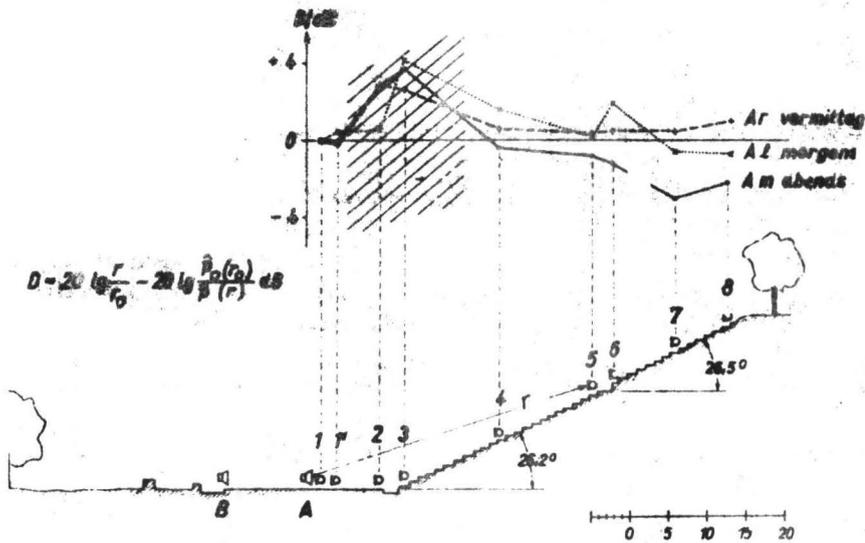


Abb. 12
Epidauros; Ausbreitungsdämpfung D für Sendepunkt A. Sendesignal: Gaußton mit $f_{Tr} = 2\text{kHz}$; $\Delta t = 2\text{ms}$.

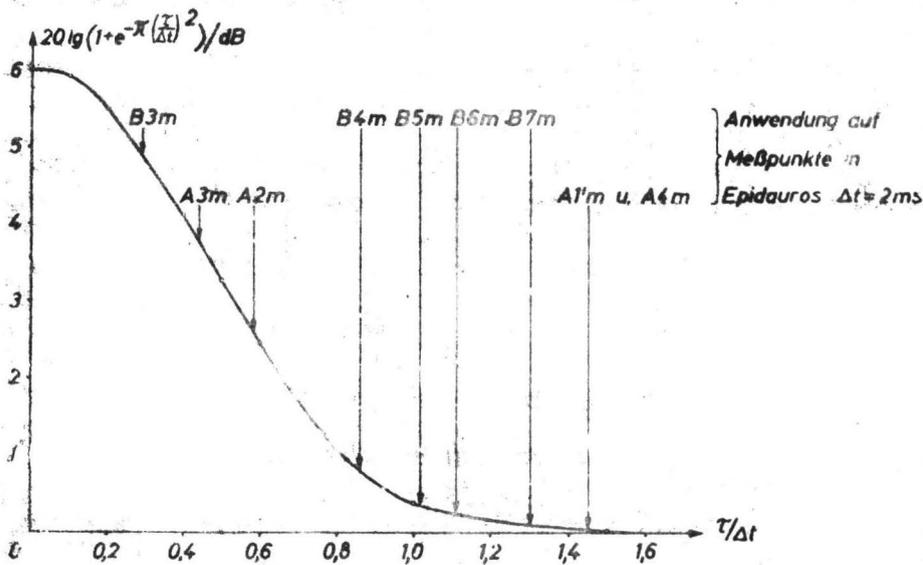


Abb. 13
Relative Amplitudenanhebung durch Überlagerung von 2 gleich großen, aber zeitlich verschobenen Gaußimpulsen und Anwendung auf Meßpunkte in Epidauros.

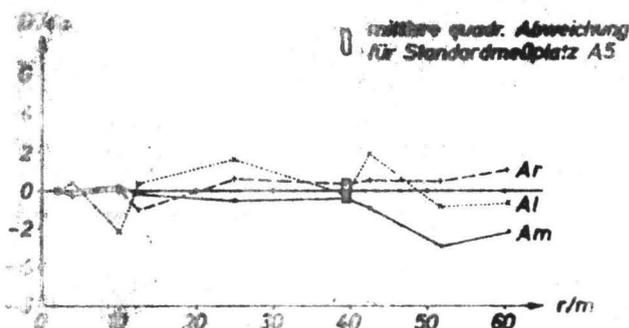


Abb. 14
Ausbreitungsdämpfung D' wie in Abb. 12 unter Berücksichtigung der Bodenreflexion gemäß Gleichung (6).

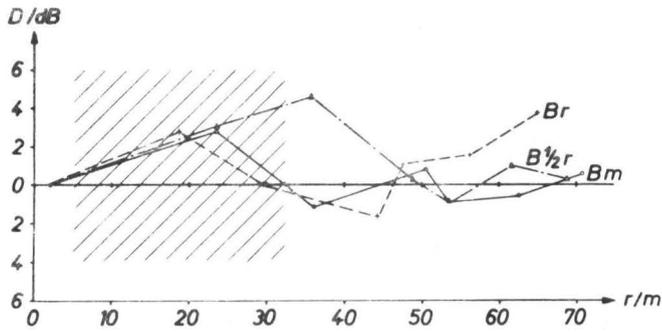
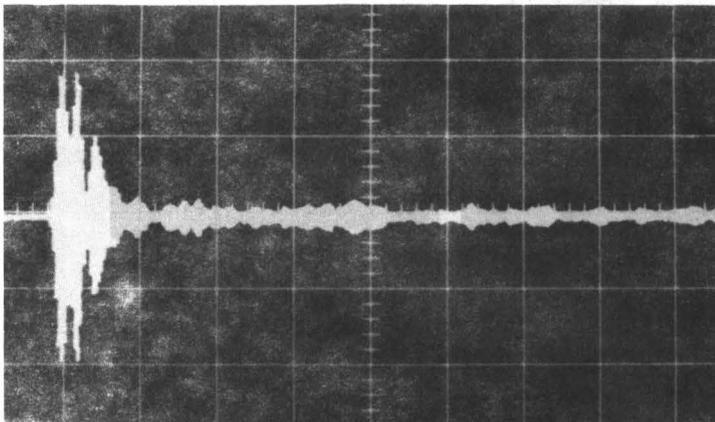


Abb. 15

Epidauros: Ausbreitungsdämpfung D für Sendepunkt B. Sendesignal: Gaußton mit $f_{Tr} = 2\text{kHz}$; $\Delta t = 2\text{ ms}$.



Epidauros

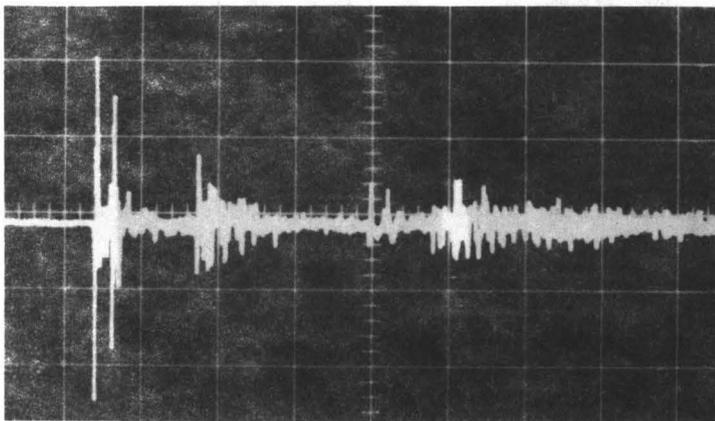
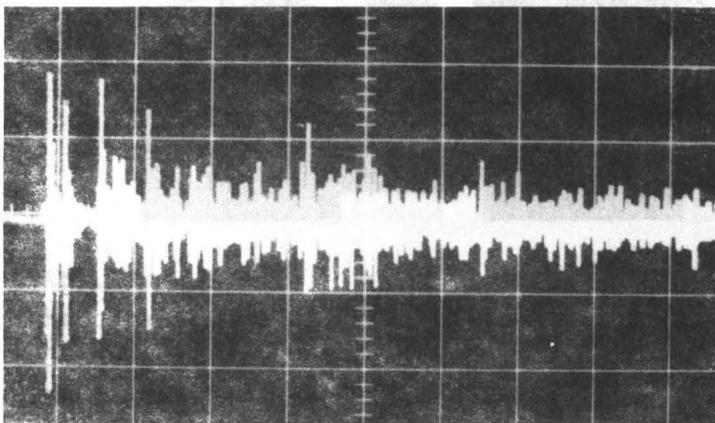


Abb. 16

Echogramme für etwa gleiche Sender - Empfängerentfernung (15 ms / Teilung)

Waldbühne, Berlin



Philharmonie, Berlin

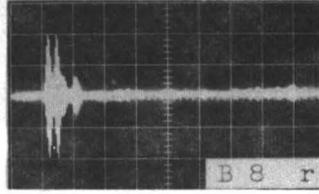
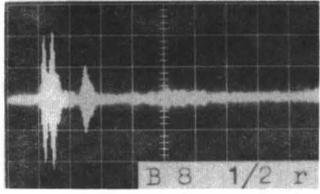
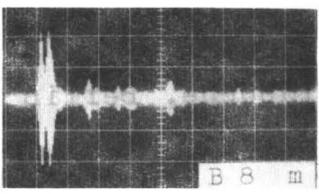
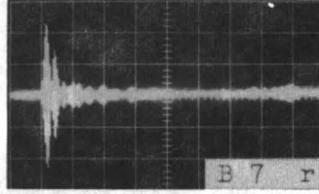
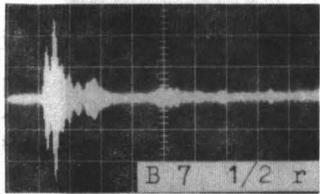
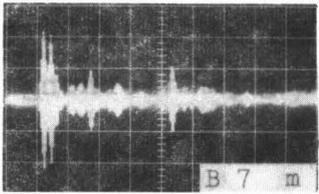
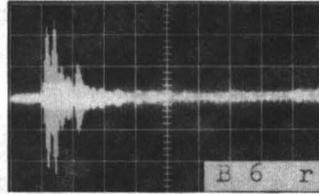
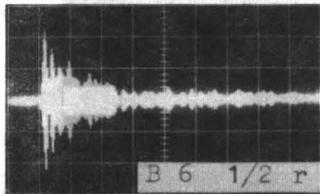
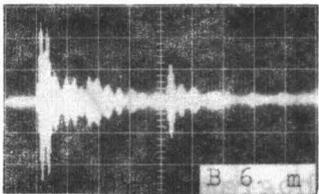
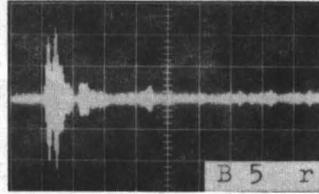
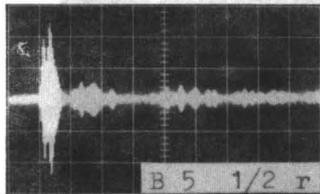
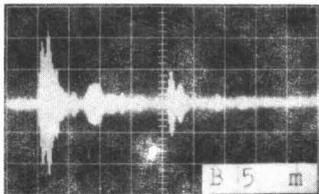
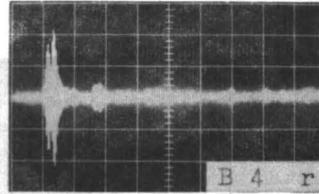
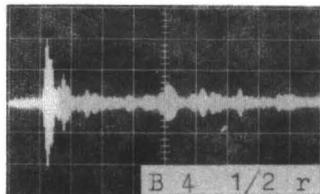
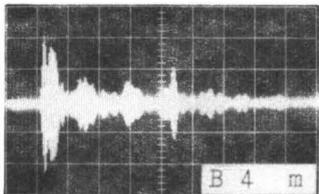
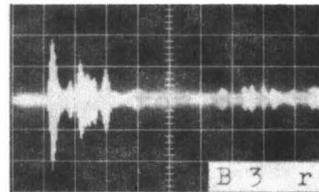
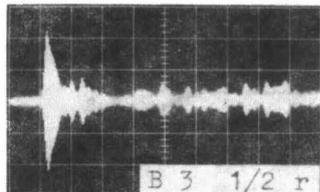
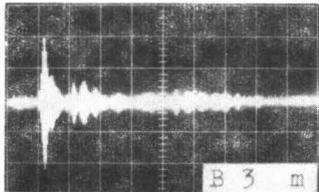
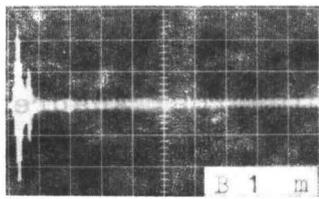


Abb. 17

Echogramme aus dem Freilufttheater in Epidauros
Sendepunkt B, 11 m von Arenamitte in Richtung
Bühne verschoben.

Sendesignal: Gaußton $f_{Tr} = 2 \text{ kHz}$; $\Delta t = 2 \text{ ms}$

Zeitmaßstab: 15 ms / Teilung

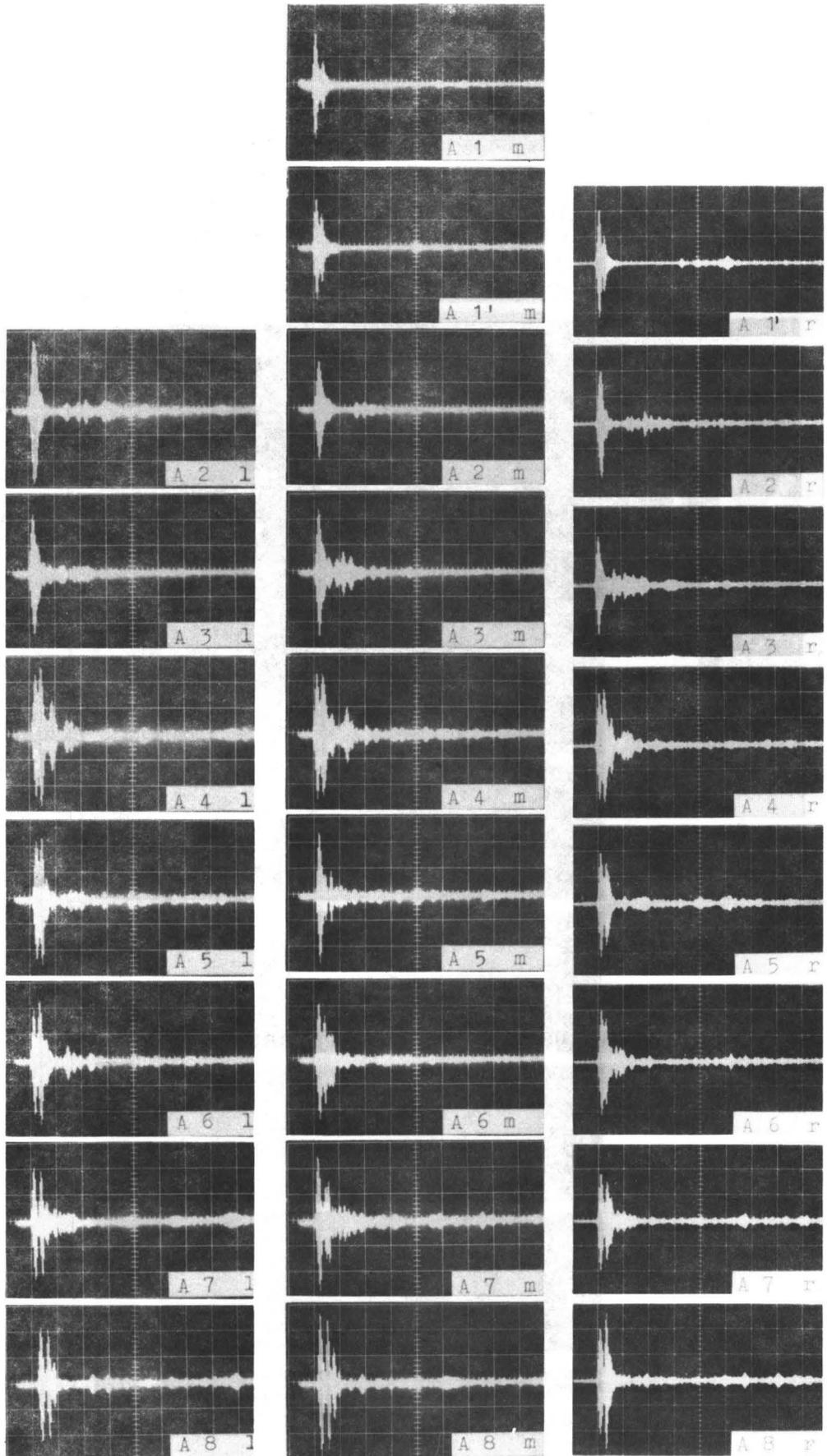


Abb. 18

Echogramme aus dem Freilufttheater in Epidauros
Sendepunkt A in Arenamitte

Sendesignal: Gaußton $f_{Tr} = 2 \text{ kHz}$; $\Delta t = 2 \text{ ms}$

Zeitmaßstab: 15 ms / Teilung

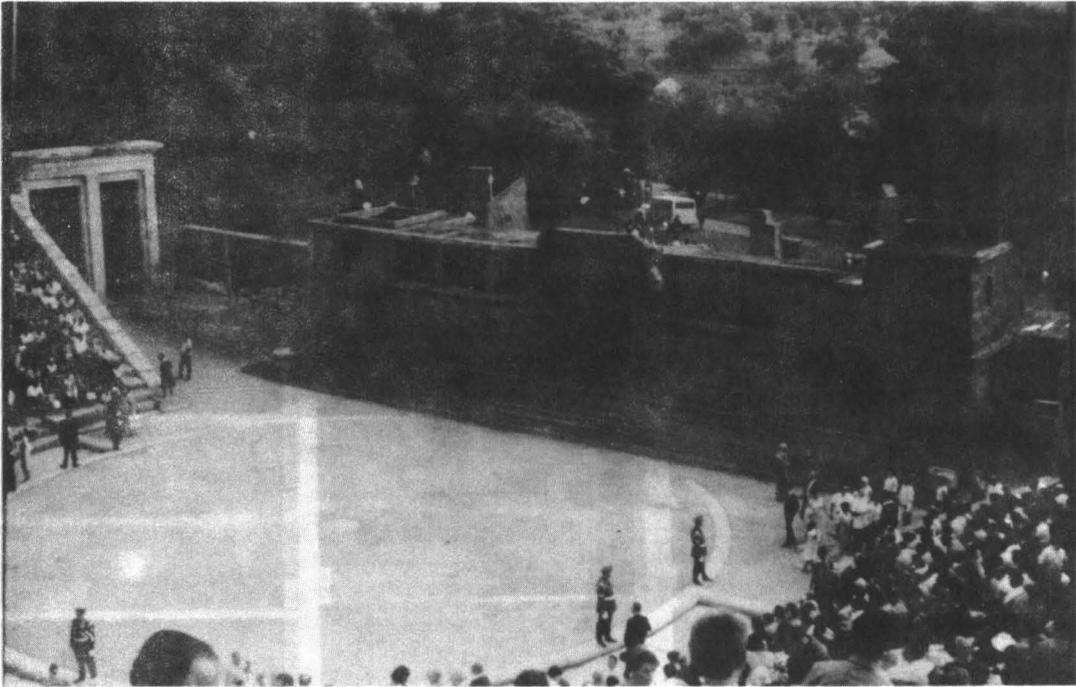


Abb. 19
Bühnenaufbauten in Epidauros

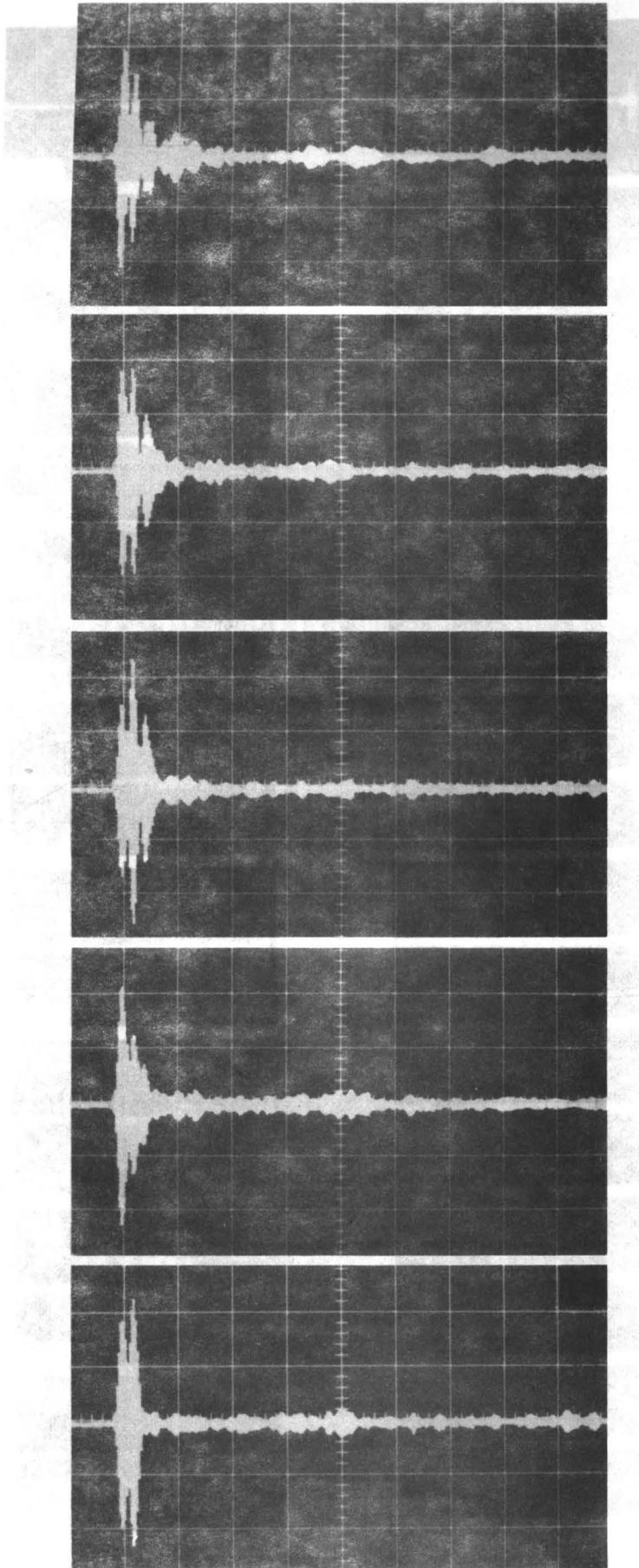


Abb. 20

Echogramme in Epidauros bei unterschiedlichen Windverhältnissen von bis zu 6 m/s.

Sende- und Empfangsanordnung gleichbleibend A 5_m

$f_{Tr} = 2 \text{ kHz}$; $\Delta t = 2 \text{ ms}$; 15 ms / Teilung

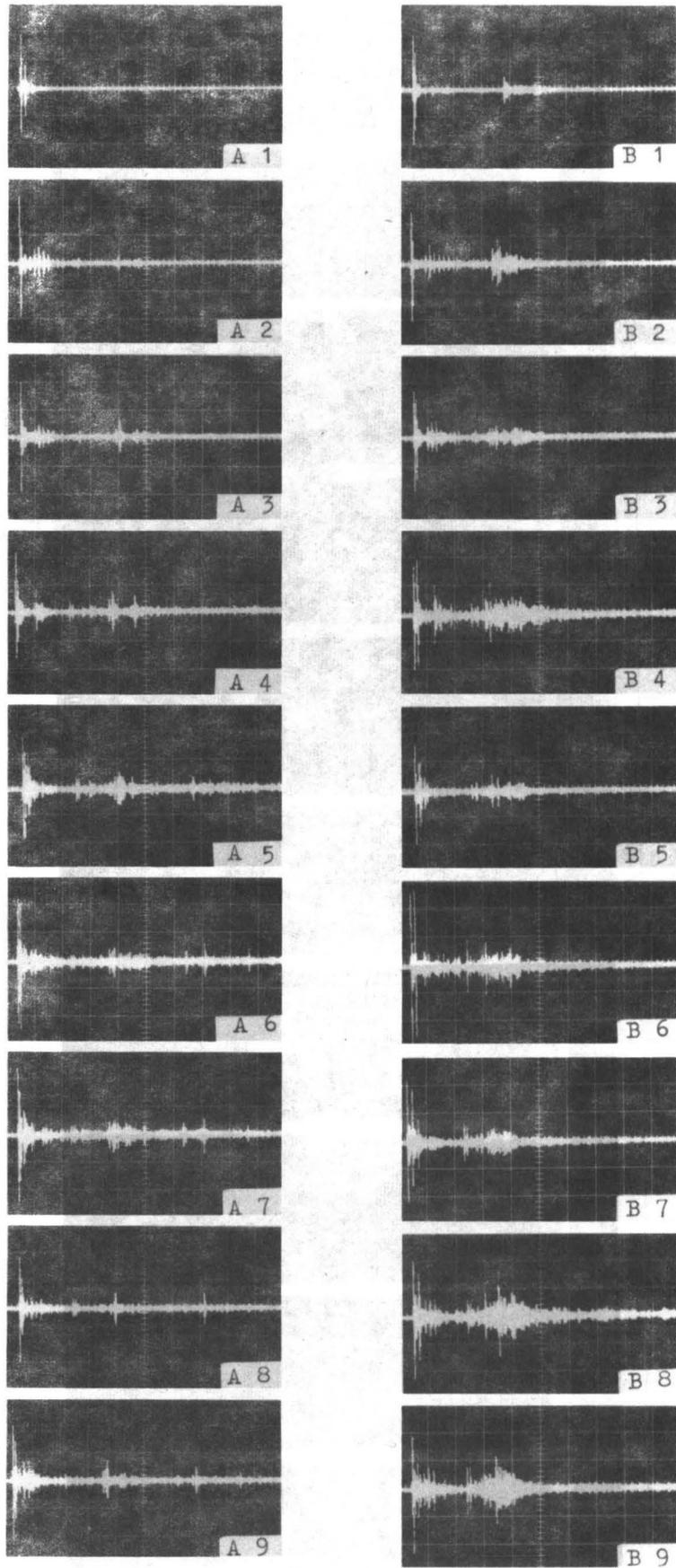


Abb. 21

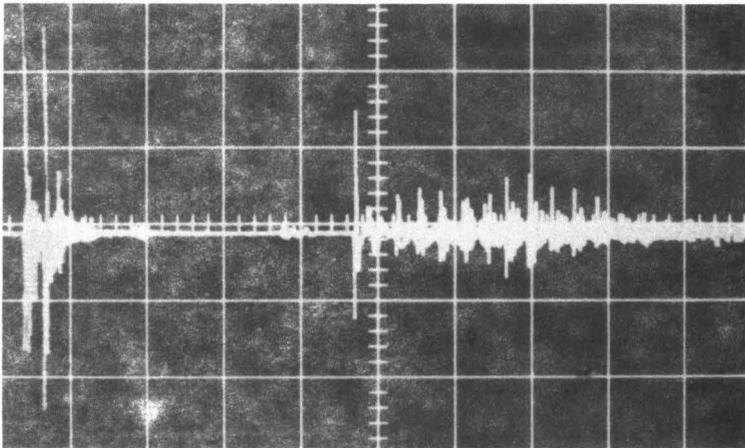
Echogramme aus der Waldbühne Berlin

Sendepunkte: A, B (s. Lageplan Abb. 11)

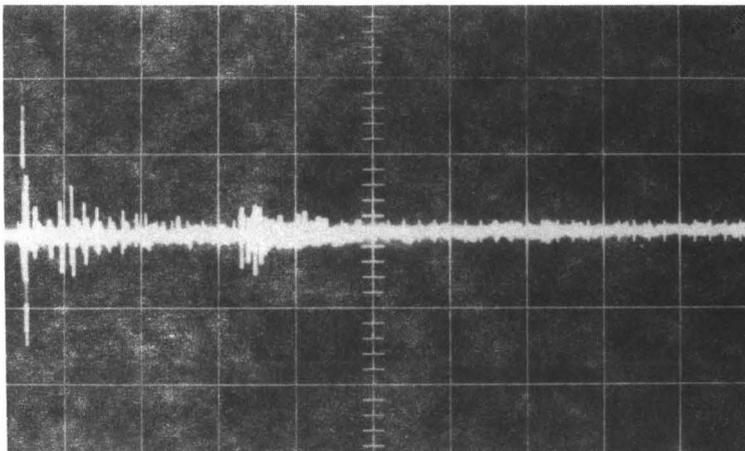
Sendesignal: Pistolenschuß empfangen
über Oktavfilter.

Zeitmaßstab: 30 ms / Teilung

Abb. 22
Klangechos aus



Epidauros
(15 ms / Teilung)



Waldbühne
(30 ms / Teilung)

