

<b>Zeitschrift:</b>	Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe
<b>Band:</b>	39 (1961)
<b>Heft:</b>	1
<b>Artikel:</b>	Richtlinien zur Mikrophondistanz bei Tonaufnahmen
<b>Autor:</b>	Briner-Aimo, E.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-875230">https://doi.org/10.5169/seals-875230</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 23.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Richtlinien zur Mikrophondistanz bei Tonaufnahmen

DK: 681.84.002

## 1. Einleitung

Wie jeder Tonmeister weiß, hängt das technische Gelingen guter Aufnahmen von zahlreichen Faktoren ab. Ein Teil der entsprechenden Probleme lässt sich praktisch nur durch Ausprobieren bewältigen. Obwohl bei zunehmender Erfahrung sich oft eine gewisse Intuition (aber oft auch eine gefährliche Gewohnheit) entwickelt, scheint es doch zweckmäßig, die Unsicherheit wenigstens bei jenen Voraussetzungen zu reduzieren, die einer theoretischen Analyse zugänglich sind. In erster Linie handelt es sich dabei um die Frage nach dem Zusammenhang zwischen Mikrophonabstand und Tiefenstaffelung des akustischen Bildes. Diese Frage wird um so wichtiger, als durch das steigende Interesse an der Stereophonie die Aufmerksamkeit zunehmend auf Raumwirkungen gelenkt wird. Die auf unabsehbare Zeit noch beizubehaltende herkömmliche Einkanal-Sendetechnik sollte sich deshalb in erhöhtem Masse mit derjenigen Raumperspektive auseinandersetzen, die ihr zugänglich ist. Mit anderen Worten: der moderne Tonmeister wird (von der musikalischen Seite seines Berufes abgesehen) sich nicht mit den absoluten und relativen Problemen der Dynamik begnügen, sondern zusätzlich auf korrekte Übertragung des Distanzeindruckes achten. Da entsprechende Angaben in der Literatur meistens nicht unter diesem Gesichtswinkel zusammengestellt sind, sollen hier einige der wichtigsten zu berücksichtigenden Eigenschaften des Schallfeldes erwähnt und deren praktische Auswertung durch graphische Darstellungen erleichtert werden. Dabei wollen wir vorher das freie Schallfeld berücksichtigen und nachträglich den Einfluss des Raumhalles untersuchen.

## 2. Distanzeindruck

Die Wellengleichung des Geschwindigkeitspotentials im kugelsymmetrischen Fall

$$\frac{\partial^2 (r \Phi)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 (r \Phi)}{\partial r^2}$$

besitzt die Lösung

$$\Phi = \frac{1}{r} F \left( t - \frac{r}{c} \right)$$

Daraus ergeben sich Schalldruck und Schnelle

$$p = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \rho \frac{\partial F}{\partial r t}$$

$$v = -\frac{\partial \Phi}{\partial r} = \frac{F}{r^2} - \frac{\partial F}{r \partial r} = \frac{F}{r^2} + \frac{1}{c} \frac{\partial F}{r \partial t}$$

a) Hochfrequente Schallvorgänge  $\partial F / \partial t \gg F$ . Es wird

$$p = \rho \frac{\partial F}{r \partial t} \quad v \approx \frac{1}{c} \frac{\partial F}{r \partial t}$$

Die beiden Größen hängen auf dieselbe Weise von der Schallquellendistanz  $r$  ab und zeigen, wie bei

Dauertönen, dieselbe Gestalt: es entsteht kein Entfernungseindruck.

b) Bei tieffrequenten Schallvorgängen ergibt sich hingegen eine ausgesprochene Distanzabhängigkeit im Vergleich von  $p$  und  $v$ :

$$r \text{ klein:} \quad p = \rho \frac{\partial F}{r \partial t} \quad v \approx \frac{F}{r^2}$$

$$r \text{ gross:} \quad p = \rho \frac{\partial F}{r \partial t} \quad v \approx \frac{1}{c} \frac{\partial F}{r \partial t}$$

so dass sich  $p$  und  $v$  je nach Abstand stark unterscheiden. Dies bedeutet, dass besonders die tieffrequenten Einschwingvorgänge (da es auf  $\partial F / \partial t$  ankommt) den Distanzeindruck vermitteln müssen und dass, zufolge des Schalldruck-Schallschnelle-Empfanges des menschlichen Ohrs (G. Békésy), die Grösse der Phasenverschiebung zwischen  $p$  und  $v$  massgebend sein muss. Ein erheblicher Teil des räumlichen Hörens beruht demnach nicht allein auf dem zwei-ohrigen Hören. Dementsprechend sollen die Phasen von  $p$  und  $v$  näher untersucht werden.

## 3. Schallfelder

### 3.1 Kugelstrahler nullter Ordnung

Für die periodisch atmende Kugel (Figur 1) gilt obige Lösung der Wellengleichung mit

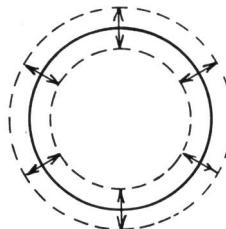


Fig. 1

Daraus folgt

$$p = \frac{A \rho}{r} j \omega \exp. j (\omega t - kr)$$

$$v = A \left( \frac{1}{r^2} + j \frac{k}{r} \right) \exp. j (\omega t - kr)$$

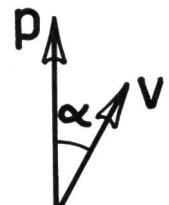


Fig. 2

Das Schnellefeld setzt sich zusammen aus einem mit  $1/r$  (wie das Druckfeld) abnehmenden *Fernfeld* (in Phase mit dem Druck) und einem mit  $1/r^2$  abnehmenden, dem Druck um  $\pi/2$  nachfolgenden *Nahfeld*.

Der Phasenwinkel  $\alpha$  zwischen  $v$  und  $p$  ist gleich demjenigen zwischen  $v$  und  $v_\infty$  (da  $v_\infty$  parallel zu  $p$ )

$$\tan \alpha = \frac{1}{r^2} : \frac{k}{r} = \frac{1}{k r} = K = \frac{\lambda}{2 \pi r}$$

Dieser mit  $r$  abnehmende Phasenwinkel ist für den physiologischen Distanzeindruck verantwortlich. Ein Mikrophon, das  $p$ - und  $v$ -empfindlich ist (also zum Beispiel ein Kondensatormikrophon mit Nieren-

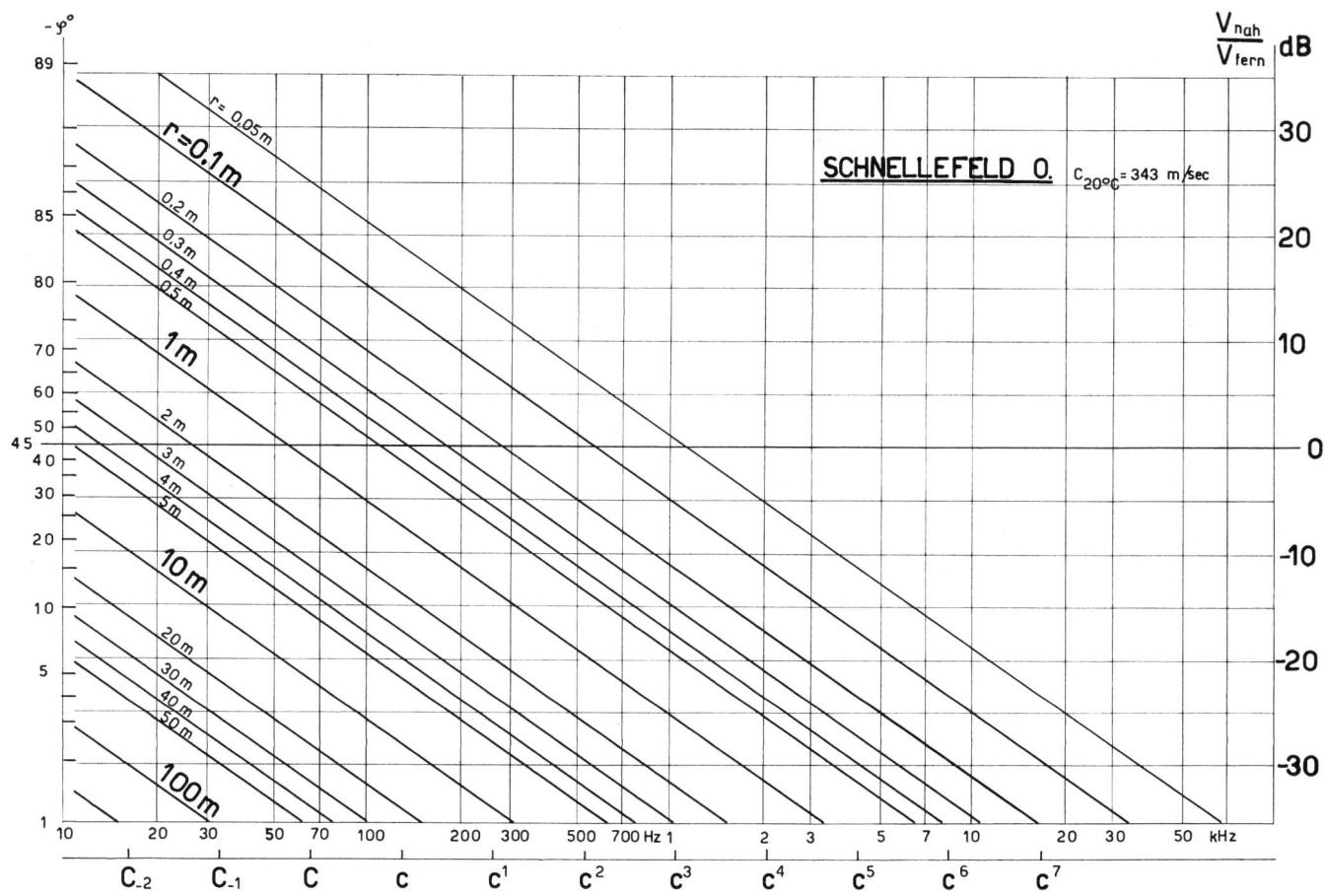


Fig. 3.

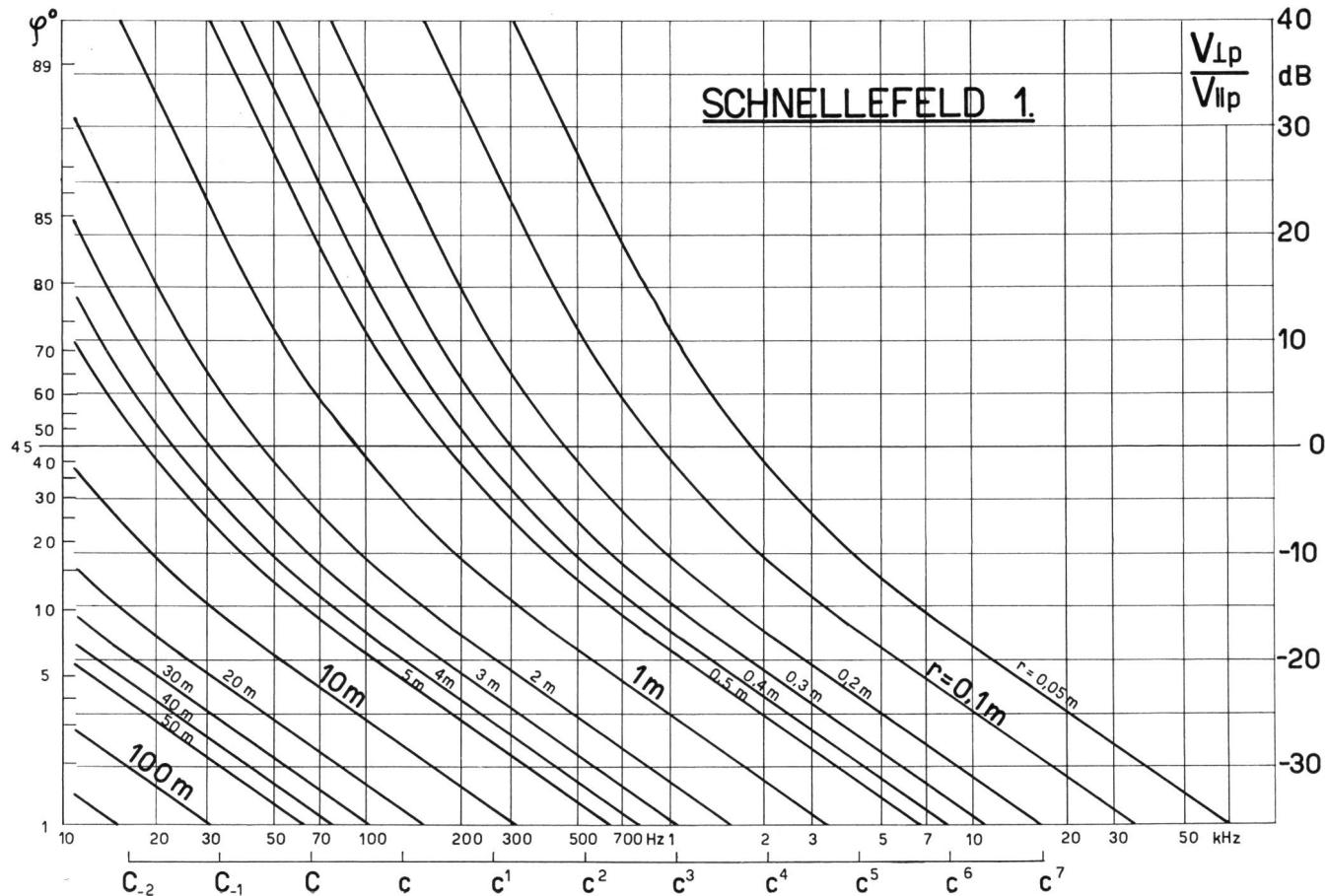


Fig. 4.

charakteristik), wird auf diesen Winkel ansprechen und somit imstande sein, eine Information über die Tiefenstaffelung der Schallquellen zu übertragen.

Es ist demnach sinnvoll, für den zu wählenden Mikrofonabstand die Funktion auszuwerten

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = K = \frac{c}{2 \pi r \cdot v}$$

$\operatorname{tg} \alpha_0$  in logarithmischem Ordinatenmaßstab aufgetragen als Funktion der Frequenz, mit  $r$  (Abstand) als Parameter, stellt gleichzeitig dar (Fig. 3):

a) Das Verhältnis

$$\frac{|\mathbf{v}|_{\text{nah}}}{|\mathbf{v}|_{\text{fern}}} \text{ oder } \frac{|\mathbf{v}|_{\perp p}}{|\mathbf{v}|_{\parallel p}} (= K)$$

direkt in dB.

b) Das Verhältnis von Blindleistung (entsprechend  $\mathbf{v} \perp \mathbf{p}$ ) zu Wirkleistung (oder Strahlungsleistung, von  $\mathbf{v} \parallel \mathbf{p}$  herrührend).

Die Ordinate 0 dB trennt zwei Gebiete: Im oberen herrscht das Nahfeld vor, im unteren das Fernfeld. Der Übergang findet statt für  $K = 1$ , das heisst nach  $\frac{1}{2\pi}$  Wellenlängen.

Wegen der grossen Blindleistung kleiner Schallquellen ist  $v$  gegenüber  $p$  um so grösser, je kleiner die Entfernung im Vergleich zu  $\lambda$  ist. Das Ansteigen der Kurven mit abnehmender Frequenz bedeutet, dass der Anteil der Schnellempfindung zunimmt, und dies um so mehr, je näher sich das Ohr bei der Schallquelle befindet.

#### Anwendungsbeispiele:

- Der Grundtonumfang des Klaviers reicht etwa von 30...4000 Hz. Soll bei Verwendung eines Nierenmikrofons der oft bei Aufnahmen zu beobachtende Effekt scheinbar geringerer Entfernung der Basstöne gegenüber dem Diskant verminder werden (dem unterschiedlichen Verhältnis  $\lambda/2\pi r = K$  entsprechend), ist darauf zu achten, einen Mikrofonabstand zu wählen, für den die entsprechende Gerade im Diagramm nicht die beiden Zonen verschiedenen Charakters überschneidet. Dies ist in unserem Beispiel für  $r = 3$  m der Fall.
- Eine Baßstimme mit 200 Hz im Abstand von 1 m vom Mikrofon befindet sich in derselben akustischen Ebene wie ein Sopran mit 500 Hz bei  $r = 0,4$  m.

Das Diagramm (Figur 3) zeigt, dass bei den praktisch vorkommenden Mikrofonabständen oberhalb von etwa 500 Hz schon durchwegs Fernfeld-eigenschaften herrschen, so dass man sich vor allem um die tieferen Frequenzen zu kümmern hat, in Übereinstimmung mit der physiologischen Tatsache, dass Frequenzen unterhalb 500 Hz grösstenteils für den Distanzeindruck verantwortlich sind.

Bei Verwendung reiner Druck- oder Schnellempfänger (Kugel- beziehungsweise Achtercharakteristik) wird das Diagramm ohne Sinn, da zur Ermittlung des Phasenwinkels in diesem Fall die Bezugsrichtung der Phase fehlt. Die entsprechenden Aufnahmen wirken dann flach und neutral.

#### 3.2. Kugelstrahler erster Ordnung

Die oben abgeleiteten Beziehungen und das entsprechende Diagramm gelten nur für den Spezialfall eines Strahlers nullter Ordnung. Da man bei Schallquellen nicht ohne weiteres mit diesem Spezialfall rechnen kann, seien hier die entsprechenden Überlegungen für den Kugelstrahler erster Ordnung (starre, oszillierende Kugel) wiederholt.

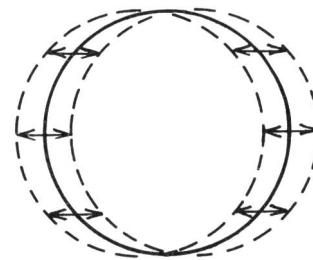


Fig. 5.

Das Geschwindigkeitspotential eines Strahlers erster Ordnung kann man dadurch erhalten, dass man den Strahler nullter Ordnung in B, mit Geschwindigkeitspotential  $\Phi_o^B$  einem um  $ds$  versetzten gleichartigen Strahler in A, mit Potential  $\Phi_o^A$  gegenphasig überlagert. Im Aufpunkt P gilt dann:

$$\Phi^P = \Phi_o^B - \Phi_o^A$$

Da aber  $\Phi_o^B = \Phi_o^A + \frac{\partial}{\partial s} \Phi_o^A ds$  wird

$$\Phi^P = \frac{\partial}{\partial s} \Phi_o^A ds = \frac{\partial}{\partial r} \Phi_o^A \frac{\partial r}{\partial s} ds$$

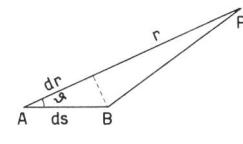


Fig. 6

Führt man nun folgende Substitutionen durch:

a)  $\frac{\partial r}{\partial s} = \cos \vartheta$

b) Grenzübergang  $ds \rightarrow 0$ , derart dass  $A \cdot ds = \text{konstant} = M$

c) Umkehrung des Vorzeichens, da die Differentiation längs  $ds$  durchgeführt wurde, statt den Aufpunkt zu verschieben,

so folgt das Geschwindigkeitspotential des Kugelstrahlers erster Ordnung:

$$\begin{aligned} \Phi_I &= M \frac{\partial}{\partial r} \Phi_o \cos \vartheta = M \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \exp. j(\omega t - kr) \right] \cos \vartheta \\ &= -M \left[ \frac{1}{r^2} + j \frac{k}{r} \right] \cos \vartheta \exp. j(\omega t - kr) \\ &= -M j \frac{k}{r} \left[ \frac{1}{jk r} + 1 \right] \cos \vartheta \exp. j(\omega t - kr) \end{aligned}$$

Daraus folgt für  $p$ :

$$p_I = \rho \frac{\partial \Phi_I}{\partial t} = \rho M \omega \frac{k}{r} \left[ \frac{1}{jk r} + 1 \right] \cos \vartheta \exp. j(\omega t - kr)$$

Wie im früheren Fall für  $v$ , ergibt sich hier auch für  $p$  ein abstandsabhängiger Phasenwinkel.

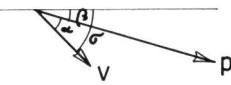
Die Schnelle wird jetzt:

$$v_I = -\frac{\partial \Phi_I}{\partial r} = M \frac{k^2}{r} \left[ \frac{2}{(jkr)^2} + \frac{2}{(jkr)} + 1 \right] \cos \vartheta \exp(j(\omega t - kr))$$

Da die Richtcharakteristik für  $p$  und  $v$  dieselbe ist, können wir zur Berechnung des Phasenwinkels davon absehen. Für jede Richtung gilt gleichzeitig

$$p \sim \frac{1}{jk r} + 1 = -jk + 1$$

Fig. 7



$$v \sim \frac{2}{(jk r)^2} + \frac{2}{jk r} + 1 = -2K^2 - 2jk + 1$$

Bezogen auf die beiden unter sich phasengleichen  $p_{\text{fern}}$  und  $v_{\text{fern}}$  sind die Phasenwinkel für endliches  $r$ :

$$\tan \beta = -K \quad \tan \sigma = \frac{-2K}{1-2K^2}$$

Und daraus folgt der uns interessierende Phasenwinkel zwischen  $p$  und  $v$ :

$$\tan |\alpha| = \tan (\sigma - \beta) = K(1 + 2K^2)$$

$$\tan \alpha_I = \frac{\lambda}{2\pi r} \left[ 1 + 2 \left( \frac{\lambda}{2\pi r} \right)^2 \right]$$

Hier ist wiederum  $\tan \alpha = v_{\perp p}/v_{\parallel p}$ , so dass es sinnvoll ist, auch die für den Strahler erster Ordnung geltende Darstellung von  $\alpha$  als Funktion der Frequenz mit  $r$  als Parameter mit dem in dB ausgedrückten Verhältnis  $v_{\perp p}/v_{\parallel p}$  zu beschriften, stellt es doch wiederum die Abweichung des Schnellefeldes in endlichem Abstand gegenüber dem unendlich fernen ( $v \parallel p$ ) dar. Auch hier drückt  $\alpha = 45^\circ$  (0 dB) den Übergang von überwiegendem Nähe- zu Ferncharakter aus (Fig. 4).

Grenzfälle:

Hohe Frequenzen }  $K \ll 1$   $\tan \alpha = K$  { Übergang zu den Geraden  
Große Abstände } für nullte Ordnung

Tiefe Frequenzen }  $K \gg 1$   $\tan \alpha = 2K^3$   
Kleine Abstände

$$\log \tan \alpha = \log 2 + 3 \log K$$

Gerade mit dreifacher  
Neigung gegenüber null-  
ter Ordnung

Beispiele:

1. Das Diagramm nullter Ordnung (Figur 3) hatte für eine Klavieraufnahme den Minimalabstand 3 m ergeben. Dabei war bei 30 Hz das Verhältnis von Nahfeld zu Fernfeld -4 dB. Auf dem Diagramm für Strahlung erster Ordnung (Figur 4) finden wir dieses Verhältnis (und folglich den gleichen Phasenwinkel) bei 4 m Abstand, das heisst dass bei erster Ordnung das Nahfeld weiter reicht.  $\tan \alpha = 1$  ergibt die einzige reelle Lösung  $K = 0,6$ . Demnach befindet sich die 0-dB-Grenze im Abstand von  $\frac{1,65}{2\pi}$  Wellenlängen

2. Wegen der Parallelität der Kurven erster Ordnung und ihres Einlaufens in die Geraden für nullte Ordnung, entsprechen sich dieselben Werte des vorigen Beispiels 2. Unter sich haben gleichen Phasenwinkel: 200 Hz im Abstand 1 m und 500 Hz im Abstand  $r = 0,4$  m. Aber das Verhältnis Nahfeld/Fernfeld ist von -12 dB auf -10 dB angestiegen.

Wegen der Richtcharakteristik des Strahlers erster Ordnung (mit  $\cos \delta$ ) lässt sich das Lautstärkeverhältnis mehrerer Strahler dieser Art durch Abdrehen der Hauptstrahlungsrichtung der zu lauten Schallquelle vermindern, ohne den wirksamen Phasenwinkel  $\alpha$  zu beeinflussen.

Während für zwei Strahler gleicher Art beide Diagramme dieselben Distanzverhältnisse liefern (Beispiel 2), fallen die absoluten Abstandswerte je nach Natur des Strahlers verschieden aus (Beispiel 1). Bei der Kombination von Strahlern verschiedener Ordnung sind die beiden Diagramme gleichzeitig zu benutzen.

Aus diesen Gründen ist es erforderlich, die Strahlerordnung der üblichen Schallquellen zu kennen. Allerdings braucht man in dieser Beziehung nicht kleinlich zu sein, denn

- I. der durch den Tonumfang eines Musikinstrumentes gegebene Bereich der möglichen Phasenwinkel ist grösser als der Unterschied der beiden Diagramme.
- II. da das Verhältnis von Nahfeld zu Fernfeld bei tiefen Frequenzen besonders kritisch und hörbar ist, bezieht man sich zur Ermittlung des Mikrophonabstandes zweckmässig auf den tiefsten Ton des Instrumentes. Die extremen Lagen eines Instrumentes werden aber nur selten benutzt. (Stilrichtung beachten!)
- III. eine reine Strahlung bestimmter Ordnung ist nie anzutreffen. Die praktischen Fälle bestehen aus der Überlagerung verschiedener Abstrahlungsformen.
- IV. meistens wird es sich um den Vergleich von Instrumenten ähnlicher Art handeln (Streichquartett, Bläserquintett usw.), oder es geht um Sprechstimmen, so dass jedes Diagramm die selben Distanzverhältnisse liefert.

(Man vergesse aber nicht, dass die Diagramme nicht nur dazu auszunützen sind, um alle Schallquellen in denselben empfindungsmässigen Abstand zu bringen, sondern im Gegenteil vor allem um die Übertragung räumlicher Plastizität nicht dem Zufall zu überlassen.)

Die gleichen Diagramme erleichtern auch den zweckmässigen Einsatz mehrerer Mikrophone.

Im Anhang sollen die wichtigsten in der Praxis zu berücksichtigenden Eigenschaften der Musikinstrumente als Schallstrahler zusammengestellt werden. Vorher sei aber noch an weitere prinzipielle und allgemeine Schallfeldeigenschaften erinnert.

#### 4. Mikrophonabstand und Frequenzgang

Es ist die Distanzabhängigkeit der Klangfarbe zu untersuchen.

##### 4.1. Nullte Ordnung

Vom periodischen Zeitglied abgesehen, ist

$$|p| = \frac{A \rho}{r} \omega \quad |v| = \frac{A}{r^2} \sqrt{1 + \left( \frac{r \omega}{c} \right)^2}$$

Bei reinem Druckempfang ist (von der Luftabsorption abgesehen) durch den Faktor  $\omega/r$  die Gestalt des Frequenzspektrums unabhängig vom Abstand. Hingegen wächst bei Schnelle- oder gemischem Empfang der Beitrag hoher Frequenzen mit steigendem Abstand.

Auch von diesem Standpunkt aus ist demzufolge bei Druckempfang der Abstand ohne Bedeutung, bei Schnelleempfang hingegen wird die Klangfarbe mit zunehmendem Abstand heller.

#### 4.2. Erste Ordnung

Hier gilt, abgesehen vom Zeitfaktor und von der Richtungsabhängigkeit:

$$|p| = \frac{\rho M \omega}{r^2 c} \sqrt{1 + \left(\frac{r \omega}{c}\right)^2} \quad |v| = \frac{M}{r^3} \sqrt{4 + \left(\frac{r \omega}{c}\right)^4}$$

Der Beitrag hoher Frequenzen steigt mit zunehmendem Abstand bei Druck- und Schnelleempfang.

Die Abstandsabhängigkeit des Frequenzganges wirkt sich bei sehr geringen Entfernungen besonders stark aus: beispielsweise klingt die menschliche Stimme bei direkt vor dem Mund aufgestelltem Mikrofon unnatürlich dumpf.

#### 5. Hallradius

Die bis dahin zusammengestellten Überlegungen gelten für das freie Schallfeld. Im Raum wird durch den Nachhall der Mikrofonentfernung eine Schranke gesetzt. Diese Grenze wird durch den Begriff des Hallradius verdeutlicht.

##### 5.1. Mikrofon mit Kugelcharakteristik

Es sollen folgende Bezeichnungen gelten:

- E (wattsec) = Schallenergie im Raum
- $E_o = E/V$  (wattsec/m<sup>3</sup>) = spez. Schallenergie (Schalldichte) im Raum
- V (m<sup>3</sup>) = Raumvolumen
- F (m<sup>2</sup>) = Raumbegrenzungsfläche
- c (m/sec) = Schallgeschwindigkeit
- a (%) = Absorptionskoeffizient der Wandverkleidung (Mittelwert)
- P (watt) = abgestrahlte Schalleistung
- J (watt/m<sup>2</sup>) = Schallstärke
- T (sec) = Nachhallzeit

Die zeitliche Abnahme der Schallenergie durch die Wandabsorption beträgt:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{cE}{4v} \alpha F = -\frac{c \alpha F}{4} E_o$$

Im stationären Zustand befindet sich diese Grösse im Gleichgewicht mit der von der Schallquelle abgestrahlten Leistung:

$$P = \frac{c \alpha F}{4} E_o$$

und die Schalldichte, die bei Abschalten der Quelle den Nachhall bewirkt, ist folglich:

$$E_o = \frac{4P}{c \alpha F}$$

oder, durch Einsetzen der Sabineschen Nachhallformel:

$$E_o = \frac{4PT}{0,162cV}$$

woraus die den Nachhall erzeugende Schallstärke folgt:

$$J_r = c E_o = \frac{4PT}{0,162V}$$

Für die Schallstärke des Direktschalles (freies Feld) gilt:

$$J_d = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Setzt man die beiden Ausdrücke gleich ( $J_r = J_d$ ) erhält man den *Hallradius* oder *Hallaabstand* R als denjenigen Abstand von der Schallquelle, für den Direktschall und Hall dieselbe Schallstärke aufweisen:

$$R = \sqrt{\frac{1}{310} \frac{V}{T}}$$

Für Mikrofonabstand  $r < R$ : vorwiegend Direktschall.

Für Mikrofonabstand  $r > R$ : vorwiegend diffuses Schallfeld.

Die graphische Darstellung (*Figur 8*) von R als Funktion von V, mit T als Parameter, dient zur raschen Ermittlung dieses bei Aufnahmen kritischen Wertes. Seine Rolle ist nicht zu unterschätzen, denn beim Ausfallen des Richtungshörens wird der Hallanteil schon störend empfunden, bevor er im Saal das erwünschte Mass überschreitet. Außerdem wird innerhalb R die Gestalt der Einschwingvorgänge vorwiegend von der Schallquelle selbst bestimmt, während bei Aufstellung des Mikrofons ausserhalb R die Anhallzeit des Raumes in die Ausgleichsvorgänge mit eingeht.

Beispiele:

1. Voranstehend wurde bei Klavieraufnahme ein Minimalabstand von  $r = 3$  m gefordert. Dies bedeutet bei  $T = 1,5$  sec ein minimales Raumvolumen von  $V = 4200$  m<sup>3</sup>, wenn die Aufnahme hinreichend direkt wirken soll.
2. 1 m Abstand für Sprachaufnahmen ergibt bei  $T = 1$  sec ein notwendiges Minimalvolumen  $V = 310$  m<sup>3</sup>.
3. Orchesteraufnahmen. Damit der Entfernungseindruck einzelner Instrumentengruppen nicht dem zufälligen Tonumfang überlassen wird, ist es wünschenswert, vorwiegend im Fernfeld zu arbeiten. Um die Tiefenperspektive und die notwendige Klarheit nicht durch zu viel Hall zu verwaschen, wird man innerhalb vom Hallradius (oder wenigstens in seinem Bereich) bleiben. Für den im Hinblick auf die Orchestertiefe geringen Mikrofonabstand von 4,5 m und  $T = 1,7$  sec (optimaler Mittelwert) folgt schon (*Figur 8*) ein minimales Raumvolumen um 17 000 m<sup>3</sup>. Dies erklärt die Tendenz, in Funkhäusern immer grössere Orchesterstudios zu bauen.

#### 5.2. Hallradius bei gerichteten Mikrofonen

Die Berechnung des Hallradius setzte ein Mikrofon mit Kugelcharakteristik voraus. Da aber für die Tiefenperspektive Nierencharakteristik vorzuziehen ist, wird wegen der nicht allseitigen Aufnahme des Halles, der Hallradius grösser.

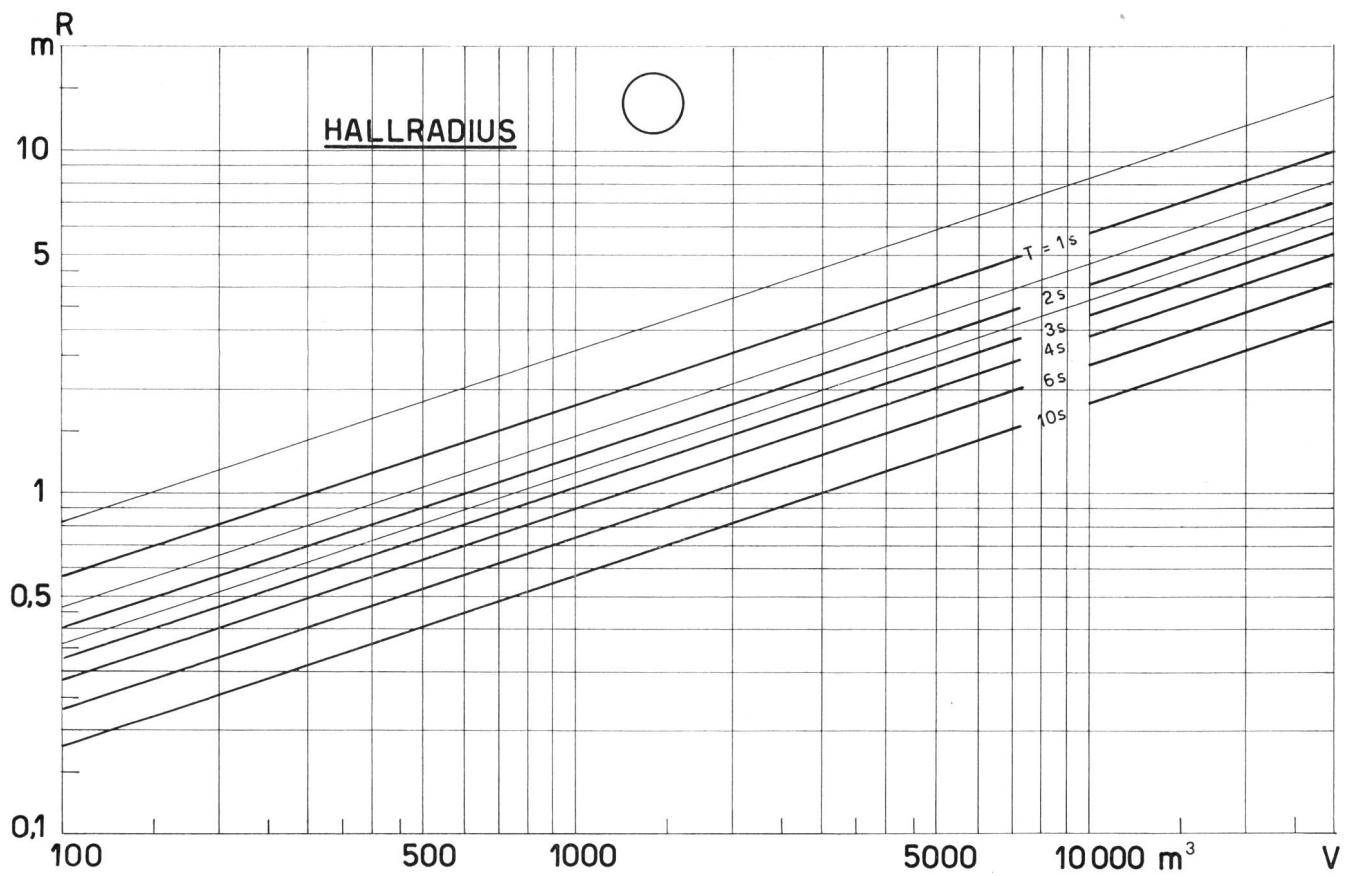


Fig. 8.

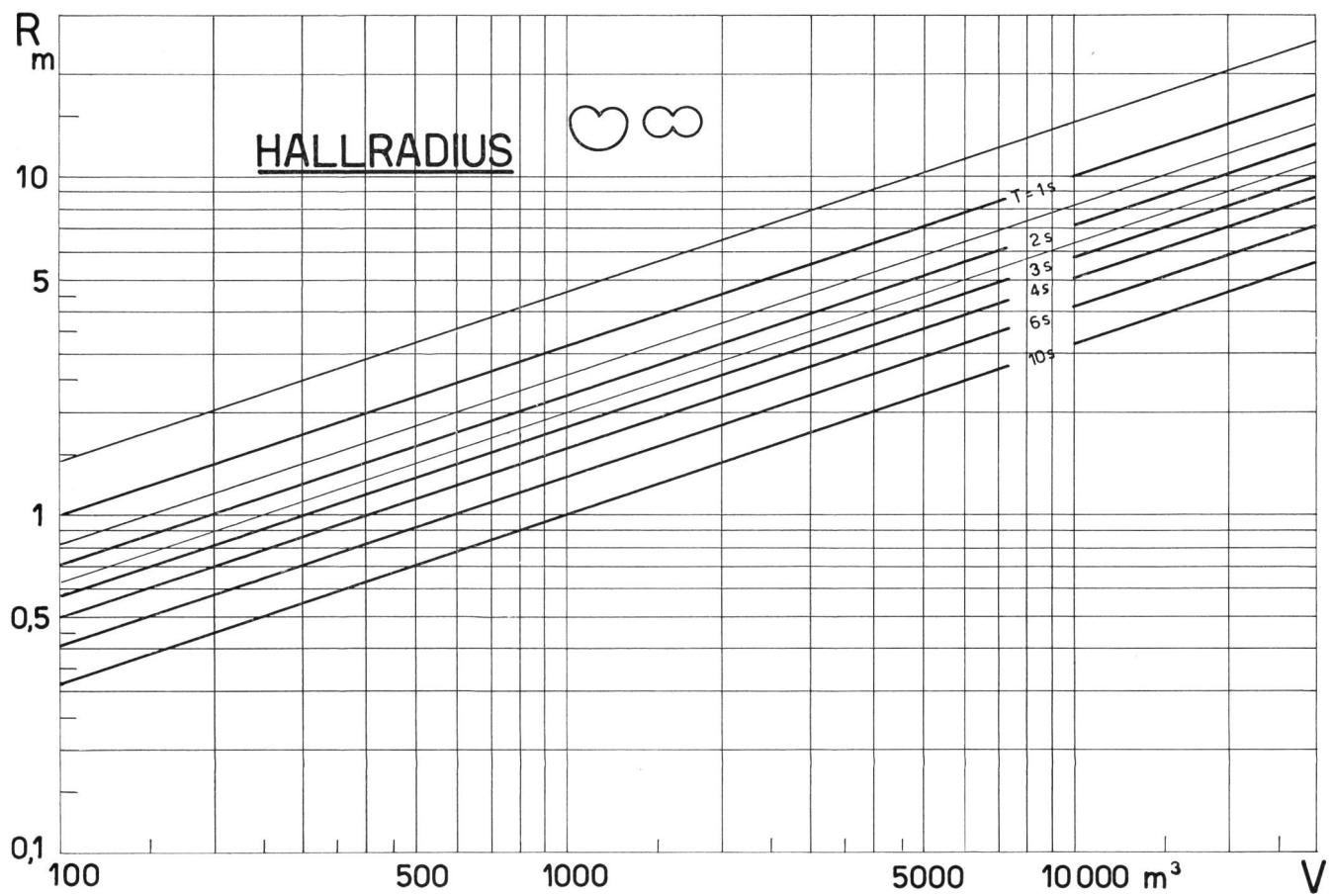


Fig. 9.

### 5.2.1. Nierencharakteristik

Die Schallstärke des Nachhalls auf der Flächen-einheit einer Kugel, mit Radius  $r$  um das Mikrofon, ist:

$$J_o = J_r \frac{1}{4\pi r^2}$$

Die Richtungsabhängigkeit der Mikrofonemp-findlichkeit bezieht sich auf  $p$  oder  $v$ . (Beim Kondensatormikrofon mit zwei Membranen, etwa Typ M49, folgt der Ausschlag dem Druckgradienten, die Ausgangsspannung ist jedoch proportional zur Schnelle):

$$u \sim v = v_o \cdot \frac{1}{2} (1 + \cos \varphi)$$

auf gleiche Empfindlichkeit nach vorn (Achse) wie bei Kugelcharakteristik bezogen. Da aber  $v \sim \sqrt{J}$ , folgt die Winkelabhängigkeit für die Schallstärke:

$$\frac{J}{J_o} = \left( \frac{V}{V_o} \right)^2 = \left( \frac{1 + \cos \varphi}{2} \right)^2$$

Die Kugel um das Mikrofon ist demnach gewisser-massen mit dem  $\varphi$ -abhängigen Wert von  $J$  zu belegen:

$$J = \frac{J_r}{4\pi r^2} \left( \frac{1 + \cos \varphi}{2} \right)^2$$

Über die Kugel integriert, ergibt dies für die jetzt vom Mikrofon aufgenommene Schallstärke des Nachhalls:

$$J_{r, \text{Niere}} = \frac{J_r}{3}$$

### 5.2.2. Achter-Charakteristik

Hier gilt die analoge Überlegung mit der Richt-charakteristik

$$v = v_o \cos \varphi$$

woraus folgt

$$J = \frac{J_r}{4\pi r^2} \cos^2 \varphi$$

und über die Kugel integriert wiederum

$$J_{r, \text{Acht}} = \frac{J_r}{3}$$

In beiden Fällen ist demnach der Anteil des Halls dreimal geringer. Also folgt aus dem Gleichsetzen von Direktschall und Hall

$$J_r = \frac{1}{3} \frac{4PT}{0,162V} = J_d = \frac{P}{4\pi r^2}$$

der um  $\sqrt{3}$  grössere Hallradius

$$R_{\text{Niere, Acht}} = \sqrt{3} R_{\text{Kugel}}$$

Für gerichtete Mikrophone ist der Hallradius in *Figur 9* graphisch dargestellt.

Beispiele:

- Bei der Klavieraufnahme des vorgenannten Beispiels genügt selbst bei dem durch *Figur 4* gegebenen grösseren Abstand von 4 m, bei  $T = 1,5$  sec, ein Raumvolumen von etwa 2500 m<sup>3</sup> (gegenüber 4200 m<sup>3</sup> bei Kugelcharakteristik).

- Im 300-m<sup>3</sup>-Studio für Sprachaufnahme (Hallradius für Kugel-mikrofon = 1 m bei  $T = 1$  sec) können die Sprecher bis zu einem Abstand von 1,7 m aufgestellt werden, bevor der Hall überwiegt.
- Im 10 000-m<sup>3</sup>-Orchesterstudio wird der Hallradius bei  $T = 1,7$  sec jetzt  $R = 7,5$  m, was eine wesentlich grössere Freiheit in der Orchesteraufstellung erlaubt.
- Die öfters anzutreffende Grössenordnung von 5000 m<sup>3</sup> ergibt bei gerichtetem Empfang einen noch sehr knapp annehmbaren Hallradius von etwa 5,5 m.

*Bemerkung zur Studiogrösse für Orchester: Raum-füllziffer.* Das Kriterium, die Raumgrösse nach einer bestimmten Kubikmeterzahl je Kopf zu berechnen, gilt wohl für Konzertsäle, nicht aber für Funkhäuser mit meist beschränkter oder gänzlich fehlender Publikumsbestuhlung; hier ergäbe dieses Kriterium viel zu geringe Volumina. Brauchbarer ist der Begriff der Raumfüllziffer (*E. Petzold*). Orchesterbesetzung und minimal erforderliches Raumvolumen stehen in folgendem Zusammenhang

$$f = \frac{V^{2/3} \log V}{7,5}$$

wobei  $f$  die Summe der Füllinheiten darstellt, deren einzelne Werte folgender Zusammenstellung zu entnehmen sind (Werte für jeweils ein Instrument der betreffenden Kategorie):

Geige . . . . .	2	Horn . . . . .	6
Bratsche . . . . .	2	Posaune . . . . .	6
Cello . . . . .	4	Tuba . . . . .	8
Kontrabass . . . . .	6	Pauke . . . . .	6
Piccolo . . . . .	5	Schlagzeug . . . . .	8
Flöte . . . . .	1	Trommel . . . . .	8
Oboe . . . . .	3	Harfe . . . . .	6
Klarinette . . . . .	3	Flügel . . . . .	8
Fagott . . . . .	3	Gesangsstimme . . . . .	1
Trompete . . . . .	5		

Daraus ergibt sich beispielsweise für ein mittleres Orchester von 41 Musikern (23 Streicher, doppeltes Holz, zwei Trompeten, vier Hörner, drei Posaunen, Pauken)  $f = 142$  oder ein Raumvolumen von etwa 5000 m<sup>3</sup>, das heisst 12 m<sup>3</sup> je Kopf. Ein Konzertsaal von 5000 m<sup>3</sup> könnte etwa 900 Personen aufnehmen, mit einem Raumvolumen von 5,5 m<sup>3</sup>/Kopf.

## 6. Künstlicher Nachhall und scheinbare Raumgrösse

Bei Hinzufügung von künstlichem Nachhall (Hallraum oder Hallplatte) wird bei gegebenen Raumbe dingungen der Hallradius kleiner: der hinzugefügte Nachhall verwischt den aufgenommenen Direktschall. Diesen Nachteil kann man durch zeitliche Verzögerung des Zusatzhalles beheben.

Die Richtung, Distanz und Klangfarbe bestimmenden Einschwingvorgänge besitzen eine Dauer von der Grössenordnung 50...100 ms. Überlagert sich der Nachhall diesen Einschwingvorgängen durch zu frühes Einsetzen, muss demnach das Klangbild verwischt erscheinen. Dies ist ein zusätzliches Argument für grosszügige Raumdimensionen (50 ms entsprechen, je nach der Gestaltung des Raumes, einem

Volumen von  $V = 5000 \dots 10000 \text{ m}^3$ ) und für die Notwendigkeit einer Hallverspätung dieser Größenordnung.

Die verspätete Erzeugung des künstlichen Halls kann man auf zwei Arten erzielen:

- Bei Entnahme am Hauptmikrofon, durch eine magnetische Zwischenaufnahme. Die Verzögerungszeit wird dabei durch die Bandgeschwindigkeit oder durch den Abstand von Aufsprech- und Abhörkopf geregelt.
- Durch ein gesondertes, in entsprechender Entfernung aufgestelltes Raummikrofon.

Es soll nun noch die Grösse der Verzögerungszeit (durch vom Hauptmikrofon gespeiste Zwischenaufnahme oder durch getrenntes Hallmikrofon) überschlagsmässig berechnet werden.

#### 6.1. Hall am Hauptmikrofon abgenommen

Erfolgt die Aufnahme mit dem Mikrofonabstand  $r$  ( $\leq R$ ), trifft der Primärschall auf das Mikrofon nach der Laufzeit

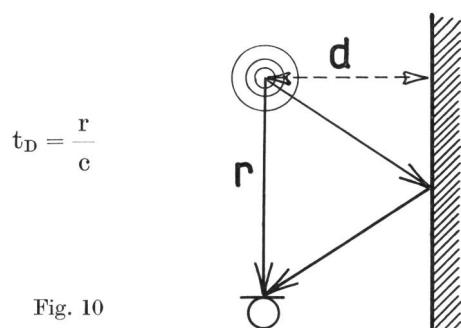


Fig. 10

Der Hall setzt mit dem Eintreffen des ersten Rückwurfs ein. (Strenghenommen darf eine sofortige isolierte Reflexion nicht mit dem Halleinsatz gleichgesetzt werden, da sie nicht getrennt empfunden wird, sondern den Schall verstärkt. Bei den hier durchgeführten Betrachtungen soll aber von dieser Unterscheidung abgesehen werden, da es sich bei Mikrofonaufnahmen um möglichste Erhaltung der Deutlichkeit, trotz Einbezug genügender Raumwirkung, handelt.) Ist  $d$  der Abstand von der nächsten Raumbegrenzungsfläche, erfolgt dies nach der Zeit

$$t_H = \frac{1}{c} \sqrt{r^2 + 4d^2}$$

Die raumbedingte Verzögerung des Halleinsatzes (Laufzeitdifferenz zwischen Direktschall und erstem Rückwurf) beträgt demnach

$$t = \frac{1}{c} \left[ \sqrt{r^2 + 4d^2} - r \right]$$

Vernachlässigt man beim Gebrauch einer Hallplatte die Laufzeit der kurzen Strecke zwischen Erregungs- und Abtastsystem, setzt der künstliche Hall nahezu beim Eintreffen der Primärfront auf das Hauptmikrofon ein\*. Es ist demnach, um nicht

\* Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Biegeschwingung in der Hallplatte liegt in der Größenordnung von 100 ms.

paradoixerweise bei längerem Nachhall einen kleineren Raum darzustellen (von etwa erwünschten Spezialeffekten abgesehen), für eine, obigem Ausdruck entsprechende Verzögerung zu sorgen. Ohne diese Massnahme kann man wohl die Halligkeit vergrössern, nicht aber einen grösseren Raum darstellen, da der Eindruck der Raumgrösse nicht durch die Hallzeit, sondern durch die Laufzeitdifferenz des ersten Rückwurfs erzeugt wird (*Vermeulen*).

*Beispiel.*  $V = 5000 \text{ m}^3$ ;  $T = 1,5 \text{ sec}$ ;  $R = 3,28 \text{ m}$ . Bei Aufstellung in der Raumachse ist angenähert:

$$d = \frac{1}{2} \sqrt[3]{V} = \frac{1}{2} \cdot 17,1 \text{ m}$$

und es wird, falls die Aufnahme im Abstand  $R$  (Hallradius) erfolgt:

$$t = \frac{1}{c} \left[ \sqrt{(3,28)^2 + (17,1)^2} - 3,28 \right] = 41,5 \text{ ms}$$

Zur raschen Ermittlung der Hallverzögerung dient *Figur 11*. Als Abszisse ist unten der Abstand zur nächsten Rückwurffläche angegeben, oben als Orientierung das ungefähr entsprechende Raumvolumen bei Aufnahme in Raummitte.

Soll eine höhere Verzögerungszeit erwünscht sein, ist durch kleinere Mikrofonabstand (aus *Figur 11* zu entnehmen) für eine entsprechende relative Verzögerung des Raumhalles zu sorgen. Dabei ist nicht zu vergessen, dass nach E. Petzold die Verwischungsschwelle, das heisst die maximale nicht störende Laufzeitdifferenz, folgendermassen festgelegt wurde:

Sprache	50 ms	oder	
		entsprechende $s = 17 \text{ m}$	
Kirchenmusik	40 ms	Wegdifferenz $s = 13,5 \text{ m}$	
Weltliche Musik	35 ms	$\Rightarrow s = 12 \text{ m}$	

*Beispiel.* Im Raume des erwähnten Beispiels erhält man eine Verzögerung von 48 ms beim Mikrofonabstand  $r = 75 \text{ cm}$ , wobei zu bedenken ist, dass die untere Grenze des Mikrofonabstandes nicht nur durch die grösste zulässige Zeitdifferenz gegeben ist, sondern dass weiterhin, je nach der Natur der Aufnahme, die Schranke der erwünschten Feldeigenschaften nach den ersten Abschnitten dieser Mitteilung gilt.

Je absorbierender der Raum ist (schalltoter Raum im Grenzfall), desto unbedeutender wird der Intensitätsbeitrag des Raumhalles im Vergleich zum künstlichen Hall und um so freier kann man über die Verzögerung und somit über die vorzutäuschende Raumgrösse verfügen.

*Beispiel.* In einem Aufnahmestudio starken Schluckgrades soll ein grosser, halliger Raum vorgetäuscht werden. Es sei angestrebt,  $V' = 15000 \text{ m}^3$ ,  $T' = 5 \text{ sec}$ . Wird der Pegel des künstlichen Halls demjenigen des Direktschalles gleichgemacht, erfolgt (nach Definition) scheinbar die Aufnahme im Hallabstand des Raumes  $V'$ . Es gilt dafür (*Figur 8*).

$$R = \sqrt{\frac{1}{310} \frac{15000}{5}} = 3,1 \text{ m}$$

Die Hallverzögerung, die dem Raum  $V'$  entsprechen würde und für die vorzusorgen ist, beträgt näherungsweise (*Figur 11*)

$$t = \frac{1}{c} \left[ \sqrt{(9,7) + (610)} - 3,1 \right] = 64 \text{ ms}$$

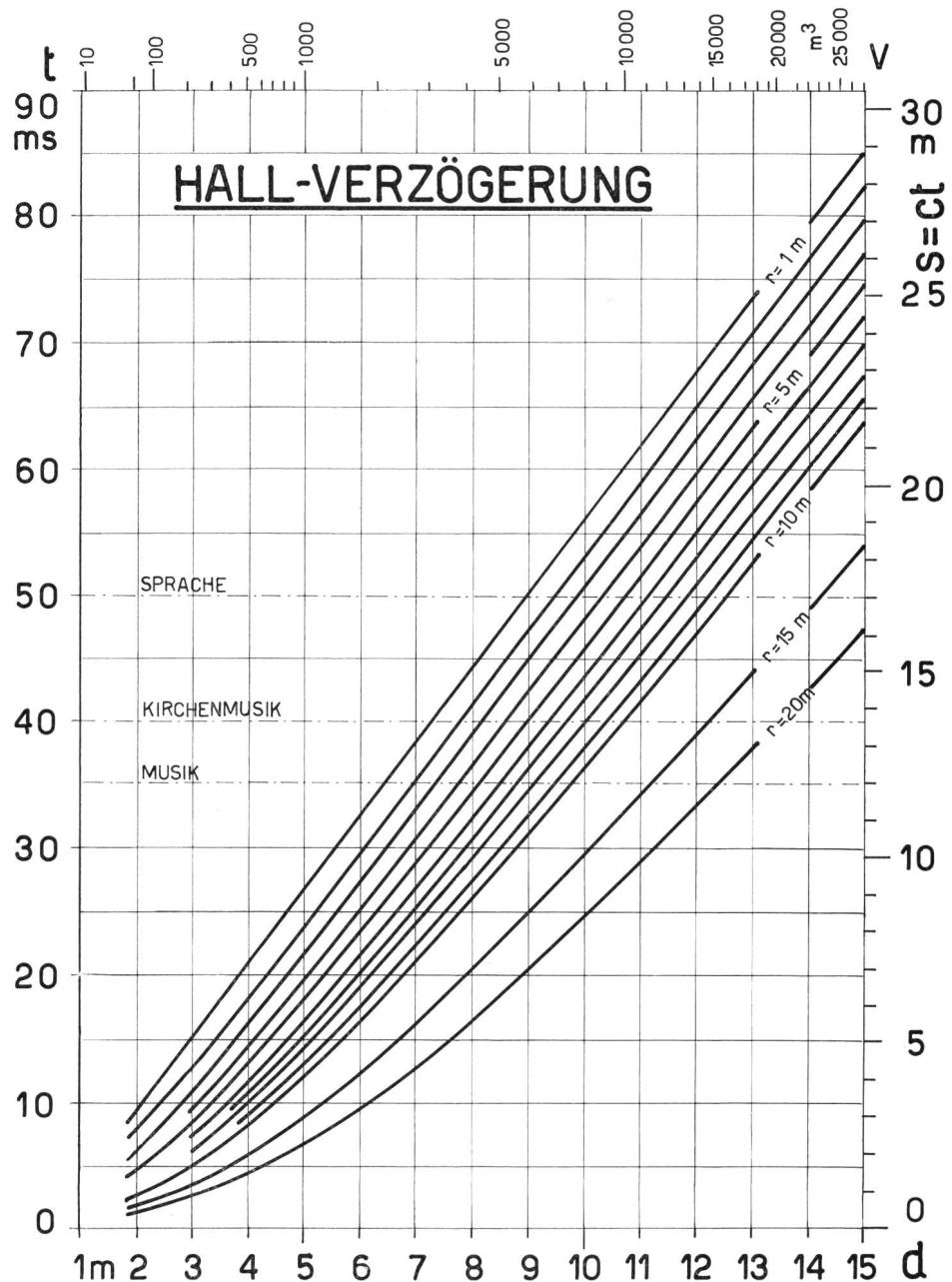


Fig. 11.

Da bei derart grosser Verzögerung der Halleinsatz getrennt vom Primärschall empfunden wird, kann die entstehende Lücke überbrückt werden durch eine etwa mit 30...35 ms verspätete, isolierte Wiederholung des Direktschalles (durch zusätzlichen Abhörfkopf am Magnetton-Verzögerungsgerät). Diese Massnahme entspricht den realen Verhältnissen zeitlicher Trennung zwischen Eintreffen des ersten Rückwurfs und eigentlichem Halleinsatz.

Befindet sich die Schallquelle sehr nahe an der Rückwand, kann der entsprechende schallverstärkende Rückwurf für diese Abschätzung als gleichzeitig mit dem Primärschall angenommen werden, um so mehr, als er sich zeitlich vom eigentlichen Hallbeginn distanziert, so dass auch dann für den Halleinsatz die nächste Seiten- oder Deckenfläche massgebend bleibt. – Bei grösserer Entfernung von der Rückwand gilt vorstehende Überlegung wieder, wenn diese Entfernung mindestens  $d$  beträgt. Dasselbe gilt auch für die Bodenreflexion, was an einem Zahlenbeispiel gezeigt werden soll:

*Beispiel.* Schallquelle und Mikrophon auf Höhe  $d = 1,5$  m, Aufnahmestand  $r = 1$  m.

$$t = \frac{1}{c} \left[ \sqrt{1 + 9} - 1 \right] = 6,5 \text{ ms}$$

Dieser einmalige Rückwurf eilt dem Halleinsatz deutlich vor. Noch «gleichzeitiger» erfolgt diese Tonwiederholung bei grösserem Mikrophonabstand. Schon bei  $r = 2$  m ist

$$t = \frac{1}{c} \left[ \sqrt{4 + 9} - 2 \right] = 4,7 \text{ ms}$$

Darin liegt ein zusätzlicher Grund, den Mikrophonabstand nicht geringer als unbedingt erforderlich zu wählen (Solisten, Sprache!) und möglichst die Boden- und Tischreflexionen auszuschalten, soll volle Klarheit bewahrt bleiben.

(Bei Mikrofonen mit Richtcharakteristik gelten sinngemäss die gleichen Überlegungen, wenn  $d$  den Abstand der nächsten in der Aufnahmerichtung liegende Begrenzungsfäche bedeutet.)

#### 6.2. Getrenntes Hallmikrophon

Auf das Hauptmikrophon mit Abstand  $r < R$  trifft der Hall mit der Laufwegdifferenz ein:

$$s = ct = \sqrt{r^2 + 4d^2} - r$$

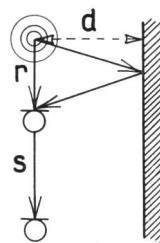


Fig. 12

Um dieselbe Verspätung bei Einsatz des künstlichen Halls zu erhalten, ist dementsprechend dieser Abstand zwischen Hauptmikrophon und Hallmikrophon einzuhalten. Es gilt wiederum Figur 11 mit der rechts aufgetragenen, auf Schallweg umgerechneten Ordinate ( $s = ct$ ). Mit dieser Umdeutung gelten dieselben Überlegungen wie im vorangehenden Abschnitt (6.1.). Die Aufstellung soll zweckmässigerweise so geschehen, dass das Hallmikrophon in einem Abstand  $\gg R$  von der Schallquelle zu stehen kommt.

Bei dieser Methode besteht weit grössere Freiheit in der Gestaltung des Nachhallecharakters, da für das Hallmikrophon Unabhängigkeit in Typ und Aufstellung besteht (Kugelmikrophon, Richtmikrophon nach vorn oder gegen eine bestimmte Reflexionsfläche usw. gerichtet).

Die ausgeführten Überlegungen über Hallverzögerung gelten bei Verwendung von Kugelmikrofonen. Bei Richtmikrofonen bestimmt die Richtcharakteristik, welche Reflexionsfläche für den Halleinsatz massgebend ist. Eine allgemeine Überlegung lässt sich nicht mehr anstellen, da die Bedingungen zu stark von der Raumgestaltung und der Mikrophonaufstellung abhängen, aber die vorerwähnten durchgeführten Abschätzungen zeigen genügend, wie die entsprechenden Überlegungen von Fall zu Fall abzuändern sind.

Bei den leider oft zu kleinen Aufnahmeräumen ist es nicht angebracht, mit Kugelmikrofonen zu arbeiten, nicht nur weil sonst der Hallradius und damit der Mikrophonabstand zu gering ausfallen würden, sondern auch um zeitlich die Rolle der Seitenwände (oder der Decke) als Rückwurffläche herabzusetzen.

*Beispiel.* In einem Raum von  $7 \times 11 \times 18$  m,  $V = 1400 \text{ m}^3$  und  $T = 1,5 \text{ sec}$  ist  $R = 3 \text{ m}$ . Die Schallquelle befindet sich  $d = 5 \text{ m}$  vor der reflektierenden Rückwand, das Mikrophon in der Raumachse  $r = 2 \text{ m}$  davon entfernt. Verwendet man genügend schmal gebündelte Richtmikrofone, können in bezug auf die zuerst auftreffende Reflexion Decke, Boden, Seitenwände vernachlässigt werden. Es ist dann:

Laufweg für Direktschall:  $r$   
Laufweg für Hallbeginn:  $2d + r$

Fig. 13

Das Hallmikrophon ist demnach im Abstand  $s = 2d = 10 \text{ m}$  vom Hauptmikrophon aufzustellen, oder bei nur einem Mikrophon sollte die Verspätung durch die Zwischenaufnahme  $t = 2d/c = 30 \text{ ms}$  betragen.

Soll die Aufstellung getrennter Mikrofone noch möglich sein, folgt der grösstmögliche Abstand der Schallquelle von der Rückwand bei einer Raumlänge  $L$  aus:

$$d + r + 2d = L$$

also

$$d = \frac{L - r}{3}$$

In unserem Beispiel:

$$d = \frac{18 - 2}{3} = 5,3 \text{ m}$$

Kann dieser Abstand nicht eingehalten werden, ist es möglich, die fehlende Laufzeitdifferenz noch durch die Methode der Zwischenaufnahme hinzuzufügen. – Die Verzögerung von 30 ms würde bei  $r = 2 \text{ m}$  einem seitlichen Wandabstand von 4,9 m entsprechen und wird nun (schmale Richtcharakteristik!) auch dann erhalten bleiben, wenn die Schallquelle näher an der Seitenwand steht. Diese Überlegung kann von Bedeutung sein, wenn man einen komplexen Schallkörper (Orchester, Chor) in einem zu kleinen Raum aufnehmen muss, und sie zeigt, wie auch vom soeben behandelten Standpunkt aus bei schwierigeren Bedingungen den Richtmikrofonen der Vorzug zu geben ist.

## 7. Intensitätsverhältnis von Hall zu Direktschall

### 7.1. Ohne künstlichen Hall

Beim Mithören im Raum selber wirkt die optische Lokalisierung der Schallquelle dem Verwischen der Deutlichkeit durch den Hall entgegen. Aufnahmen, im Abstand des Hallradius durchgeführt, wirken hingegen zu hallig. Man wird deswegen unterhalb dieses Abstandes bleiben müssen. Beim Mithören im Raum trifft der Direktschall nahezu gleichzeitig auf beide Ohren. Sicher genügende Lokalisierung tritt dann (im Extremfall) auf, wenn der Hallrückwurf nur auf ein Ohr wirkt, das heißt (Hören im Hallabstand  $R$  vorausgesetzt), dass er dann gegenüber dem Direktschall einen um 6 dB niedrigeren Pegel aufweist. Um dieselben Verhältnisse am Mikrophon zu verwirklichen, ist auf halbe Hallintensität zu gehen, beziehungsweise auf den Abstand  $1/\sqrt{2} \cdot R = 0,7 \cdot R$ . Dies soll, der annähernden Überlegung und der verschiedenen stilistischen Forderungen wegen, nur als Faustregel gelten.

### 7.2. Mit künstlichem Nachhall

#### 7.2.1. Künstlicher Hall ohne Zeitverzögerung

Wird der künstliche Nachhall auf den gleichen Pegel eingestellt wie der natürliche, gilt folgende Überlegung: Der Aufnahmeabstand

$$r = \sqrt{k \frac{V}{T}}$$

(der das Verhältnis von Hall zu Direktschall darstellt) bleibt demjenigen im hypothetischen Raum  $V'$  mit dem künstlich erzeugten Hall  $T'$  gleich; also ist das scheinbare Raumvolumen

$$V' = V \frac{T'}{T}$$

Es nimmt in gleicher Masse wie der Nachhall zu, wobei sich aber die Deutlichkeit vermindert. Es ist auch nicht zu vergessen, dass die optimale Nachhallezeit eines Raumes nicht proportional zum Volumen steht, sondern weniger rasch als dieses ansteigt.

Wird auf Erhalten der Deutlichkeit Gewicht gelegt, ist zu berücksichtigen, dass die hauptsächliche Energie innerhalb 50 ms einzutreffen hat. Genauer, dass nach 50 ms eintreffende Beiträge 10 dB geschwächt sein müssen. Da man im Verhältnis der praktisch durch die Hallmaschine beigefügten Hallzeiten das Intervall von 50 ms vernachlässigen kann, gilt die Faustregel, den Pegel des künstlichen Halls gegenüber dem Direktschall etwa 10 dB niedriger zu halten.

### 7.2.2. Künstlicher Hall mit Zeitverzögerung

Wie vorstehend ausgeführt, dient die Verzögerung zur Wahrung der Deutlichkeit und des Raumvolumeneindrucks. – Nach der Zeitverzögerung  $t$  setzt der um  $x$  dB niedrigere Nachhall ein. Verlangt wird nach

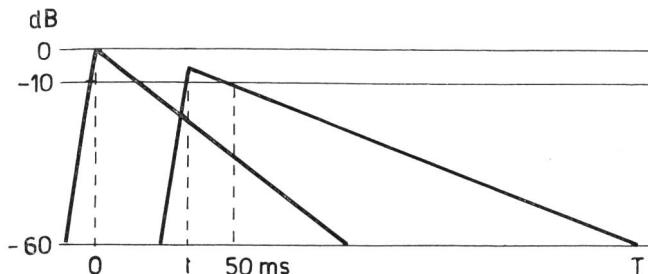


Fig. 14.

50 ms ein um 10 dB niedrigerer Pegel. Es wäre sinnlos, hier die in bezug auf  $T$  geringen zeitlichen Differenzen zwischen Halleinsatz und 50 ms Zeitabstand zu berücksichtigen, so dass weiterhin die Faustregel gilt, den Hallpegel um etwa  $x = -10$  dB vom Direktschall abzusetzen.

## 8. Schlussbemerkung

Der unter Berücksichtigung der verschiedenen angedeuteten Gesichtspunkte dosierte Hall ist geeignet, die durch Schallfeldüberlegungen gewonnene Plastizität zu vergrössern (oder zumindest nicht zu verwischen) und einen guten Raumeindruck zu vermitteln. Würde dieser Hall als zweite, getrennte Information der Sendung des Direktschlages beigegeben und über entsprechende Hall-Lautsprecher wiedergegeben, wobei dem Hauptlautsprecher nur der möglichst trockene Direktschall zugeschlagen wäre, könnte der Raumeindruck viel überzeugender übertragen werden als durch die Stereophonie. Während bei der Stereophonie der Hörer gewissermassen durch ein weites Fenster in den Raum hört (auch der Hall kommt immer von vorne, aus den beiden Lautsprechern, wenn nicht zusätzlich für genügende Schalldiffusion gesorgt wird), würde er bei Verwendung der beiden Kanäle zur Übertragung von Direktschall und Hall in den Raum versetzt. Allerdings ginge dabei die stereophonische, deutlichkeitsfördernde Seitenortung verloren. Um auch diese zu erhalten, müsste zu den beiden Stereophonikanälen ein dritter Kanal als Hall- oder Effektkanal hinzukommen. (Eine Erzeugung des künstlichen Halls, mit ent-

sprechender Zeitverzögerung beim Empfänger, bedeutet ein dem mittleren Radiohörer nicht zumutbarer Aufwand. Allerdings bietet der Handel schon Heimempfänger mit 50 ms Echotaste an). Zugunsten der getrennten Hallübertragung spricht der geringere Aufwand gegenüber der Stereophonie, da der Hallkanal weniger hohen Anforderungen genügen müsste als der Hauptkanal, was sowohl bei Tonspeichern (Schallplatte), Übertragungskette als auch Lautsprechern gegenüber der stereophonischen Technik nicht unbedeutende Vereinfachungen zuliesse.

## 9. Anhang

Die rechnerisch behandelten Anhaltspunkte zur mikrofonischen Aufnahmetechnik sollen hier noch durch einige prinzipielle Erwägungen ergänzt werden. Obwohl es sich um in der Akustik geläufige Feststellungen handelt (weshalb von Quellenangaben abgesehen werden kann), soll ihre Zusammenstellung den vorangehenden Überlegungen zu einer gewissen Abrundung verhelfen.

### 9.1. Ziel

Zur vollkommenen Wiedergabe müsste nicht nur der zeitliche Verlauf des Schallfeldes, sondern auch seine geometrische Struktur übertragen werden. Um einen entsprechenden Überblick zu gewinnen, sollen deswegen die wichtigsten Feldeigenschaften der geläufigsten Schallquellen (Musikinstrumente, Sprache) vom Standpunkt der Mikrophonaufnahme aufgezählt werden. Ferner sollen noch einige Bemerkungen über Mikrofone und über die Abhörbedingungen folgen.

### 9.2. Entfernungseindruck

Der Entfernungseindruck ist eine relative Empfindung, die, wie erwähnt, darauf beruht, dass die Verspätung der Schnelle gegenüber dem Wechseldruck entfernungsabhängig ist. Anders ausgedrückt: der Entfernungseindruck hängt mit der Krümmung der Wellenfront zusammen. (Nur in sehr grossem Abstand, bei eben gewordener Wellenfront, sind  $v$  und  $p$  konphas.)

Den *Eindruck der Nähe* erwecken:

- Ausgeprägte tieffrequente Ausgleichsvorgänge (vgl. Abschnitt 2). Die dabei fehlende, grösserer Abstand zugeschriebene Aufhellung des Tones (Abschnitt 4) verstärkt zusätzlich den Eindruck der Nähe. (Dies gilt für Abstände, in denen die Luftabsorption noch keine nennenswerte Rolle spielt.) – Umgekehrt werden Instrumente mit nicht tieffrequenten Einschwingvorgängen weit lokalisiert. Wichtig sind in dieser Beziehung die Frequenzen von 500 Hz abwärts (nach den Kurven der Figuren 3 und 4 befinden sich bei den normalerweise vorkommenden Mikrophondistanzen die Quellen höherer Frequenz praktisch schon im Fernfeld). Deswegen ist für die akustische Wiedergabe dieser Bereich besonders wichtig, entgegen der Modeerscheinung, die Bedeutung der (gewiss in anderer Beziehung nicht zu vernachlässigenden) hohen Frequenzen zu überschätzen.

b) Sehr tiefe Frequenzen. Da die Integrationszeit des Ohres etwa 20 ms beträgt, wirken tiefe Frequenzen unter 50 Hz als wiederholtes neues Anstoßen mit derselben Wirkung wie tieffrequente Ausgleichsvorgänge. Für tiefe Frequenzen ist zudem das Nähefeld besonders ausgedehnt, denn aus  $v_{nah}/v_{fern} = 1$  folgt für die Grenze des Feldes mit ausgesprochenem Nähecharakter  $r = \lambda/2\pi$ . Aus diesen Gründen bringt das Hinzufügen von Bassinstrumenten (selbst bei bescheidener Lautstärke) den Klang scheinbar näher heran (Orgelbau). Die erzeugte wirkungsvolle Plastik wird bei leichter Verstimming noch erhöht, denn Näheindruck wird noch erweckt durch:

c) Schwebungen. Differenztöne wirken näher als die sie erzeugenden Einzeltöne, da erstere fortgesetzten Einschwingvorgängen vergleichbar sind. Aus diesem Grunde klingen scharfe Dissonanzen besonders aufdringlich und aus dem gesamten Klangbild hervortretend. (Bewusstes kompositorisches Effektmittel.)

Es braucht nicht besonders unterstrichen zu werden, dass alle diese Effekte die Aufnahme des direkten Schallweges voraussetzen, ohne Verwischung durch natürlichen oder künstlichen Hall (Bedeutung der Hallverzögerung  $> 20$  ms). Direkt wirkende Schallquellen scheinen immer näher.

Hingegen ist zu beachten, dass die Anregung tief frequenter Ausgleichsvorgänge nicht gleichbedeutend ist mit hohen Amplituden tiefer Töne (*E. Skudrzyk*). Deren Anregung erfolgt im Gegenteil vorzugsweise beim Spielen von in bezug auf die Instrumentdimensionen hohen Tönen: Zum Erreichen der Stationärschwingung ist öfters Hin- und Herwandern der Erregungsfront im Instrument erforderlich. Hierzu ein überschlagsmässiges Zahlenbeispiel:

Auf einem Cello soll ein Ton von 1000 Hz erzeugt werden. Die Stegschwingungen werden auf den Bassbalken übertragen. (Statische Funktion des Bassbalkens: Stegstütze in der Nähe der durch das linke f-Loch geschwächten Decke, entsprechend dem Stimmstock auf der rechten Seite. Dynamische Funktion: Übertragung der erzwungenen Schwingung auf die ganze Deckenlänge.) Den Biegeschwingungen eines Balkens entspricht die Phasengeschwindigkeit

$$w = \sqrt{\omega} \sqrt[4]{\frac{E J}{\rho F}}$$

$E$  = Elastizitätsmodul

$J$  = Flächenträgheitsmoment des Querschnittes

$F$  = Querschnittsfläche

$\rho$  = Dichte

Mit den angenähernten Werten  $E = 10^8$  gr\*/cm<sup>2</sup>,  $J = 1/12$  cm<sup>4</sup>,  $F = 1$  cm<sup>2</sup>,  $\rho = 0,5$  gr/cm<sup>3</sup> wird daraus

$$w = \sqrt{2\pi 1000} \sqrt[4]{\frac{10^8}{6}} \approx 5000 \text{ cm/s} = 5 \text{ cm/ms}$$

Die Länge des Bassbalkens liegt in der Grössenordnung von  $l = 50$  cm, so dass das beidseitige

Abwandern der Erregungsfront und deren Rückwurf an den Balkenenden mit der Frequenz von  $f = w/l = 100$  Hz erfolgt, also über 3 Oktaven tiefer liegt als der stationär abgestrahlte Grundton. Erst nach wiederholten Reflexionen stellt sich die Rückkopplung mit der Saiten-Steg-Frequenz stabil ein. – Beim Anspielen eines tiefen Tones liegt die betrachtete Wanderfrequenz näher beim Grundton selbst, so dass dieser den Stationärzustand in einer Zeit erreicht, die nicht wesentlich von seiner eigenen Periode abweicht. Da es sich aber in diesem Fall um längere Perioden handelt, kann zusammenfassend gesagt werden, dass die zeitliche Dauer der Einschwingvorgänge mit den Dimensionen der Schallquelle zusammenhängt.

Ausgedehnte Schallquellen: grosse Einschwingzeiten. Punktförmige Schallquellen: kurze Einschwingzeiten.

Die umgekehrte Zuordnung der Schallquellenausdehnung aus der elektroakustischen Wiedergabe kann nur erfolgen bei Aufnahme innerhalb Hallradius und bei entsprechender Verzögerung des künstlichen Halls (sonst überlagern sich die Ausgleichsvorgänge von Raum oder Hallplatte).

### 9.3. Musikinstrumente

Die durchschnittlichen ungefähren Ausmassen der hauptsächlichsten Musikinstrumente und die entsprechenden Tonumfänge (der Vergleichbarkeit wegen in Wellenlängen umgerechnet) können nachfolgender Zusammenstellung entnommen werden.

#### Streichinstrumente

	Korpusdimension in cm	$\lambda$ in cm
Violine	$20 \times 36$	170...10,8
Bratsche	$24 \times 39$	260...26
Cello	$44 \times 75$	520...39
Kontrabass	$60 \times 120$	830...43

#### Holz

	Länge in cm	Schallöffnung $\varnothing$	$\lambda$ in cm
Piccolo	30	0,7	58...8
Mundstück	8		
Flöte	67	2	130...16
Mundstück	18		
Oboe	59	3,5	145...24
Englischhorn	85	3,2	210...36
Klarinette	71	6	240...24
Rohr		1,5	
Bassklarinette	150		490...48
Fagott	250	4	580...55
Kontrafagott	600	8	1040...146

#### Blech

Trompete	140	11,5	280...36
Hörner	280...380	31	590...48
Posaunen	230...360	20	780...73
Tuben	420	35	830...87

#### Schlaginstrumente u. a.

	cm	
Pauken	$\varnothing = 45...70$	390...195
Harfe	Korpus: $39 \times 135$	1100...10
Klavier	$120 \times 160$	1230...8
Celesta		260...26

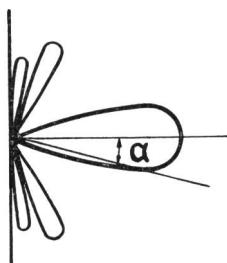
Zur korrekten Beurteilung der Feldeigenschaften der Musikinstrumente genügt die Berücksichtigung der geometrischen Dimensionen nicht; wesentlich sind auch die spezifischen Abstrahlungseigenschaften, wozu die Unterscheidung zwischen Schwingungstypen verschiedener Ordnung gehört. Es sei dazu vorerst kurz an die idealisierten, entsprechenden Eigenarten erinnert:

### 9.3.1. Strahler nullter Ordnung

Dieser wird bekanntlich durch eine pulsierende Kugel dargestellt. Er lässt sich unter gewissen Bedingungen auch annähern durch den idealisierten Spezialfall einer starren Kolbenmembran mit Durchmesser  $D = 2\varrho$ , die in einer unendlich ausgedehnten Schallwand schwingt. In diesem Fall erfolgt im wesentlichen die Abstrahlung innerhalb eines Kegels mit Öffnungswinkel

$$\operatorname{tg} \alpha = 0,6 \frac{\lambda}{\varrho}$$

Fig. 15



wobei nur der durch die Schallwand begrenzte vordere Halbraum von Interesse ist. Außerhalb dieses Kegels kommen schwächere Nebenmaxima zur Ausbildung. Die Annäherung an den Kugelstrahler nullter Ordnung ist desto besser, je niedriger die Frequenz und je kleiner der Membrandurchmesser ist. (Also: Um so bessere Näherung an die Kugelwelle, je kleiner die abstrahlende Fläche im Vergleich zur Wellenlänge, das heißt, je relativ punktförmiger die Schallquelle.)

### 9.3.2. Strahler erster Ordnung

Dargestellt durch eine schwingende Kugel, oder angenähert:

- durch Kolbenmembran ohne Schallwand (Achter-Richtwirkung durch akustischen Kurzschluss).
- durch Kolbenmembran in unendlicher Schallwand, wenn die Wellenlänge nicht mehr gross gegenüber dem Membrandurchmesser ist. Die Schallwand verhindert den akustischen Kurzschluss, aber die Richtungsbündelung (Zusammendrägen nach der Mittelnormalen) wird bei festem Radius mit zunehmender Frequenz immer schärfner, so dass sich das Feld dem Charakter des Strahlers erster Ordnung nähert, wobei die Bedeutung der Schallwand immer geringer wird.

Zusammengefasst:

Ausdehnung der Schallquelle  $< \lambda$ : keine merklichen Richteffekte, das heißt, kugelsymmetrische Abstrahlung.

Schallquelle vergleichbar oder  $> \lambda$ : Richtwirkung desto stärker, je höher die Frequenz.

### 9.3.3. Strahler höherer Ordnung

Bei der nicht mehr idealisierten Membran, das heißt, der nicht mehr starren Abstrahlungsfläche, entsteht durch die Bildung von Knotenlinien eine Strahlung höherer Ordnung. Dabei liegt das Maximum der abgestrahlten Leistung bei um so grösseren Werten von  $\frac{2\pi\varrho}{\lambda}$ , je höher die Ordnung des Strahlers ist. Dies bedeutet, dass das Strahlungsmaximum sich um so mehr gegen höhere Frequenzen verschiebt

- je höher die Ordnung bei gegebenem  $\varrho$  (Strahlerdimension);
- je geringer der Strahlerradius bei gegebener Ordnung.

Allerdings tritt diese Leistung wegen der gegenphasigen Abstrahlung der durch die Knotenlinien getrennten Flächenelemente im Fernfeld nicht merklich in Erscheinung. Das Fernfeld kann im wesentlichen immer auf die Kugelwellenanteile der niedrigsten auftretenden Ordnung zurückgeführt werden.

Die nullte oder die erste Ordnung bleibt im Fernfeld jedoch nur vorherrschend für Strahler bis zur Dimension der Wellenlänge. Genauer:

$$\text{aus } \frac{2\pi\varrho}{\lambda} = 1 \text{ folgt } D_{\text{Strahler}} \approx \frac{\lambda}{3}$$

Dieser Wellenlänge entspricht die Grenzfrequenz  $\nu_g = \frac{100}{D}$  (D in m).

Während also bei tiefen Frequenzen (beziehungsweise kleinen Schallquellen) die durch Kugelwellen höherer Ordnung bedingte Abstrahlung von Teiltönen relativ bedeutungslos bleibt, darf für höhere Frequenzen (oder grössere Schallquellen) der Strahlungswiderstand höherer Ordnung nicht vernachlässigt werden.

Wenden wir diese physikalischen Feststellungen auf die Praxis an, vor allem in Hinblick auf den Gebrauch der Kurvenscharen der Figuren 3 und 4.

### 9.3.4. Angenähert punktförmige Schallquellen

Dazu kann man rechnen: Sprecher, kleine Schlaginstrumente, Blasinstrumente mit kleiner schwingender Luftsäule, wenn die (kleine) Stürze auf das Mikrophon gerichtet wird. (Beispielsweise ist bei Holzblasinstrumenten die Schallöffnung klein, selbst in bezug auf die geringste gespielte Wellenlänge.) In diesen Fällen kann Strahlung nullter Ordnung (also Figur 3) angenommen werden.

Allerdings erfolgt bei der Flöte die Abstrahlung vorwiegend am Mundstück, das jedoch die Größenordnung der Wellenlänge der höchsten Töne nicht überschreitet.

Zur menschlichen Stimme ist noch zu bemerken, dass zur Erfassung des gesamten Spektrums die seitliche Abweichung des Mikrofons gegenüber der Sprecherrichtung höchstens  $45^\circ$  betragen darf (Trendelenburg), ein Winkel, der auch dem seitlichen Empfindlichkeitsbereich von Richtmikrofonen ent-

spricht. Die Bündelung ist eine Folge des hohen Frequenzgehaltes der Zischlaute:  $\nu = 10\,000$  Hz bei  $\varrho = 2$  cm ergibt

$$\operatorname{tg} \alpha = 0,6 \cdot \frac{c}{\varrho \cdot \nu} \approx 1$$

$$\alpha = 45^\circ$$

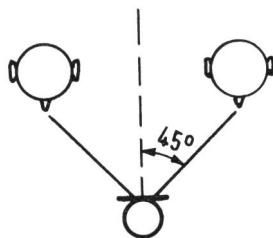


Fig. 16

Ausserhalb der  $45^\circ$ -Richtung geht folglich die Deutlichkeit der für die Sprachverständlichkeit erforderlichen hohen Formanten verloren.

### 9.3.5. Angenähert kolbenartige Schallquellen

Bei Schalltrichtern mit gegenüber der Trichteröffnung grossen Längen (bei allen Blechblasinstrumenten zutreffend) erfolgt die Anregung des Schallfeldes durch die Fläche der Austrittsöffnung, die nahezu wie eine gleich grosse Kolbenmembran schwingt. Da zudem die Stürzenöffnung der Blechblasinstrumente bei den höheren Frequenzen mit der Wellenlänge vergleichbar ist, sind diese Instrumente als Strahler erster Ordnung zu betrachten (also Figur 4). Allerdings wird bei mittleren und tiefen Frequenzen das Verhältnis von Stürzendurchmesser zu Wellenlänge wieder klein, und da ausserdem wegen abtrennender Rohrwand ein akustischer Kurzschluss nicht auftritt, hat man dort Strahlung nullter Ordnung (Figur 3). Beispielsweise wird die Entscheidung über die Strahlungsart bei der Trompete zur Stilfrage: die hoch geführte Barocktrompete kann, als zur ersten Ordnung gehörend, nach Figur 4 weiter entfernt aufgestellt werden als bei Verwendung der der nullten Ordnung (Figur 3) entsprechenden Lagen. Diese Eigenschaft erleichtert es, Verzerrungen am Mikrophon bei den erheblichen Lautstärken der höchsten Trompetentöne zu vermeiden, ohne den Eindruck zu grosser Entfernung hervorzurufen.

Zusammenfassend gilt für tiefe Frequenzen:  
bei verhältnismässig kleiner Oberfläche des Strahlers:  
nullte Ordnung,  
bei verhältnismässig grosser Oberfläche des Strahlers:  
erste Ordnung.

Die Bündelung bei hohen Frequenzen berührt die hier durchgeführten Betrachtungen über den Distanz-eindruck nicht stark, da dieser vor allem den tiefen Frequenzen  $\nu < 500$  Hz zuzuschreiben ist, also Wellenlängen der Grössenordnung von 0,7 m und mehr. Sind die Dimensionen der abstrahlenden Flächen kleiner (was bei den meisten Musikinstrumenten zutrifft), kann nullte Ordnung angenommen werden.

Bei sehr hohen Frequenzen gehen nach Figur 4 die Kurven für die erste Ordnung in die Geraden der nullten Ordnung über (wegen der geringen Reich-

weite des Nahfeldes), so dass im allgemeinen angenähert gilt:

$\nu \ll \nu_g$ : Strahler nullter Ordnung,

$\nu \gg \nu_g$ : Strahler nullter Ordnung,

dazwischen je nach Schallquelle verschieden.

Nebenbei sei daran erinnert, dass den Eigenschaften der atmenden Kugel entsprechend

für  $\nu \ll \nu_g$  der Strahlungswiderstand mit  $\nu^2$  zunimmt,

für  $\nu \gg \nu_g$  der Strahlungswiderstand frequenzunabhängig wird.

Der sehr geringen Abstrahlungsenergie bei tiefen Frequenzen entsprechend, tendiert der Musikinstrumentenbau darauf hin, die Abstrahlung in diesem Gebiet nicht noch durch akustischen Kurzschluss zu vermindern (worauf im nächsten Abschnitt noch näher eingegangen wird). Dies steht im Einklang mit den 9.3.3. geschilderten Betrachtungen. Selbst für etwas pessimistische Auswertung wird es demzufolge genügen, die Kurven für erste Ordnung zugrunde zu legen, so dass es sich erübrigert, die Schallfeldbetrachtungen auch auf höhere Ordnungen zu erweitern. Dazu sei ausserdem noch einmal daran erinnert, dass für den Standpunkt des Entfernungseindruckes, die mit Strahlung höherer Ordnung verbundenen hohen Teiltöne verhältnismässig bedeutungslos sind.

### 9.3.6. Flächenstrahler

Wesentlich komplizierter ist das Verhalten von Instrumenten mit ausgedehnten abstrahlenden Flächen: Streichinstrumente, Klavier, grosses Schlagzeug. Solche Flächenstrahler schwingen meistens in höherer Ordnung, und ihr kompliziertes Verhalten lässt sich nur experimentell vollständig übersehen. Immerhin sind einige generelle Aussagen auch hier möglich.

Da die Abstrahlung tiefer Frequenzen desto ungünstiger wird, je höher die Ordnung der Schwingungsform ist, strebt der Instrumentenbau möglichstes Vermeiden von Knotenlinien, also Strahler nullter Ordnung an. Dieser Forderung genügen altitalienische Meistergeigen, wenigstens im mittleren Frequenzgebiet (um 400 Hz), und der Grad ihrer Erfüllung ist ein Gütekriterium solcher Instrumente. (Im tiefsten Frequenzgebiet kann allerdings wegen der geringen Dimensionen des Resonanzkörpers keine wesentliche Grundtonabstrahlung erwartet werden. Noch mehr trifft dieser Ausfall bei den anderen Instrumenten der Streichergruppe zu, da die Dimensionen gegenüber der Geige nicht im gleichen Verhältnis wie die tiefere Stimmung zunehmen.) Diesem Umstand ist bei den Meisterinstrumenten gegenüber nicht vollwertigen Geigen die höhere Grundtonamplitude zu verdanken. Bei billigen, scharf klingenden neueren Instrumenten entsteht der Grundton vorwiegend physiologisch durch das Residuum. In Konzertsälen mit ausgesprochener Höhenabsorption (vor allem durch das Publikum) wird das Residuum (die Gruppe

der höchsten Teiltöne), und damit die Grundtonempfindung, stark geschwächt. Die physikalische Realität des Grundtones bei Meistergeigen (mit entsprechend geringerer Beeinflussung durch die Raumabsorption) lässt diese Instrumente aus dem Klangbild des Geigenchores hervortreten (vgl. 9.2.), und zwar durch ihre Klangfülle und nicht durch Schärfe. Dazu erleichtert die Schwingungsmöglichkeit im Grundtongebiet (Meistergeigen zeichnen sich auch durch günstige Verteilung der Resonanzen aus) die Tonbildung. Beide Umstände erklären die Beliebtheit solcher Instrumente, sowohl bei den Solisten als auch bei den Zuhörern.

Für Frequenzen  $v > v_g = \frac{100}{D} \approx 500$  Hz lässt sich

dieses Ideal prinzipiell nicht mehr verwirklichen, die Geigen schwingen dann zumindest in der ersten Ordnung. Die hohen Frequenzen werden vorwiegend etwa 20° von der Mittelnormalen weg abgestrahlt, also bei normaler Haltung des Instrumentes in die Horizontalebene gegen die Zuhörer (*H. Backhaus*).

Das Fell grosser Schlaginstrumente schwingt in der ersten oder zweiten Ordnung (je nach Anschlagstelle). Der Einschwingvorgang wird jedoch durch die Luftresonanzen im Kessel bestimmt.

Da Mikrophone normalerweise in der Hauptstrahlungsrichtung der Musikinstrumente aufgestellt werden, muss noch einiges zur *Strahlungsbündelung* gesagt werden.

Bei grossflächigen Strahlern bedeutet die ausgesprochene Bündelung bestimmter Frequenzgebiete in die Hauptstrahlungsrichtung, gegenüber allseitig gleichmässiger Abstrahlung, eine geringere Intensitätsabnahme mit der Entfernung von der Schallquelle. Eine solche Bündelung, die selbst gegenüber derjenigen eines punktförmigen Strahlers erster Ordnung ausgeprägter ist, bedeutet gegenüber diesem eine Abflachung der Wellenfront. Beides zusammen bewirkt (immer in der Hauptstrahlungsrichtung) eine Annäherung an die Verhältnisse ebener Wellen, also eine scheinbare Entfernung der Schallquelle. Die räumliche Konzentration des Direktschalles fällt dabei zugunsten der Lautstärke aus (gegenüber der Abschwächung bei wirklicher Abstandsvergrösserung). Da grossflächige Strahler derartige Richtwirkungen aufweisen, kann man diese Eigenschaft beispielsweise bei Klavieraufnahmen wirkungsvoll ausnützen: wird das Mikrofon in der Hauptstrahlungsrichtung der Bässe aufgestellt, so wird die scheinbare Entfernung der tiefen Frequenzen etwas erhöht, und es ist somit möglich, auch ohne zu grossen Mikrofonabstand, dem in den Abschnitten 3.1. und 3.2. dargestellten prinzipiellen Effekt einer gegenüber dem Diskant zu ausgesprochenen Präsenz der tiefen Lagen entgegenzuwirken. Das Kriterium des Hallradius führt zur gleichen Folgerung: Der normalerweise anzutreffende Anstieg des Nachhalls bei tiefen Frequenzen verringert (gegenüber höheren Frequenzen) entsprechend den Hallradius und damit den

günstigen Mikrofonabstand. Das Mikrofon müsste also ungeschickterweise noch weiter ins Nahfeld tiefer Frequenzen gerückt werden. Die Bündelung in der Hauptstrahlungsrichtung bedeutet aber eine räumliche Konzentration des Beitrags zum Direktschall, so dass in dieser Richtung der Abstand doch grösser bleiben darf als bei kugelsymmetrischer Abstrahlung. Dies ist also ein zusätzlicher Grund bei Instrumenten grossen Tonumfangs, wie etwa beim Klavier, das Mikrofon in der Hauptstrahlungsrichtung tiefer Frequenzen aufzustellen (wenigstens soweit dies ohne Beeinträchtigung des klanglichen Gleichgewichtes möglich ist).

(Beim Flügel sind selbst in hohen Lagen durch das Schlaggeräusch tiefe Frequenzen wesentlich beteiligt.)

#### 9.4. Mikrophone

Praktisch genügen heute nur noch Kondensatormikrophone den Anforderungen nach getreuen Musikaufnahmen bei möglichster Erhaltung der Ausgleichsvorgänge. Da für die Übertragung des Entfernungsindruckes die korrekte Erfassung der Frequenzen etwa unterhalb 500 Hz wesentlich ist, soll die Einschwingzeit der Mikrofonmembran kleiner als 2 ms sein.

Besteht das Kondensatormikrofon aus einer Membran, die gegenüber einer nicht durchlochten Gegenelektrode angeordnet ist, wirkt dieses als p-Empfänger. Die Kugelcharakteristik wird dabei aber nur bei mittleren und tiefen Frequenzen erreicht, denn im höchsten Frequenzgebiet ( $\lambda \approx$  Membrandurchmesser) erzeugt die Druckstauung vor der Membran eine unerwünschte Richtwirkung. Solche Mikrophone (etwa M 50) sind als ausgesprochene Fernfeldmikrophone zu betrachten, also in denjenigen Entfernungen anzuwenden, in denen die Nahfeldkomponenten schon derart abgeklungen sind, dass ihre Erfassung bedeutungslos würde. Ihr Einsatz rechtfertigt sich auch, wenn auf Distanzindruck bewusst verzichtet wird.

Wird die Gegenelektrode mit durchgehenden Bohrungen versehen, ist der Druckgradient die antreibende Kraft. Die gelieferte Ausgangsspannung wird jedoch proportional zur Schnelle. Ein solcher v-Empfänger weist Achtercharakteristik auf.

Zur Übertragung der räumlichen Tiefe ist p- und v-Empfang zu kombinieren. Dies geschieht durch Kondensatormikrophone mit zwei Membranen auf den beiden Seiten der durchbohrten festen Elektrode. Elektrisch wirksam ist nur eine Membran, während die andere als akustisches Verzögerungsglied wirkt, das für den von hinten eintreffenden Schall den Laufzeitunterschied zwischen den auf die beiden Seiten der wirksamen Membran gerichteten Wege aufhebt. (Etwa M 49 bei entsprechender Stellung des Richtwirkungsreglers.)

Da ein solches Mikrofon mit Nierencharakteristik als Überlagerung von Kugel und Achtercharakteristik aufgefasst werden kann, entspricht es den in Ab-

schnitt 3 gestellten Anforderungen von gemischemt p- und v-Empfang, es ermöglicht also allein die Erfassung der Feldstruktur im Nahfeld.

Das distanzvermittelnde Nierenmikrophon stellt zudem die beste heute erzielbare Annäherung an das Ohr dar. Seine Beliebtheit, etwa bei Life-Übertragungen, hängt weniger mit der relativen Schwächung des Saalgeräusches zusammen (das durch Reflexion doch auf das Mikrophon wirkt) als gerade mit dessen räumlicher Trennung.

Auf eine weitere Eigenheit solcher Mikrophone sei noch besonders hingewiesen: Da es nur auf eine Ausbreitungsrichtung anspricht, zeigt es bei stehenden Wellen im Raum keine Maxima und Minima auf, wenn seine Achse mit der Richtung der sich überlagernden Wellenzüge zusammenfällt.

(Für Einzelheiten über Eigenschaften und Aufbau von Mikrofonen und Lautsprechern sei auf die Spezialliteratur hingewiesen, wie etwa: *W. Reichhardt*: Grundlagen der Elektroakustik, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.G., Leipzig.)

### 9.5. Lautsprecher

Ideal für das Abhören wäre ein Lautsprecher, der (bei gleichem Schalldruck am Mikrophon) allseitig eine frequenzunabhängige konstante Leistung abstrahlt, also in keinem Frequenzgebiet gebündelt strahlt. Dies bedeutet aber, dass die Dimension des Lautsprechers so gross sein müsste, dass die primäre Schallwelle eben bleibt, da sonst die Krümmung der Primärwellenfront den Eindruck einer nahestehenden sekundären Schallquelle erwacht und die Übertragung der Tiefenstaffelung der Musikinstrumente illusorisch würde. Gerichtete Lautsprecher wirken näher als ungerichtete, wegen der grösseren Reichweite des Nahfeldes bei erster Ordnung gegenüber nullter Ordnung. Dies erklärt die Bedeutung einer genügend gross dimensionierten Schallwand. Besser als Einzel-lautsprecher ist die Parallelschaltung mehrerer auf einer Ebene angeordneter Tieftonstrahler. Die Forderung fehlender Richtwirkung im hohen Frequenzgebiet (wo das Abhören praktisch im Fernfeld erfolgt) wird am besten durch die kugelförmige Anordnung einer Anzahl von Hochtonlautsprechern erfüllt. Diesen Ansprüchen entspricht der deutsche Einheits-

Regielautsprecher. (In bezug auf diesen Lautsprecher sei auf eine Spezialschaltung von *F. Enkel* zur sekundären Steuerung der Strahlungsordnung in Abhängigkeit zur Dimension der primären Schallquellen, hingewiesen, die in den Gravesaner Blättern, 4 (1958), Heft 11/12, Seite 10, beschrieben wird.)

Auch grossflächige elektrostatische Lautsprecher genügen der Forderung, ebene Wellenfronten zu liefern, wenigstens in der Hauptstrahlungsrichtung angenähert, da sie auf der ganzen Fläche konphas angeregt werden. Diese Lautsprecher besitzen ausserdem den sonst schwer zu erreichenden Vorzug, die tiefen Frequenzen mit der für die hier durchgeföhrten Betrachtungen besonders wichtigen Treue des Zeitverlaufs wiederzugeben. Ihre Intensität ist allerdings nur bei verhältnismässig geringen Gesamtlautstärken (Zimmerlautstärke) genügend.

Ausser der klanglichen ist auch die räumliche Fülle, wie wiederholt bemerkt, durch die tieffrequenten Vorgänge gegeben. Dies führt einerseits zum Hinweis, im Kontrollraum nicht zu leise abzuhören (wegen des Empfindlichkeitsabfallen des Ohres im unteren Frequenzgebiet), was allerdings nicht dröhrender Lautstärke gleichzusetzen ist, anderseits zur Forderung, die tiefen Eigenfrequenzen von Lautsprecher und Raum genügend zu dämpfen. Dazu eignet sich besonders die raumakustische Verwendung von Membranabsorbern. Elektronische Entzerrung ermöglicht einen geraden Frequenzgang wieder herzustellen.

Nur peinliches Einhalten der angedeuteten Richtlinien rechtfertigt den Gebrauch hochwertiger Lautsprecher, um durch Erhaltung der Deutlichkeit tiefer Einschwingvorgänge die Plastizität zu erhöhen.

In der mittleren Hörerwohnung beträgt der Hallradius etwa 1 m, es herrscht also diffuses Schallfeld vor. Die Sorgfalt in der Lautsprecherwahl und -aufstellung rechtfertigt sich dennoch, da beim zwei-ohrigen Hören die Schallquellenlokalisierung durch den *Haaseffekt* erhalten bleibt.

**Adresse des Autors** Dr. *Ermanno Briner-Aimo*  
Dipl. Tonmeister  
c/o Radio della Svizzera italiana  
Campo Marzio  
LUGANO