

# Erhöhung der Richtungsselektivität von Richtmikrophonen durch Signalkorrelation

Wieland Weise, Heinrich Bietz  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

## Einleitung

Zur Vermessung der Winkelabhängigkeit von Schallfeldern sind Mikrophone mit hoher Richtwirkung erforderlich. Speziell in der PTB werden diese zur Bestimmung des Winkelspektrums der auf einen Testabsorber im Hallraum einfallenden Schallwellen benötigt. Mikrophone mit parabolischem Reflektor weisen zwar hohe Richtungsselektivität auf, stellen jedoch eine oftmals unerwünschte Störung des Schallfeldes dar. Die Richtwirkung marktüblicher Rohr-Richtmikrophone ist hingegen vor allem im tieffrequenten Bereich ungenügend. Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Richtwirkung ist die Verwendung von Mikrophonarrays. In [1] wurden die Ergebnisse für fünf nebeneinander angeordnete Richtmikrophone präsentiert. Damit allerdings auch in senkrechter Richtung eine Verbesserung der Richtwirkung erzielt wird, ist ein Kreuz aus zwei derartigen Arrays, bestehend aus neun Mikrophenen nötig. Die verwendeten Mikrophone müssen sowohl bezüglich des Amplituden- als auch des Phasenverlaufs im betrachteten Frequenzbereich in hohem Maße übereinstimmen.

Für den Fall, daß zur Schallanregung ein repetierendes Signal verwendet wird, beispielsweise bei Messen der Impulsantwort mit Maximalfolgen, kann durch Ausnutzen von Korrelationseigenschaften eine beachtliche Verbesserung der Richtwirkung bereits mit einem einzelnen Richtmikrophen erreicht werden. Dazu wird dieses auf einer Kreisbahn geführt, wobei ein in der Bauakustik üblicher Drehgalgen verwendet werden kann. Diese Methode wird vorgestellt, die erzielte Richtwirkung mit der eines Mikrophenarrays verglichen und experimentelle Ergebnisse bei Einsatz im Hallraum unter Verwendung von Maximalfolgen präsentiert.

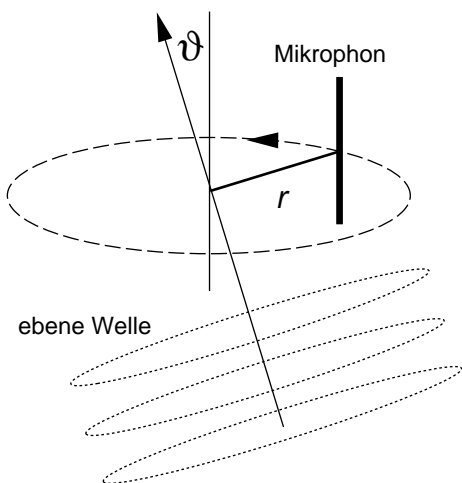


Abbildung 1: Bewegung des Richtmikrophons auf einer Kreisbahn; einfallende ebene Welle.

## Analyse des Verfahrens

Das Mikrophen bewege sich auf einer Kreisbahn  $\vec{r}(t)$  mit Radius  $r$ , wie in Abb. 1 dargestellt. Das Koordinatensystem sei so gewählt, daß die Drehebene in der  $x$ - $y$ -Ebene liege, der Drehpunkt im Ursprung:

$$\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} r \cos(\Omega t) \\ r \sin(\Omega t) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Eine ebene Welle mit Frequenz  $f$  und Wellenlänge  $\lambda = c/f$  falle unter Azimutwinkel  $\varphi$  und Polarwinkel  $\vartheta$  zur Drehachse ein. Ihre Schalldruckamplitude sei  $A(\vartheta, \varphi, f)$ . Der Schalldruck am Ort des Mikrophons zur Zeit  $t$  ist mit Gl. (1):

$$p(t) = A(\vartheta, \varphi, f) \exp\left(i2\pi f \left[\frac{r}{c} \sin \vartheta \cos(\Omega t - \varphi) - t\right]\right) \quad (2)$$

Es wird nun ein repetierendes Anregungssignal verwendet und über eine große Anzahl aufgezeichneter Sequenzen des Mikrophenarrays gemittelt. Mikrophenumlauf und repetierendes Anregungssignal müssen zueinander asynchron sein, sodaß während der Messung jedes kleine Intervall  $\Delta$  von Mikrophenpositionen gleichhäufig mit jedem Zeitpunkt der Anregungssequenz zusammentrifft ( $\Delta \ll \lambda$ ). Dann ist die Mittelung über die aufgezeichneten Sequenzen äquivalent einer Mittelung über den Schalldruck entlang der gesamten Mikrophenbahn für festen Zeitpunkt  $t$  innerhalb der Anregungssequenz:

$$\begin{aligned} \langle p(t) \rangle &= A \exp(-i2\pi f t) \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left(i \frac{2\pi f r}{c} \sin \vartheta \cos \gamma\right) d\gamma \\ &= A \exp(-i2\pi f t) J_0\left(\frac{2\pi f r}{c} \sin \vartheta\right) \end{aligned} \quad (3)$$

wobei  $J_0$  zylindrische Besselfunktion ist. Die Richtwirkung beruht darauf, daß nur für parallel zur Drehachse laufende ebene Wellen die Phase über den gesamten Integrationsweg konstant ist und somit vollständige konstruktive Interferenz vorliegt. Mißt das Mikrophen nicht den Schalldruck am Ort  $\vec{r}$ , sondern hat selbst eine Richtcharakteristik  $E(\vartheta)$ , ist die Richtcharakteristik  $R(\vartheta)$  des rotierenden Mikrophons:

$$R(\vartheta) = E(\vartheta) J_0\left(\frac{2\pi f r}{c} \sin \vartheta\right) \quad (4)$$

Die Richtcharakteristik eines Arrays aus  $n$  gleichen Mikrophen [1] ist im Vergleich dazu:

$$R(\vartheta) = E(\vartheta) \frac{\sin\left(n \frac{\pi f d}{c} \sin \vartheta\right)}{n \sin\left(\frac{\pi f d}{c} \sin \vartheta\right)} \quad (5)$$

mit  $d$  dem Abstand benachbarter Mikrophone.

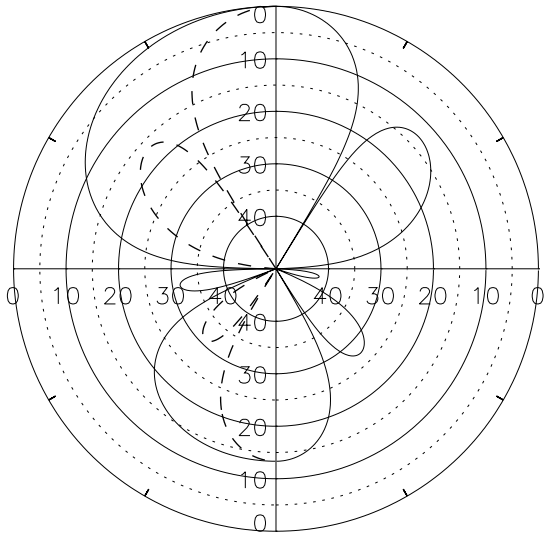


Abbildung 2: Gerechnete Richtcharakteristiken für 500 Hz in dB. Gestrichelt: Mikrophonarray,  $n = 5$ ,  $d = 25$  cm; durchgezogen, rechts: Einzelmikrophon auf Kreisbahn,  $r = 50$  cm; durchgezogen, links: ruhendes Mikrophon.

Abb. 2 zeigt theoretische Richtcharakteristiken für 500 Hz. Auf der linken Seite (durchgezogen) dargestellt ist die nach [2] berechnete Richtcharakteristik eines einzelnen ruhenden Interferenzrichtelements mit 50 cm Länge kombiniert mit einem Gradientenmikrophon, wie bei kommerziell vertriebenen Richtmikrofonen üblich [3]. Bei Einstrahlung unter  $45^\circ$  zur Vorwärtsrichtung erreicht die Dämpfung nur ca. 4 dB. Gestrichelt ist die mit einem Array aus  $n = 5$  derartigen Mikrofonen erreichbare Charakteristik nach Gl. (5). Die Gesamtbreite des Arrays ist 1 m. Die Dämpfung ist hier deutlich verbessert, bei  $45^\circ$  liegt sie bei ca. 17 dB. Auf der rechten Seite dargestellt ist die mit Gl. (4) berechnete Richtcharakteristik des Mikrophons bei Bewegung auf einer Kreisbahn mit 50 cm Radius, also gleicher Ausdehnung wie im Falle des Arrays. Die Dämpfung ist etwas geringer als für das Array, bei  $45^\circ$  ca. 13 dB. Die Ursache hierfür ist, daß die Einhüllende von  $J_0(x)$  in Gl. (4) asymptotisch mit  $1/\sqrt{x}$  abfällt, die Charakteristik in Gl. (5) hingegen näherungsweise wie  $\text{sinc}(x)$  mit  $1/x$ .

Abb. 3 zeigt links eine im Freifeldraum für  $f = 500$  Hz gemessene Charakteristik eines Richtmikrophons ohne Rotation. Rechts (durchgezogen) ist das Ergebnis für das rotierende Mikrophon ( $r = 50$  cm, Umlaufzeit ca. 16 s) bei Verwendung von Maximalfolgen (Periodendauer 743 ms) zu sehen. Die Zahl der Mittelungen war 90. Die gestrichelte Kurve ergibt sich durch Einsetzen der gemessenen Charakteristik des ruhenden Mikrophons in Gl. (4). Sie spiegelt das Ergebnis für ideale einfallende ebene Welle und unendliche Mittelungsdauer wieder.

## Hallraummessungen

Abb. 4 zeigt ebenfalls für  $f = 500$  Hz die Winkelabhängigkeit des Feldes im Hallraum (Volumen  $206 \text{ m}^3$ ), gemessen über  $360^\circ$  (horizontal) in  $10^\circ$ -Schritten, wobei ein Absorber mit ca.  $3 \text{ m}^2$  Fläche vor einer Seitenwand aufgestellt war. Die Nachhallzeit lag bei 5 s. Als Schallquelle diente eine Lautsprecherbox mit 70 cm Membrandurchmesser und entsprechend starker Richtwirkung zum Mikrophon hin. Die Mikrophonumlaufperiode war 32 s, der Bahndurchmesser

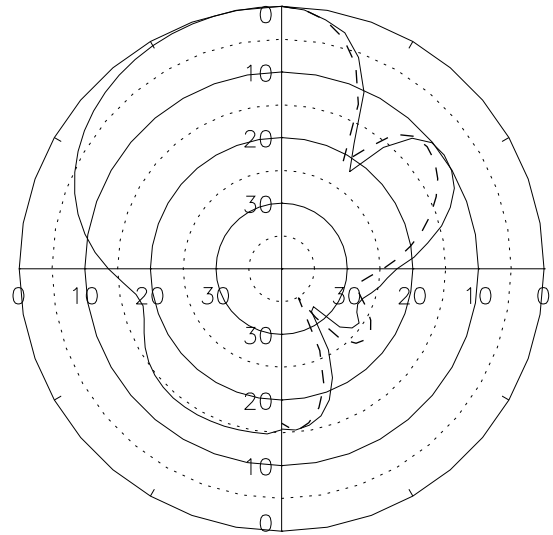


Abbildung 3: Gemessene Richtcharakteristiken für 500 Hz in dB. Durchgezogen, links: ruhendes Mikrophon; durchgezogen, rechts: Mikrophon auf Kreisbahn,  $r = 50$  cm; gestrichelt: Mit Meßwerten für ruhendes Mikrophon und Gl. (4) berechnet.

wie zuvor 50 cm. Der Abstand von Mikrophon und Lautsprecher bzw. Absorber war jeweils ca. 3 m. Es wurden Maximalfolgen mit 6 s Periodendauer verwendet, die Zahl der Mittelungen war 30. Bei Messung mit rotierendem Mikrophon (durchgezogen) wird das Winkelspektrum des Schallfeldes sehr viel deutlicher wiedergegeben als bei Messung mit ruhendem Mikrophon (gestrichelt), dies gilt insbesondere für den Direktschall des Lautspechers und für den durch den Absorber bewirkten Einbruch des Spektrums.

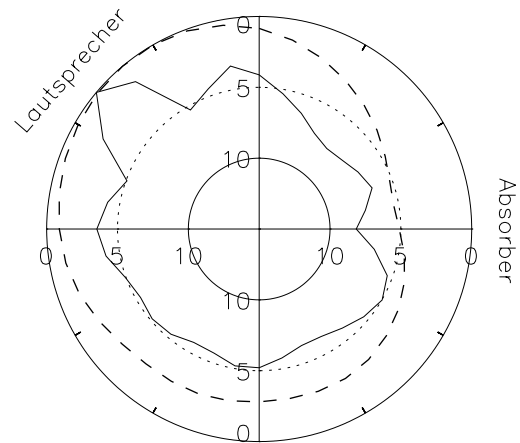


Abbildung 4: Messung im Hallraum für 500 Hz in dB. Lautsprecher- und Absorberposition sind markiert.

## Literatur

- [1] P. Dämmig, 'Eine Mikrophonanordnung großer Richtempfindlichkeit,' *Acustica* **10**, 120–123 (1960).
- [2] K. Tamm, G. Kurtze, 'Ein neuartiges Mikrophon mit großer Richtungsselektivität,' *Acustica* **4**, 469–470 (1954).
- [3] T. Andert, E. Simak, 'Interferenzmikrophon mit berechenbarer Richtcharakteristik,' *Acustica* **53**, 19–25 (1983).