



# Beschallungstechnik

Akustik-Serie Teil 8

## Gerichtete Schallabstrahlung, Linienstrahler, Diffusoren und Beschallung in geschlossenen Räumen und im Freien

Im vorangegangenen Beitrag dieser Serie waren Lautsprecher das zentrale Thema. Der folgende Beitrag befasst sich mit dem praktischen Einsatz von Lautsprechern, nämlich zu Beschallungszwecken, und zwar sowohl im Freien als auch in geschlossenen Räumen. Beide Fälle unterscheiden sich durch verschiedene Ausbreitungsgesetze und Effekte.

### Schallausbreitung in Räumen

Im Gegensatz zur Schallausbreitung im Freien wird die Ausbreitung von Schall in geschlossenen Räumen durch Reflexionen oder umgekehrt durch Absorptionen an den Raumbegrenzungsflächen bestimmt. Der jeweils nicht absorbierte Schall wird von sämtlichen Begrenzungsflächen eines Raums mehr oder weniger „diffus“ in alle Richtungen reflektiert (Bild 1). Entsprechend den Absorptionseigenschaften der Wände, Decken und/oder Fußböden entsteht dabei ein mehr oder weniger diffuses Schallfeld, dessen wichtigstes Kennzeichen die jeweilige Nachhallzeit (Bild 2) bildet.

Je nach der vorgesehenen akustischen Verwendung gibt es für geschlossene Räume sogenannte optimale, mittlere Nachhallzeiten  $T_{opt}$ . Im Bereich zwischen 500 und 1000 Hz sind das beispielsweise für

Kleine Sprachstudios	ca. 0,4 s,
Hörsäle	ca. 0,6 s,
Opernhäuser	ca. 1,3 s,
Kirchen (Orgelmusik)	ca. 2,7 bis 3,0 s.

Neben der Erzielung optimaler Nachhallzeiten gibt es für die Raumakustik noch eine weitere zu lösen-

de Aufgabe, nämlich dafür zu sorgen, dass der Schall in einem diffusen Feld möglichst gut „durchmischt“ wird, d. h., dass die Nachhallzeit an allen Orten des Raums nahezu gleich groß ist. Diese Aufgabe erfüllen sogenannte Diffusoren. In Hallräumen geschieht dies durch Einbringung von schallstreuenden Strukturen, d. h. von Streukörpern. Aber auch in Abhörräumen oder in kleinen Musikstudios kann man mithilfe diffuser Reflexionen ein gleichmäßig verteiltes Abklingen des Schalls erreichen. Dafür bekannt sind z. B. Schroeder-Diffusoren (Bild 3).

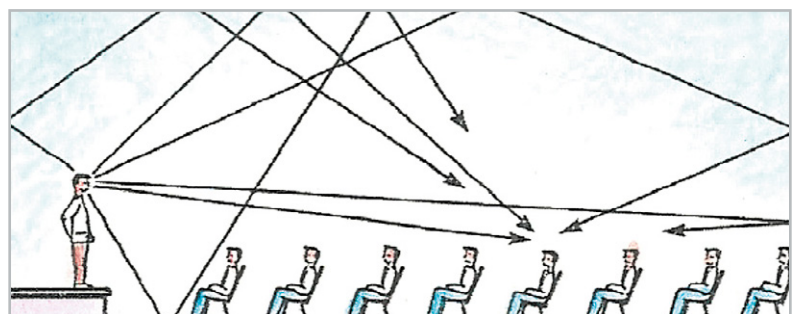


Bild 1: Ausbreitung von Schall – in einem allseits geschlossenen Raum – in verschiedene Richtungen und auf verschiedenen langen Wegen, ausgehend von einem Sprecher bis hin zum Ohr eines Zuhörers



## Zur Information:

In leicht verständlicher Form vermitteln wir eine **Einführung in die Arbeitsgebiete der technischen Akustik – einschließlich Schwingungstechnik – und der Elektroakustik.**

Themengebiete:

- Akustische Grundbegriffe – Schallfeldgrößen, Pegel, Resonatoren (ELVjournal 2/2019)
- Schallausbreitung – Reflexion, Beugung, Brechung und Absorption (ELVjournal 3/2019)
- Elektromechanische Analogien – Analogie erster und zweiter Art, Ersatzschaltbilder (ELVjournal 4/2019)
- Elektroakustische Wandler – Wandlerprinzipien und ihre Gesetze (ELVjournal 5/2019)
- Mikrofone – vom Studiomikrofon bis zum Subminiaturmikrofon (ELVjournal 6/2019)
- Kopfhörer – elektrodynamische und elektrostatische Kopfhörer (ELVjournal 1/2020)
- Lautsprecher – von den Anfängen bis zur Bassreflexbox (ELVjournal 2/2020)
- **Beschallungstechnik – gerichtete Schallabstrahlung, Linienstrahler**
- Raum- und Bauakustik – Sabine'sches Gesetz, Nachhallzeit und äquivalente Absorptionsfläche
- Gehör – Lautstärke, Lautheit, Hörverlust, Hörgeräte, Audiometrie
- Persönlicher Schallschutz – von passiven Gehörschutzmitteln bis zum aktiven Schallschutz mittels „Antischall“
- Akustische Messräume – reflexionsarme Räume, Messboxen und Hallräume
- Körperschall und Vibrationen – Accelerometer und Ladungsverstärker
- Wasserschall – Schallausbreitung im Wasser, Hydrofone und Wasserschall-Messtanks
- Ultraschall und Infraschall – natürliche und industrielle Quellen

Theoretische Zusammenhänge werden nur so weit vertieft, wie es für das Verständnis des Stoffs notwendig ist. Auf mathematische Ausdrücke (Gleichungen, Formeln) wird im Text so weit wie möglich verzichtet. Anschauliche Illustrationen unterstützen diese Beiträge. Autor dieser Serie ist Prof. Dr.-Ing. Ivar Veit.

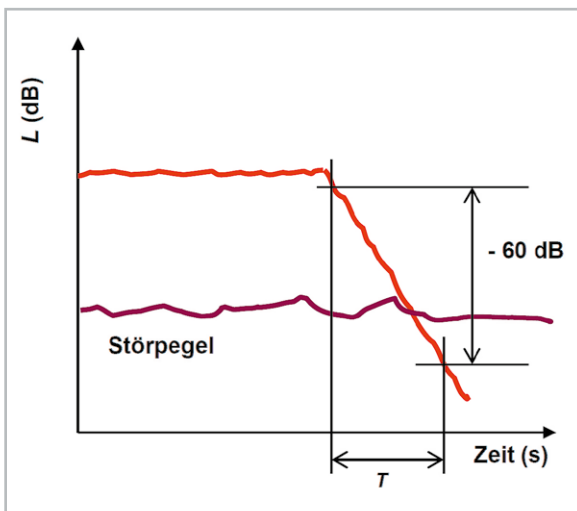


Bild 2: Die Nachhallzeit  $T$  ist definiert als diejenige Zeit, in der der Schalldruckpegel  $L$  nach dem Abschalten einer Schallquelle um  $-60$  dB abgeklungen ist. Sie kann aus der gemessenen Nachhallkurve abgelesen werden. Die Messung der im Allgemeinen frequenzabhängigen Nachhallzeit erfolgt meist mit Terzband-Rauschen. Infolge eines fast immer vorhandenen Störpegels kann die Nachhallzeit selten über die vollen  $-60$  dB bestimmt werden. Sie wird daher in der Praxis oft nur für  $-30$  dB ( $T_{30}$ ) oder  $-15$  dB ( $T_{15}$ ) gemessen und auf  $-60$  dB extrapoliert.

All das sind Dinge, die man bei einer elektroakustischen Beschallung von geschlossenen Räumen wissen und berücksichtigen muss. Wir kommen darauf in einem späteren Beitrag (Raum- und Bauakustik) noch ausführlich zu sprechen. Beginnen wir zunächst mit geschlossenen, größeren Räumen, z. B. mit Vortrags- und Konzerträumen. Vorab aber noch einige grundsätzliche Ausführungen über die Richtwirkungen von Schallstrahlern.

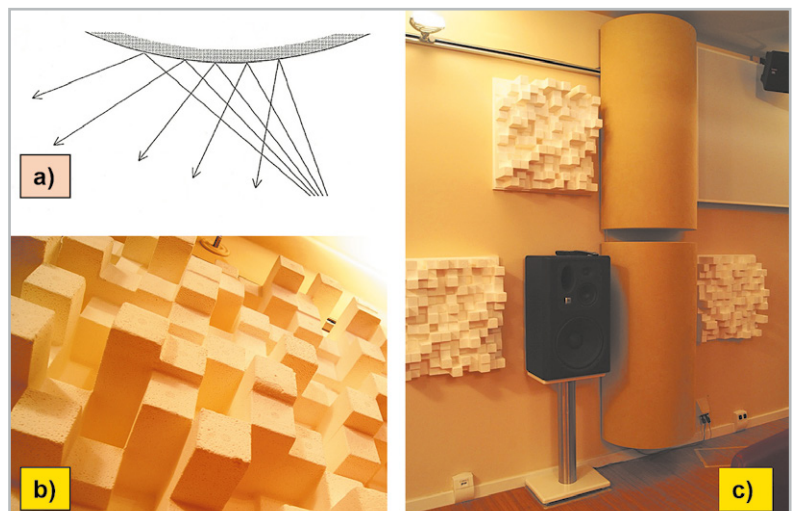


Bild 3: Akustische Diffusoren

- Bei der Reflexion von Schallstrahlen an einer nach außen gekrümmten Fläche werden die Strahlen gestreut
- Diffusor mit herausragenden Strukturen
- Beispiel für den Einsatz von Diffusoren in einem Abhörraum

## Richtcharakteristiken von Schallquellen

Zur Charakterisierung eines Schallsenders gehört u. a. auch eine Aussage über seine Richtwirkung, und zwar in Abhängigkeit von der Frequenz. Das kann z. B. grafisch durch Angabe seiner Richtcharakteristik (dreidimensional) oder seines Richtdiagramms (zweidimensional) bzw. rein zahlenmäßig durch Angabe seines Richtungsfaktors  $\Gamma$  oder seines Richtungsmaßes  $D$  erfolgen.

Betrachtet man die Schallquelle als Mittelpunkt einer gedachten Kugel, deren Radius  $r$  (= Entfernung von der Schallquelle) so groß gewählt wird, dass jeder Punkt  $P$  auf der Kugeloberfläche sich im Fernfeld der Quelle befindet, so herrscht in jedem dieser Aufpunkte ein ganz be-

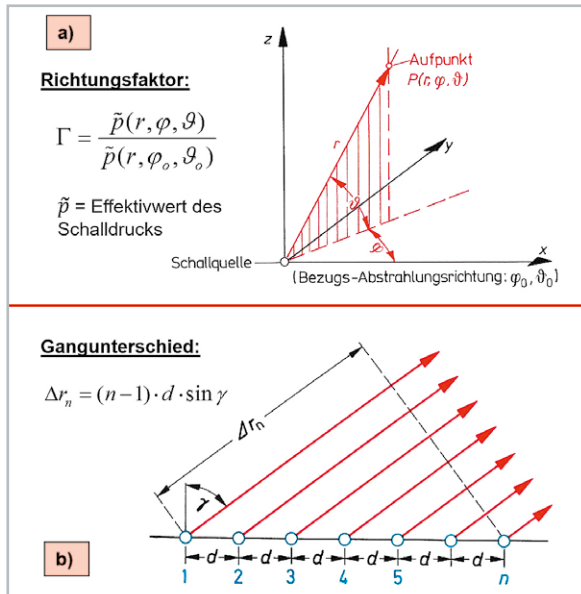


Bild 4: a) Richtungsfaktor  $\Gamma$  und b) lineare Strahlergruppe (line array) mit  $n$  punktförmigen Einzelstrahlern mit jeweils kugelförmiger Richtcharakteristik  
Ein bestimmter Aufpunkt  $P$  im Schallfeld ist definiert durch seinen Abstand  $r$  von der Schallquelle sowie durch seinen Azimutwinkel  $\varphi$  und seinen Polarwinkel  $\vartheta$  ( $= 90 - \gamma$ )

stimmter Schalldruck  $p$ . Jeder Aufpunkt  $P$  ist im Raum genau definiert durch seinen Abstand  $r$  von der Schallquelle sowie durch seinen Azimutwinkel  $\varphi$  und seinen Polarwinkel  $\vartheta$ , bezogen auf eine bestimmte Abstrahlrichtung des Strahlers; im Allgemeinen bezieht man sich auf die Hauptabstrahlrichtung, siehe Bild 4.

Trägt man die einzelnen Schalldruckwerte  $p$  ( $r = \text{konst.}, \varphi, \vartheta$ ) als Radiusvektoren mit gemeinsamem Ursprung im Kugelmittelpunkt auf, so beschreiben die Endpunkte dieser Radiusvektoren eine Fläche, die man als Richtcharakteristik bezeichnet. Schneidet man diese Fläche mit einer Ebene, die auch durch den Kugelmittelpunkt hindurchgeht, so ergibt die Schnittkurve ein Richtdiagramm.

Der Richtungsfaktor  $\Gamma$  gibt Auskunft über das Verhältnis des Schalldrucks  $p(r, \varphi, \vartheta)$  in der Richtung ( $\varphi, \vartheta$ ) zu einem Bezugsschalldruck  $p(r, \varphi_0, \vartheta_0)$  in der Hauptabstrahlrichtung ( $\varphi_0, \vartheta_0$ ) der Schallquelle, und zwar bei gleicher Entfernung  $r$  zur Quelle (siehe auch Bild 4a).

Das Richtungsmaß  $D = 20 \lg \Gamma$  (in: dB) ist definiert als der 20-fache Logarithmus des Richtungsfaktors oder – was das Gleiche ist – als Pegeldifferenz zwischen den beiden zueinander ins Verhältnis gesetzten Schalldruckwerten.

## Lautsprecherzeilen

Bei der Beschallung von beispielsweise größeren Zuhörerräumen ist man grundsätzlich bestrebt, von der abgestrahlten Schallenergie möglichst viel den Zuhörern zukommen zu lassen, und möglichst wenig an den restlichen Raum abzugeben. Dazu benötigt man Lautsprecher bzw. Lautsprecheranlagen mit einer ausgeprägten Richtwirkung. Besonders bewährt haben sich dafür sogenannte Lautsprecherzeilen (engl. line array), siehe Bild 5. Die Funktion derartiger Gruppenstrahler lässt sich anhand des Bildes 4b erklären: Ordnet man  $n$  – als punktförmig angenommene –

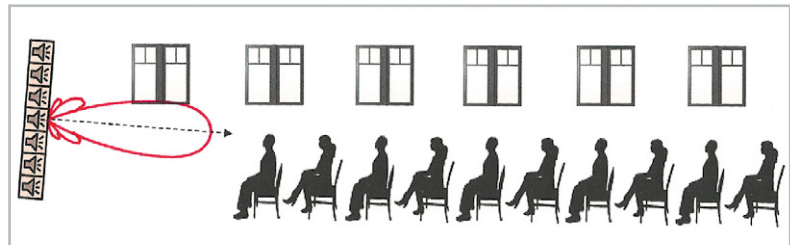


Bild 5: Beschallung eines Zuhörerraumes mit einer Lautsprecherzeile (engl.: „line array“), bestehend z. B. aus 7 Einzellausprechern. Das Richtdiagramm hat hier ein Hauptmaximum und mehrere Nebenmaxima, das Hauptmaximum ist auf die Zuhörer ausgerichtet.

Einzelstrahler mit jeweils kugelförmiger Richtcharakteristik entlang einer geraden Linie (daher die Bezeichnung: Linienstrahler) in gleichgroßen Abständen  $d$  (sehr viel kleiner als die Wellenlänge  $\lambda$ ) voneinander an, so erreichen die von den einzelnen Schallquellen abgestrahlten Kugelschallwellen einen weit entfernten Aufpunkt auf unterschiedlich langen Wegen. Die Wege zwischen dem ersten und dem  $n$ -ten Strahler unterscheiden sich dabei um den sogenannten Gangunterschied  $\Delta r_n$ . Schwingen sämtliche Einzelstrahler  $n$  gleichphasig und mit gleich großer Energie, so ergibt sich der Schalldruck  $p$  in einem fernen Aufpunkt  $P$  aus der Summe der von den Einzelquellen herrührenden Schalldrücken. Der diesen Zusammenhang beschreibende Richtungsfaktor  $\Gamma$  für unterschiedliche Werte von  $\psi$  ist dem Bild 6 (links oben) zu entnehmen.

Ohne hier detailliert darauf einzugehen, ergeben sich aus dieser Gleichung für bestimmte Werte von  $n$  Einzelstrahlern sowie deren Abstände  $d$  voneinander jeweils eine ganz bestimmte Anzahl von Maxima und Minima, die sich im Polardiagramm für den Richtungsfaktor  $\Gamma$  als sogenannte Haupt- und Nebenkeulen ergeben. Im Bild 6 sind die Polardiagramme für  $n = 4$  und  $n = 6$  Einzelstrahler dargestellt. Wie man diesen Diagrammen entnehmen kann, wird das Hauptmaximum umso schmaler, je größer die Anzahl  $n$  von Einzelstrahlern ist. Gleichzeitig wächst mit der Anzahl der Einzelstrahler aber auch die Anzahl der Nebenmaxima an. Um bei Linienstrahlern eine gewisse „Optimierung“ der Richtwirkung zu erreichen, d. h., die kleinstmögliche Breite für das Hauptmaximum (= Hauptkeule des Richtdiagramms) bei Minimierung der Nebenkeulenhöhe zu erzielen, gibt es ein Verfahren, das C.L. Dolph ursprünglich für (elektromagnetische) Antennen entwickelt hat, das aber genauso gut für akustische Strahler angewandt werden kann. Mit wenigen Worten beschrieben, besteht dieses Verfahren darin, die einzelnen Lautsprecher einer Gruppenanordnung nicht mit gleich großer, sondern mit einer „abgeglichenen“ Amplitude zu speisen.

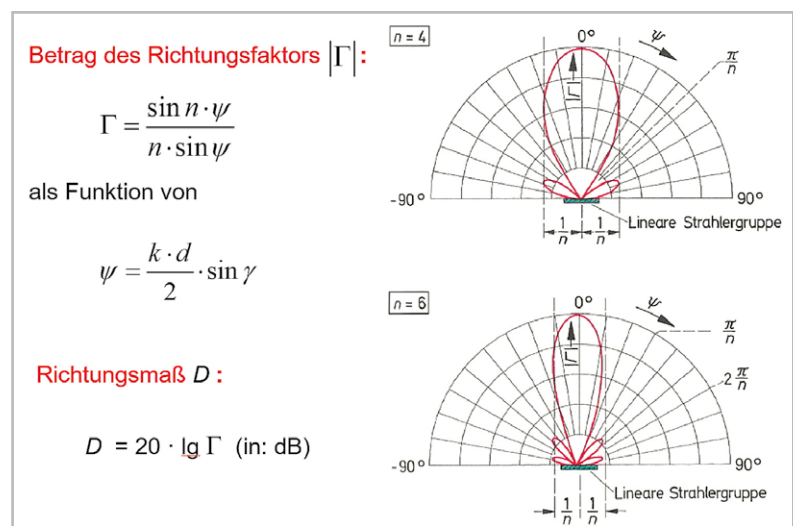


Bild 6: Der Richtungsfaktor  $|\Gamma|$  einer linearen Strahlergruppe für  $n = 4$  und  $n = 6$  Einzelstrahler. Bei den Winkeln  $\pi/n$  und  $2 \cdot \pi/n$  (im Bogenmaß!) haben die Richtdiagramme Nullstellen. Darunter das Richtungsmaß:  $D = 20 \cdot \lg \Gamma$  (in: dB)



Praktische Ausführungen von Lautsprecherzeilen, z. B. zur Beschallung von Kirchen-Innenräumen, zeigt das Bild 7. Damit kann man auch in sehr hallenden Kirchen die einzelnen Plätze akustisch besser erreichen.

### Schallausbreitung in geschlossenen Räumen

In Innenräumen trifft man nicht selten auf eine andere Besonderheit, die bei deren Beschallung Probleme bereiten kann. Das sind sogenannte

Flatterechos, die sehr störend sein können. Es handelt sich dabei um Vielfach-Reflexionen, die zwischen planparallelen, akustisch aber wenig absorbierenden Wänden auftreten können, siehe Bild 8. Die Belegung mindestens einer der beiden Wände mit schallabsorbierendem Material kann die Ausbildung von Flatterechos sehr wirksam verhindern.

Eine weitere, akustisch bedeutsame Eigenschaft geschlossener Räume, auf die im Falle einer Beschallung zu achten ist, hat etwas mit der Ausbildung stehender Wellen zu tun. Die Darstellungen a), b) und c) im Bild 9 veranschaulichen den physikalischen Hintergrund dieser Aussage. Es ist bekannt, dass jeder allseits geschlossene Raum eine (theoretisch) unendlich große Anzahl von Raumresonanzen besitzt. Die Darstellungen a) und b) zeigen einen eindimensionalen Schwingungstyp, der durch Überlagerung ebener Schallwellen der gleichen Frequenz entsteht, die sich sowohl in positiver  $x$ -Richtung als auch entgegengesetzt zur  $x$ -Richtung ausbreiten und somit eine stehende Welle ergeben.

An den sich der Schallausbreitung entgegengesetzten Wänden findet man stets Schalldruck-Maxima, vorausgesetzt, dass die Wände schallreflektierend sind. Die Darstellung c) zeigt den entsprechenden zweidimensionalen Schwingungstyp für die  $x$ - und die  $y$ -Richtung. Analog dazu kann man sich auch die Schalldruckverteilung in einem dreidimensional schwingenden Rechteckraum vorstellen. Auf eine grafische Darstellung des dreidimensionalen Schwingungstyps wurde hier aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet, aber man kann sich das Bild auch so gut vorstellen. Die Darstellung d) zeigt das Bild c) noch einmal in etwas plastischerer Form. Wie aus diesen Bildern gut zu ersehen ist, kann es in allen Ecken eines rechteckigen Raumes prinzipiell zur Ausbildung von Schalldruck-Maxima kommen. Konsequenz: Dort sollte man nach Möglichkeit nie Lautsprecher platzieren.

Raumecken haben aus elektroakustischer Sicht aber auch noch eine ganz andere Eigenschaft. Sie können nämlich zu einer wesentlichen Erhöhung des Wirkungsgrads von Lautsprechern beitragen. Der Wirkungsgrad von breitbandigen elektrodynamischen Lautsprechern überschreitet selten einen Wert von nur 2%. Diese Angabe wird aus Datenblättern leider meist herausgehalten. Die restliche Energie wird nämlich in Wärme umgewandelt.

### Raumecken

Es gibt noch etwas Weiteres, was Raumecken akustisch interessant macht. Das hat etwas mit der Strahlungsimpedanz  $Z_{str}$ , oder genauer, mit ihrem Realteil, dem Strahlungswiderstand  $r_{str}$  zu tun. Die von einer Schallquelle abgestrahlte Schallleistung  $W_{ak}$  ist über den Strahlungswiderstand mit dem sogenannten Raumwinkel  $\Omega$  verknüpft. Für den kugelförmigen Raum mit einer Oberfläche von  $4\pi r^2$  ergibt sich bei einem Einheitsradius von  $r = 1$  ein Wert von  $4\pi$ , den man auch als Raumwinkel bezeichnet. Für einen Halbraum hat der Raumwinkel einen Wert von  $2\pi$ , und für einen Achtelraum ist  $\Omega = \pi/2$ . Wenn man davon ausgeht, dass die von einer Schallquelle ausgestrahlte akustische



Bild 7: Akustik in Kirchen  
a) Lautsprecherzeilen zur gerichteten Beschallung in Kirchen  
b) Kirchenwände belegt mit Resonanzabsorbent zur Verringerung des Nachhalls

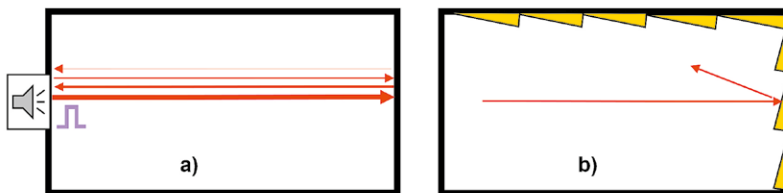


Bild 8: Entstehung von Flatterechos und Möglichkeiten zur Vermeidung derselben.  
a) Strahlt man einen Schallimpuls in einen Raum mit planparallelen, akustisch ungedämpften Wänden ab, so kommt es zu einer Vielzahl von Reflexionen zwischen eben diesen Wänden, die sich für Zuhörer wie eine ganze Folge von Echos anhören.  
b) Belegt man mindestens eine der planparallelen Wände mit schallabsorbierendem Material, so kann man die Ausbildung von Flatterechos sehr wirksam verhindern. Sehr hilfreich sind dabei Materialien mit schräger oder unebener Struktur.

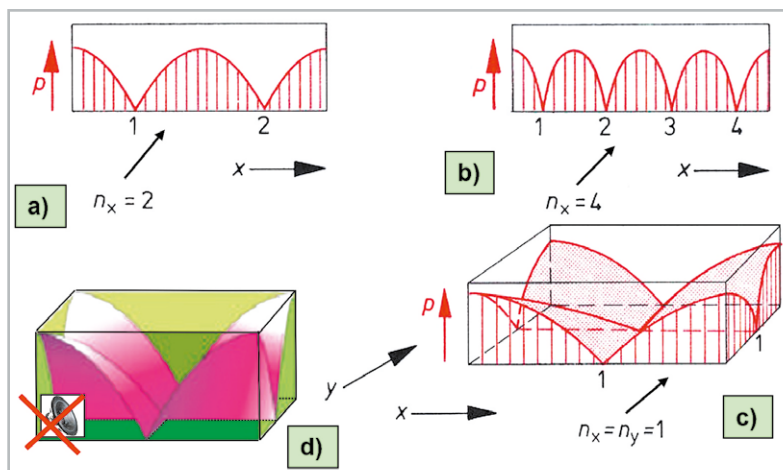


Bild 9: Beispiele für die Schalldruckverteilung ( $p$ ) in geschlossenen, akustisch angeregten Rechteckräumen mit parallel gegenüberliegenden Wänden, und zwar von ein-, zwei-, und vierdimensionalem Schwingungstyp  
a) 2. Mode in  $x$ -Richtung, b) 4. Mode in  $x$ -Richtung, c) 1. Mode in  $x$ - und  $y$ -Richtung, d) anschaulichere Darstellung des Teilbilds c). In Raumecken hat man grundsätzlich immer(!) Schalldruck-Maxima! Dort sollte man nie Lautsprecher aufstellen.

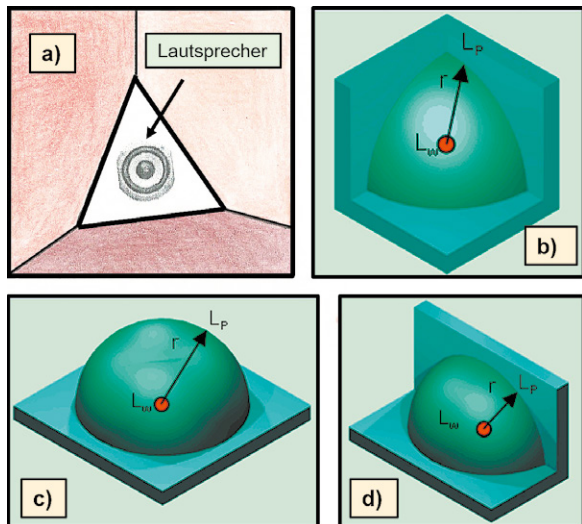


Bild 10: Schallabstrahlung aus einer Raumecke heraus, d. h. in einen Raumwinkel hinein von  $\Omega = \pi/2$ , (Bilder a) und b). In diesem Falle wird bei Einspeisung einer gleich großen elektrischen Leistung eine um den Faktor 8 höhere Schallleistung abgestrahlt, verglichen mit einer punktförmigen Schallquelle. Die Bilder c) und d) veranschaulichen Raumwinkel von  $\Omega = 2\pi$  bzw.  $\Omega = \pi$ . In den Bildern b), c) und d) zeigt  $r$  den Kugelradius an,  $L_p$  den Schalldruckpegel und  $L_w$  den Schallleistungspegel

Leistung  $W_{ak}$  dem Kehrwert des Raumwinkels  $\Omega$  proportional ist, dann bedeutet das, dass die aus einer Ecke ( $\Omega = \pi/2$ ) heraus abgestrahlte Schallleistung (Bild 10) um den Faktor 8 höher ist als bei einer Abstrahlung in einen kugelförmigen Vollraum.

Raumecken sind aber auch genauso wirksam für den umgekehrten Fall, nämlich für die Schallabsorption. Bringt man Absorptionsmaterial in der Ecke eines Raums ein, so ist deren Wirkung ebenfalls um ein Mehrfaches wirksamer, verglichen mit dem sonst üblichen Einsatz.

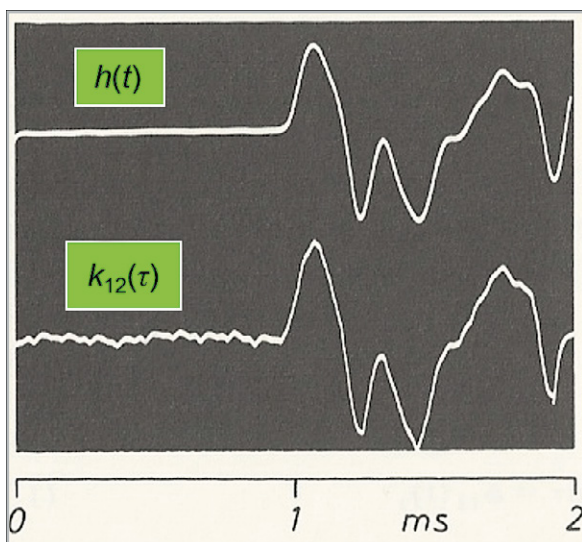


Bild 12: Akustische Impulsantwort  $h(t)$ : Auf dem Weg vom Sende- zum Empfangsort wird aus einem extrem schmalen  $\delta$ -Impuls (auch: Nadelimpuls oder Dirac-Impuls) nach vielen Reflexionen an den Raumbegrenzungsflächen ein zeitlich „auseinander“ gezogenes Impulsantwort-Signal  $h(t)$ . Obere Spur: Impulsantwort  $h(t)$  in einem bestimmten Raumpunkt (z. B. Sitzplatz in einem Saal) nach einer Anregung mit einem  $\delta$ -Impuls. Untere Spur: Raumanregung mit weißem Rauschen anstatt mit einem  $\delta$ -Impuls. Das Kreuzkorrelogramm  $k_{12}(\tau)$  aus dem gesendeten Rauschsignal und der Rauschantwort im gleichen Raumpunkt wie oben ist identisch mit der Impulsantwort  $h(t)$ .

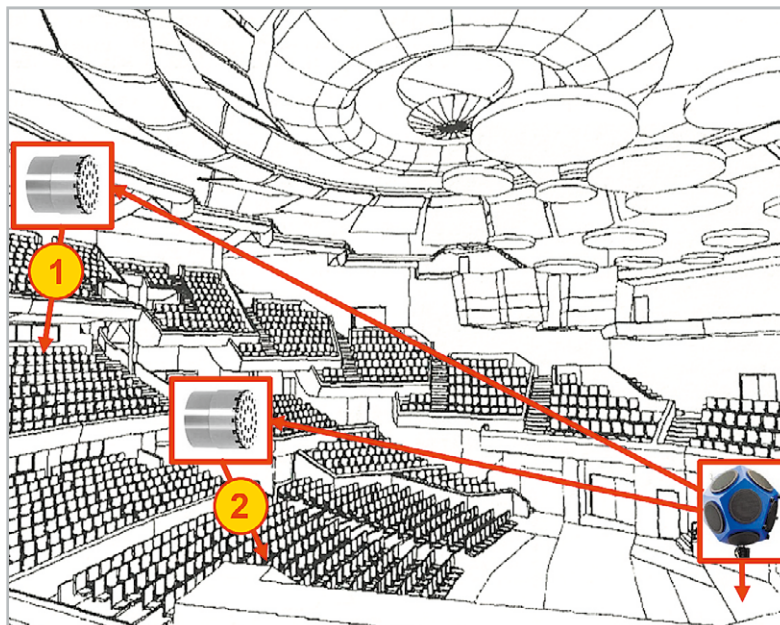


Bild 11: Beispiel für eine Messung der Impulsantwort  $h(t)$  an zwei Sitzplätzen 1 und 2 in einem größeren Konzertsaal, wobei vom Lautsprecher – einem Dodekaeder – ein  $\delta$ -Impuls abgestrahlt wird.

## Messung von Plätzen im Raum

Abschließend zu diesem ersten Teil über die „Schallausbreitung in geschlossenen Räumen“ soll hier noch auf eine sehr wichtige Mess- und Beurteilungsgröße von Räumen hingewiesen werden, in denen besonders anspruchsvolle Veranstaltungen stattfinden, z. B. Konzerte, Theater, Vorträge o. Ä. Es handelt sich dabei um die sogenannte Impulsantwort  $h(t)$ , die z. B. für ganz konkrete Plätze in einem Raum gemessen werden kann. Aus ihr können die übrigen raumakustischen Kenngrößen, wie beispielsweise die Nachhallzeit  $T$ , die Energie-Zeit-Kurven (ETC = Energy-Time-Curve) und vor allem, die Übertragungsfunktion  $G(\omega)$  abgeleitet werden.

Bei der messtechnischen Prüfung wird der zu untersuchende Raum mit einem genau definierten Impuls, z. B. einem sogenannten  $\delta$ -Impuls, akustisch angeregt, z. B. von der Bühne aus, siehe Bild 11. Als Ergebnis der Impuls-Anregung kann an jedem beliebigen Platz des Raums der dort ankommende Schalldruckpegel quasi als Impulsantwort  $h(t)$  gemessen werden. Durch eine anschließende Fouriertransformation dieses Messwerts vom Zeit- in den Frequenzbereich bekommt man schließlich die Übertragungsfunktion  $G(\omega)$ , und zwar speziell für diesen Sitzplatz. Diese Funktion ist eine Größe, die die Schallübertragung von der Quelle zu einem ganz bestimmten Empfangsort vollständig(!) beschreibt.

Für die praktische Ermittlung der Impulsantwort gibt es im Übrigen auch noch eine andere Möglichkeit, die den verwendeten Mess-Lautspre-

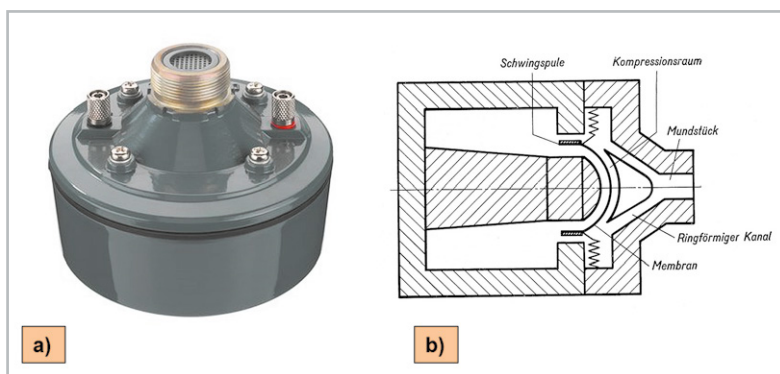


Bild 13: Treiber mit Druckkammer für einen Exponentiallautsprecher  
a) Ansicht eines handelsüblichen Treibers mit Druckkammer (oben hinter dem Gewindeansatz)  
b) Schnittzeichnung eines elektrodynamischen Treibers mit Druck- oder Kompressionsraum



cher vor Übersteuerung schützt. Dabei wird anstelle eines  $\delta$ -Impulses weißes Rauschen als Messsignal verwendet, dessen spektrale Leistungsdichte  $K_{11}(\omega)$  konstant ist, wobei man das am Empfangsort gemessene Rauschsignal mit dem gesendeten Signal kreuzkorreliert. Zwischen der Kreuzkorrelationsfunktion  $k_{12}(\tau)$  und der Impulsantwort  $h(t)$  besteht eine direkte Proportionalität, siehe dazu das **Bild 12**.

### Schallausbreitung im Freien

Zwischen der Schallausbreitung in geschlossenen Räumen und im Freien gibt es einige grundsätzliche Unterschiede, was Konsequenzen für die jeweilige Beschallungstechnik hat. Während man in geschlossenen Räumen infolge von Reflexionen zwischen den einzelnen Begrenzungsflächen oft quasidiffuse bis diffuse Schallfeld-Verhältnisse antrifft, gelten im Freien mehr oder weniger streng die Gesetze des freien Schallfelds, d. h., der Schalldruck  $p$  nimmt nach dem  $1/r$ -Gesetz ab, und beim Schalldruckpegel  $L_p$  geschieht das Gleiche mit  $-6$  dB pro Entfernungsverdopplung. Das bedeutet, dass man im Freien, insbesondere bei der Beschallung von Freigebieten, ganz andere Schalleistungen aufbringen muss, um vergleichbare Schallpegel zu erzielen. Das hat zur Folge, dass man dort sehr leistungsstarke Beschallungsanlagen benötigt.

Dazu ein Zahlenbeispiel: Angenommen sei ein Vortragssaal mit einem Volumen von  $V = 1200 \text{ m}^3$  und einer Nachhallzeit von  $T = 0,9$ , in dem ein mittlerer Schalldruckpegel von  $L_p = 80$  dB erzeugt werden soll. Um diesen zu erzeugen, wird eine akustische Leistung von  $W_{ak} = 0,0052 \text{ W}$  benötigt. Bei einem Wirkungsgrad von  $2\%$  ist dafür eine elektrische Leistung von  $W_{el} = 260 \text{ mW}$  erforderlich. Mit dieser Leistung würde man im Freien den gleichen Schalldruckpegel in einer Entfernung von nur etwa  $2 \text{ m}$  (!) erzeugen. Diese Zahlen belegen noch einmal sehr deutlich, was zuvor schon genannt wurde. Mit anderen Worten, für eine effektive Beschallung im Freien sind viel leistungsstärkere Anlagen erforderlich, und das gilt auch für die einzusetzenden Lautsprecher, z. B. leistungsstarke Bühnenlautsprecher. Auch die Richtwirkung der verwendeten Anlagen spielt dabei eine Rolle, z. B. durch Verwendung von Line-Array-Lautsprechern.

Im letzten Beitrag über Lautsprecher wurden bereits exponentielle Trichterlautsprecher vorgestellt und hinsichtlich ihrer Funktion erläutert. Neben einer deutlichen Erhöhung des Wirkungsgrades ist damit auch eine gerichteter Schallführung mit exponentiell verlaufender Querschnittsvergrößerung möglich geworden. In Ergänzung zu den Aus-

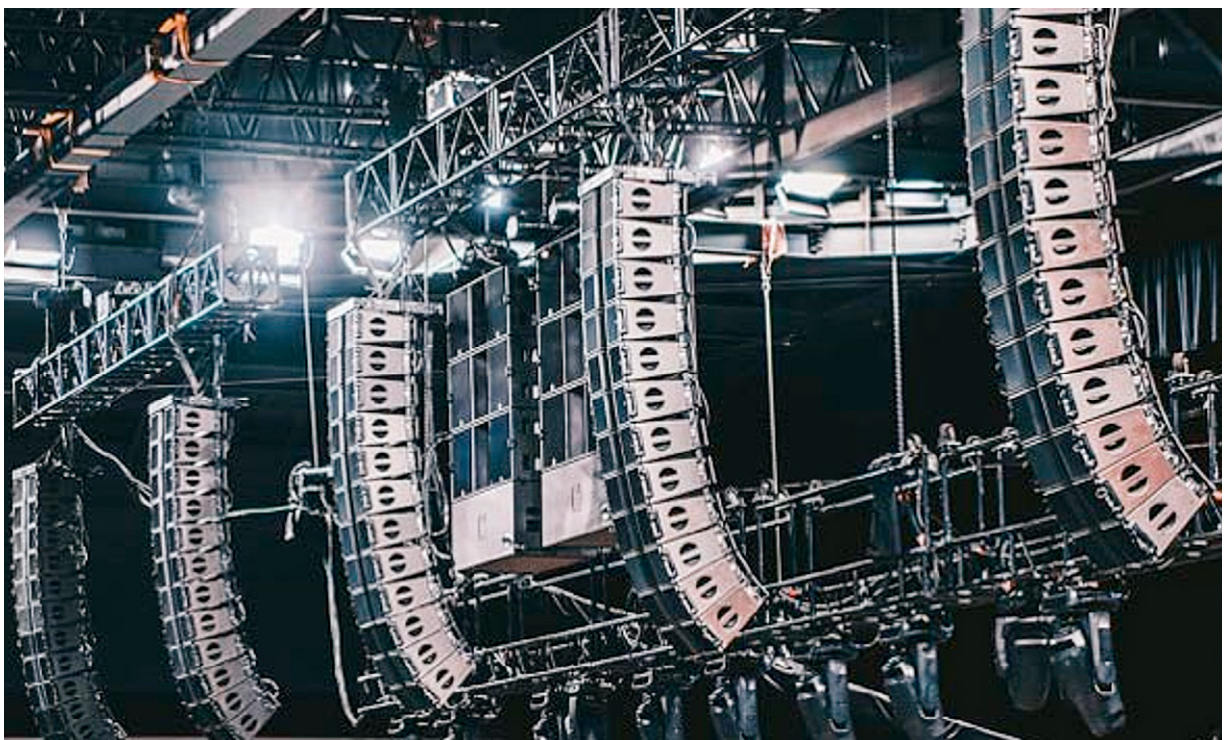
führungen über diesen Lautsprechertyp im vorherigen Beitrag sei hier noch ein Bild nachgereicht vom Treiber mit Druckkammer, d. h. vom elektrodynamischen Antriebssystem für Exponentiallautsprecher, siehe **Bild 13**. Im Druckkammer- oder Kompressionsraum geschieht eine Impedanztransformation im Verhältnis der Membranfläche zur Fläche des sogenannten Mundstücks bzw. des Trichterhalses. Am Mundstück erfolgt der Anschluss des Exponentialtrichters.

Das **Bild 14** zeigt abschließend ein Beispiel für eine sehr leistungsstarke Line-Array-Beschallungsanlage auf einer Bühne im Freien.

Abschließend noch eine Anmerkung zur gerichteten Beschallung: Insbesondere bei Simultanübertragungen von Sprache und/oder Gesang, z. B. auf Bühnen, können Richtmikrofone sehr hilfreich sein, um akustische Rückkopplungen zu vermeiden.

### Ausblick

Der nächste Beitrag befasst sich mit dem Thema Raum- und Bauakustik. Inhaltlich hat das viele Berührungspunkte zum vorliegenden Beitrag, insbesondere, was die Raumakustik betrifft. Der Begriff der Nachhallzeit tauchte hier schon mehrfach auf. Hinzu kommen im nächsten Beitrag das Sabinesche Gesetz mit einem weiteren Begriff, nämlich der äquivalenten Absorptionsfläche. Behandelt werden dort die verschiedenen Arten von Schallabsorbentien, die einen wesentlichen Einfluss haben auf die Schallausbreitung in geschlossenen Räumen. Aber auch die Bauakustik ist ein sehr wichtiger Bestandteil der Technischen Akustik. Begriffe wie beispielsweise Schalldämmung und Schalldämpfung sowohl für Luftschall als auch für Körperschall haben für den Ausbau von Konzert- und Vortragssälen eine große Bedeutung. Das gleiche gilt auch für die Gestaltung von Aufnahmestudios. Übrigens, in der Bauakustik bezeichnet man den Körperschall generell als Trittschall. **ELV**



*Bild 14: Leistungsstarke „Line-Array“-Lautsprecheranlage auf einer Freilichtbühne*