

In der vorliegenden Ausgabe des *ELV journals* beginnen wir mit einer mehrteiligen Artikelserie, die grundlegende und gleichermaßen wissenschaftliche Dinge über unser Gehör sowie über verschiedene Arten und Ausführungen von Schallwandlern vermittelt. Neben dem Aufbau und der Funktion unseres Ohres wird über dessen akustische Aufnahme- und Bewertungsfähigkeit einschließlich diverser psychoakustischer Effekte berichtet. Die Betrachtung der Schallwandler wird sich in der Hauptsache auf Mikrofone und Kopfhörer konzentrieren. — Die Einzelbeiträge erscheinen mit folgenden Teilüberschriften:

1. Grundlegende Begriffe aus der Akustik; 2. Aufbau und Funktion des menschlichen Gehörs; 3. Psychoakustische Eigenschaften unseres Gehörs; 4. Elektroakustische Wandler; 5. Mikrofone; 6. Kopfhörer

Einleitung

Zur elektronischen Übertragung von Schalleignissen (z. B.: Sprache, Musik ...) benötigt man stets a) Mittel für die Schallaufnahme (z. B.: Mikrofone), b) eine elektroakustische Übertragungsstrecke (z. B.: Verstärker, Mischer ... usw.) und c) Mittel für die Schallwiedergabe (z. B.: Lautsprecher, Kopfhörer — Bild 1.1). Während Mikrofone Schallenergie in elektrische Energie umwandeln, sorgen Lautsprecher und Kopfhörer für eine Energieumwandlung in umgekehrter Richtung, sie setzen elektrische Energie in akustische Energie um. Wegen ihrer energieumwandelnden Funktion bezeichnet man sie auch als elektroakustische Wandler oder einfach als Schallwandler. Die Güte einer elektroakustischen Übertragung, wie wir sie letztlich mit unseren Ohren beurteilen, hängt in entscheidendem Maße von der Übertragungsqualität der Schallwandler ab.

1. Grundlegende Begriffe aus der Akustik

In den einschlägigen Lehrbüchern wird die Akustik i. a. als die Lehre von den mechanischen Schwingungen in festen, flüssigen

und gasförmigen Medien definiert. Damit derartige Schwingungen auftreten und sich ausbreiten können, muß in jedem Falle Materie — gleichgültig in welchem Aggregatzustand — vorhanden sein. Im Vakuum finden keine akustischen Vorgänge statt.

Eine wichtige Größe zur Kennzeichnung einer Schwingung ist u. a. ihre Frequenz, d. h. ihre Schwingungszahl pro Zeiteinheit. Ausgehend von demjenigen Schwingfrequenzbereich, den wir mit unserem Gehör wahrnehmen können und den wir gewohnt sind als (Hör-)Schall zu bezeichnen, hat sich für die von uns nicht mehr hörbaren Frequenzbereiche eine analoge Bezeichnungswiese eingebürgert: Extrem niederfrequente, nicht mehr hörbare Schwingungen mit Frequenzen unterhalb von etwa 16 Hz bezeichnet man als Infraschall, während sehr hochfrequente, ebenfalls nicht mehr wahrnehmbare Schwingungen mit Frequenzen oberhalb von etwa 16 kHz als Ultraschall bezeichnet werden.

Entsprechend dem Medium, in dem Schall auftritt und sich ausbreitet, unterscheidet man generell zwischen Körperschall, Flüssigkeitsschall und Luftschall. Da das Wasser von allen flüssigen Medien für die Aku-

stik die größte Bedeutung hat, spricht man in der Praxis auch dann noch von Hydroakustik, wenn es sich in Wirklichkeit um Schallvorgänge in ganz anderen Flüssigkeiten handelt; genauso wird der Begriff Luftschall — quasi stellvertretend — auch für akustische Ereignisse in jedem anderen gasförmigen Medium verwendet. Hydroakustische Vorgänge spielen sich z. B. auch in unserem menschlichen Innenohr ab. Davon wird im nächsten Beitrag noch die Rede sein. Die in dieser Aufsatzreihe insgesamt behandelten Themen werden sich zu einem überwiegenden Teil mit Vorgängen aus dem Bereich des Luftschalls befassen.

Die einfachste Art Schall zu erzeugen besteht darin, einen festen Körper (z. B. eine Glocke, eine Stimmgabel oder eine Lautsprechermembran) zu Schwingungen anzuregen, der diese an die umgebende Luft weitergibt. Der Akustiker bezeichnet das als Schallabstrahlung. Gegenstände oder Vorrichtungen, mit denen das möglich ist oder die speziell dafür geschaffen sind, nennt man Schallquellen oder Schallsender.

Bei der Schallabstrahlung in Luft werden die kleinsten Partikel des Mediums, d. h. die Luftmoleküle, zu Schwingungen um ihre Ruhelage herum angeregt, wobei diese wiederum die ihnen jeweils benachbarten Luftpartikel anregen, usw. Die schwingenden Luftmoleküle wandern während eines derartigen Erregungszustandes nicht weiter, sondern führen lediglich Schwingbewegungen um ihre Ruhelage aus. Bild 1.2 veranschaulicht das anhand einer schwingenden Membran, die in der dort gezeigten Modelldarstellung eine Reihe von elastisch gelagerten Masseteilchen (= Luftmoleküle) zu Schwingungen anregt. — Die auf diese Weise von einer punktförmig angenommenen Schallquelle ausgehende Erregung breitet sich wellenförmig nach allen Seiten des Raumes aus, und zwar mit einer Geschwindigkeit, die in Luft bei Raumtemperatur 343 m/s beträgt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Erregung nennt man Schallgeschwindigkeit (Symbol: c). In einem Raum, in dem sich Schallwellen ausbreiten, entsteht ein Schallfeld, das man meßtechnisch nachweisen und in Maß und Zahl beschreiben kann.

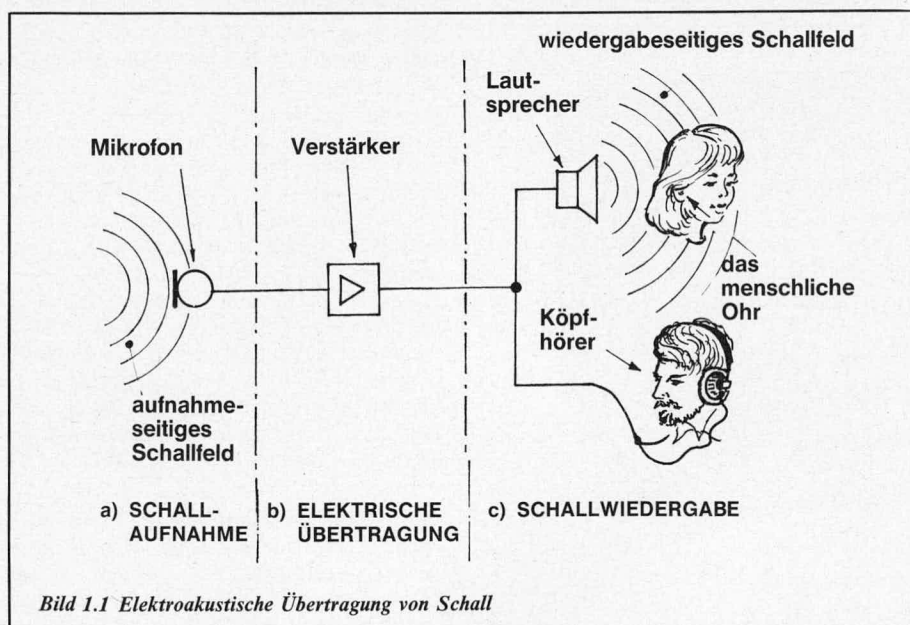


Bild 1.1 Elektroakustische Übertragung von Schall

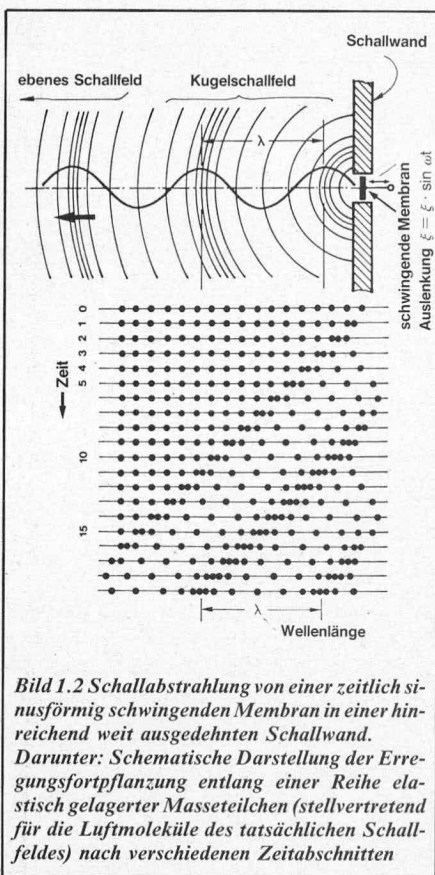


Bild 1.2 Schallabstrahlung von einer zeitlich sinusförmig schwingenden Membran in einer hinreichend weit ausgedehnten Schallwand.
 Darunter: Schematische Darstellung der Erregungsförtpflanzung entlang einer Reihe elastisch gelagerter Masseiteilchen (stellvertretend für die Luftmoleküle des tatsächlichen Schallfeldes) nach verschiedenen Zeitabschnitten

Die in der akustischen Meßtechnik am häufigsten gemessene Größe ist der sogenannte Schalldruck (Symbol: p) bzw. Schalldruckpegel (Symbol: L). Unter dem Schalldruck versteht man den sich zeitlich mit der Schallfrequenz und räumlich mit der Schallgeschwindigkeit ändernden Luftdruck (= Wechseldruck) bezogen auf einen bestimmten Beobachtungsort des Schallfeldes. Da der Schalldruck eine „Wechselgröße“ ist, kann man ihn genauso wie eine elektrische Wechselspannung oder einen elektrischen Wechselstrom als Momentanwert, Scheitelwert oder Effektivwert darstellen und angeben. Den Schall(wechsel)druck kann man sich als eine dem normalen atmosphärischen Luftdruck (= 101325 N/m^2) überlagerte Druckschwankung vorstellen. — Es hat sich aus

verschiedenen Gründen als sehr sinnvoll erwiesen, statt des Schalldrucks den sogenannten Schalldruckpegel

$$L = 20 \cdot \lg \frac{\tilde{p}}{\tilde{p}_0} \quad \text{in Dezibel (dB)}$$

$$\tilde{p}_0 = 20 \mu\text{N/m}^2$$

zu messen und damit zu arbeiten. Die Messung erfolgt i. a. mit einem schalldruckempfindlichen Mikrofon, dessen abgegebene elektrische Signalspannung ein direktes Maß für den gemessenen effektiven Schalldruck \tilde{p} ist. Das nachfolgende Meßgerät bildet daraus den durch die obige Formel definierten Schalldruckpegel L (in dB), indem es den gemessenen Schalldruck \tilde{p} ins Verhältnis setzt zu einer Bezugsgröße \tilde{p}_0 (= Effektivwert des kleinsten Schalldrucks, den unser Gehör gerade noch wahrzunehmen vermag), den erhaltenen Quotienten logarithmiert und mit dem Faktor 20 multipliziert. Derartige Meßgeräte gibt es sowohl als eigens nur für diesen Zweck gebaute Schallpegelmesser oder auch als universell konzipierte Pegel-Meßgeräte (Bild 1.3).

Neben dem Schalldruck gibt es noch eine weitere Größe zur quantitativen Beschreibung eines Schallfeldes, nämlich die sogenannte Schallschnelle (Symbol: v). Man versteht darunter die Wechselgeschwindigkeit, mit der die schwingenden Luftmoleküle sich um ihre Ruhelage bewegen; die Schallschnelle darf nicht verwechselt werden mit der Schallgeschwindigkeit!

Das Produkt aus dem Schalldruck und der Schallschnelle — gemessen an einem bestimmten Punkt des Schallfeldes — ergibt die Schallintensität (Symbol: I) an diesem Ort.

Der Quotient aus dem Schalldruck und der Schallschnelle ergibt die spezifische Schallimpedanz (Symbol: Z). Mit wachsender Entfernung von einer Schallquelle nehmen die Schallwellen — bezogen auf das Rauminvolumen eines Meßortes — zunehmend ebenen Charakter an (s. a. Bild 1.2). In diesem Bereich des Feldes, den man auch als ebenes Schallfeld bezeichnet, ist der Quotient aus Schalldruck und Schallschnelle an jedem Ort gleich groß, d. h. die spezifische Schallimpedanz geht hier über in die konstante Schallkennimpedanz (Symbol: Z_0),

die gewissermaßen eine Materialkonstante für das jeweilige Medium darstellt und sich aus dem Produkt von Schallgeschwindigkeit und Mediumdichte errechnet. Für Luft beträgt die Schallkennimpedanz $Z_0 = 408 \text{ N s/m}^3$. Früher bezeichnete man diese Größe auch als Wellenwiderstand.

In der unmittelbaren Nähe einer punktförmigen Schallquelle haben die Schallwellen noch eine deutlich erkennbare kugelförmige Geometrie, s. Bild 1.2. Man bezeichnet daher die in diesem Teil des Schallfeldes auftretenden Schallwellen als Kugelschallwellen. Das ebene Schallfeld und das Kugelschallwellen-Schallfeld unterscheiden sich akustisch durch eine Reihe von grundlegenden Eigenschaften. Das kugelförmige Schallfeld läßt sich ferner noch unterteilen in ein sogenanntes Nahfeld und Fernfeld. Auch zwischen diesen beiden Schallfeldbereichen gibt es prinzipielle Unterschiede, die insbesondere bei akustischen Messungen beachtet werden müssen. Im Fernfeldbereich der sich frei ausbreitenden Kugelschallwellen nimmt der Schalldruck umgekehrt proportional mit der Entfernung von der Schallquelle ab. Mißt man im Fernfeld den Schalldruckpegel, so stellt man demzufolge eine Pegelabnahme von 6 dB pro Entfernungsverdopplung fest. Wo das nicht der Fall ist, hat man es mit keinem freien Kugelschallfeld zu tun. Hier können Reflexionen im Spiel sein, die den resultierenden Schalldruckpegel entsprechend beeinträchtigen. Auf diesen Punkt kommen wir noch zurück. — Im ebenen Schallfeld ist der Schalldruck und somit auch der Schalldruckpegel unabhängig von der Schallquellenentfernung. Schalldruck und Schallschnelle sind im ebenen Feld phasengleich; im Nahfeld der Quelle strebt der Phasenwinkel zwischen Schalldruck und Schallschnelle gegen 90° .

Die in einem Abstand Δx zwischen zwei Punkten eines Schallfeldes auftretende Schalldruckänderung Δp wird in der Akustik durch den sogenannten Schalldruckgradienten (= $\Delta p / \Delta x$) ausgedrückt. Es gibt beispielsweise Mikrofone, die nur auf den Druckgradienten reagieren. Davon wird im speziellen Aufsatzteil über Mikrofone noch die Rede sein.

Die untere Darstellung im Bild 1.2 zeigt schematisch ein Momentanbild des Erregungszustandes der Mediumpartikel im Schallfeld. Die dort dargestellte periodische Anregung durch eine zeitlich sinusförmig schwingende Membran läßt eine ebenfalls periodische Folge von Teilchenverdichtungen und Teilchenverdünnungen entstehen. Bei gleichbleibender Anregungsfrequenz (Symbol: f) sind die Abstände zwischen je zwei aufeinander folgenden, gleichartigen Erregungszuständen (Verdichtung oder Verdünnung) gleich groß; man nennt sie die Wellenlänge (Symbol: λ) der Schwingung. Das Produkt aus der anregenden Frequenz und der Wellenlänge ergibt die Schallgeschwindigkeit:

$$c = f \cdot \lambda$$

Wir hatten bisher nur von einer punktförmigen Schallquelle gesprochen, bei der man voraussetzt, daß sie den Schall gleichmäßig nach allen Seiten des Raumes abstrahlt. Ein anderes Beispiel für einen

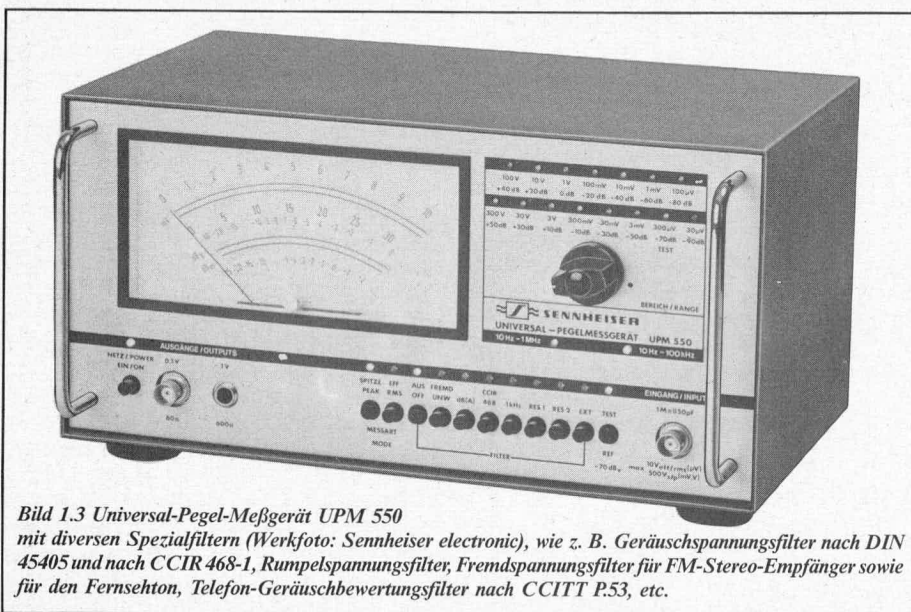


Bild 1.3 Universal-Pegel-Meßgerät UPM 550
 mit diversen Spezialfiltern (Werkfoto: Sennheiser electronic), wie z. B. Geräuschspannungsfiter nach DIN 45405 und nach CCIR 468-1, Rumpelspannungsfiter, Fremdspannungsfiter für FM-Stereo-Empfänger sowie für den Fernsehon, Telefon-Geräuschbewertungsfiter nach CCITT P.53, etc.

derartigen Schallstrahler ist die „atmende“ Kugel. In der Akustik bezeichnet man Schallquellen dieser Art auch als Kugelstrahler 0. Ordnung (= nullte Ordnung) oder als Monopole. Auch ein Lautsprecher mit rückseitig geschlossenem Gehäuse kann ein Monopolstrahler sein, sofern seine Abmessungen klein gegenüber der Wellenlänge sind. Daneben gibt es auch noch Strahler höherer Ordnung, z. B. Dipole, Quadrupole, deren gemeinsames Kennzeichen darin besteht, daß sie den Schall gerichtet, d. h. in bestimmte Vorzugsrichtungen abstrahlen. Zur Charakterisierung der Abstrahleigenschaften einer Schallquelle gehört in jedem Falle auch eine Aussage über ihre Richtwirkung und deren Frequenzabhängigkeit. Stellt man sich die Schallquelle als Mittelpunkt einer gedachten Kugel vor, deren Radius so groß sei, daß sich jeder Punkt auf der Kugeloberfläche im Fernfeld der Quelle befindet, so herrscht in jedem dieser Punkte ein ganz bestimmter Schalldruck \tilde{p} . Jeder Punkt auf der Kugeloberfläche ist durch seinen Abstand r vom Kugelmittelpunkt (= Schallquelle) sowie durch seinen Azimutwinkel φ und seinen Polarwinkel ϑ — gemessen gegen eine ganz bestimmte Bezugsrichtung der Quelle — geometrisch eindeutig definiert (Bild 1.4). Trägt man die gemessenen oder berechneten Werte des Schalldrucks \tilde{p} in Abhängigkeit von den Parametern ($r = \text{konst.}, \varphi, \vartheta$) als Radiusvektoren mit gemeinsamen Ursprung im Kugelmittelpunkt auf, so beschreiben die Vektorendpunkte eine räumliche Fläche, die man als Richtcharakteristik der Schallquelle bezeichnet. Jeder Schnitt dieser dreidimensionalen Fläche mit einer durch den Kugelmittelpunkt hindurchgehenden Ebene ergibt als Schnittkurve ein Richtdiagramm.

Die Richtwirkung einer Schallquelle kann entweder grafisch durch Angabe ihrer Richtcharakteristik bzw. ihres Richtdiagramms, oder numerisch durch Angabe ihres Richtungsfaktors (Symbol: Γ) oder ihres Richtungsmaßes (Symbol: D) beschrieben werden. Der Richtungsfaktor ist durch die folgende Beziehung definiert:

$$\Gamma = \frac{\tilde{p}(r, \varphi, \vartheta)}{\tilde{p}(r, \varphi_0, \vartheta_0)}$$

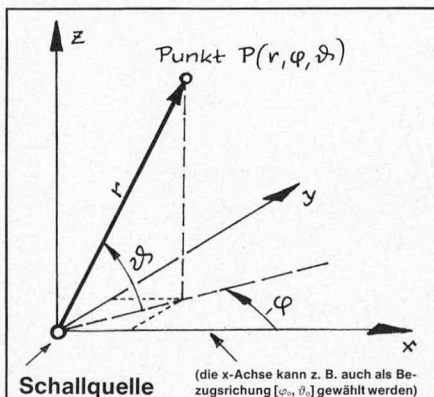


Bild 1.4 Kennzeichnung eines Raumpunktes P durch seinen Abstand r von der Schallquelle sowie durch seinen Azimutwinkel φ und seinen Polarwinkel ϑ bezogen auf eine bestimmte Bezugs-Abstrahlrichtung (φ_0, ϑ_0)

Darin sind $\tilde{p}(r, \varphi, \vartheta)$ der gemessene oder berechnete effektive Schalldruck in Richtung (φ, ϑ) und $\tilde{p}(r, \varphi_0, \vartheta_0)$ der Bezugsschalldruck in einer gewählten Bezugsrichtung (i. a. wählt man dafür die Hauptabstrahlrichtung der Quelle), und zwar bei gleicher Entfernung r zur Schallquelle (Bild 1.4).

Anstelle des Richtungsfaktors Γ verwendet man in der Praxis häufig auch das Richtungsmaß

$$D = 20 \cdot \lg \Gamma = L(r, \varphi, \vartheta) - L(r, \varphi_0, \vartheta_0) \quad (\text{in Dezibel}).$$

L = Schalldruckpegel

Es ist definiert als der zwanzigfache Logarithmus des Richtungsfaktors Γ oder — was das gleiche ist — als Pegeldifferenz zwischen den beiden zueinander ins Verhältnis gesetzten Schalldruckwerten.

Die obigen Ausführungen zum Verhalten des Schalldruckes im kugelförmigen Schallfeld galten nur für den Fall des freien Kugelschallfeldes, d. h. eines Schallfeldes, in dem nur von der Schallquelle forteilende Schallwellen existieren. Man spricht in dem Zusammenhang auch von fortschreitenden Wellen. In der Praxis begegnet man wirklich freien Schallfeldern allerdings nur sehr selten. Ein annähernd freies Schallfeld kann man z. B. auf dem Gipfel eines sehr hohen Berges erzeugen, von wo aus eine Schallquelle nur fortschreitende Schallwellen aussendet und reflektierte Wellenanteile praktisch nicht auftreten. Will man sich beispielsweise für akustische Meßzwecke ein freies Schallfeld unter Laborbedingungen schaffen, so gibt es dafür den sogenannten reflexionsfreien Raum (in der Umgangssprache auch „schalltoter“ Raum genannt). Die Begrenzungsflächen eines solchen Raumes sind lückenlos mit schallabsorbierendem Material, meist keilförmiger Geometrie ausgekleidet, wobei die Keilspitzen in den Raum hineinragen und auf diese Weise zusätzlich zur Vermeidung von Schallreflexionen beitragen. — Treffen Schallwellen — aus dem Medium Luft kommend — auf eine Raumbegrenzung oder ein anderes Hindernis, dessen Schallkennimpedanz Z_0 wesentlich größer ist als die Kennimpedanz von Luft, so werden die Wellen an der Grenzfläche zwischen beiden Medien zu einem mehr oder weniger großen Teil zurückgeworfen oder reflektiert.

Kann sich der Schall nur in einer Raumrichtung ausbreiten, wie das z. B. bei Schallvorgängen in Rohren der Fall ist, so interferieren im Falle eines nicht reflexionsfreien Rohrabschlusses die hinlaufenden und reflektierten Schallwellen miteinander, und es kommt zur Ausbildung von stehenden Wellen. — Befindet sich dagegen die Schallquelle in einem allseits von reflektierenden Begrenzungsflächen umgebenen Raum, so erfahren die zunächst nur fortschreitenden Wellen an diesen Flächen eine Vielzahl von nacheinander stattfindenden Reflexionen, so daß sich nach einer sehr kurzen Zeit — gemessen vom Augenblick der Inbetriebnahme der Schallquelle — eine völlige „Durchmischung“ des Raumes mit Schallwellen aus jeder beliebigen Raumrichtung ausgebildet hat. Die Wahrscheinlichkeit für einen Schalleinfall aus

jeder Richtung des Raumes ist an jedem Raumpunkt gleich groß. Es herrscht ein sogenanntes diffuses Schallfeld, in dem die Schallintensität und mit ihr auch der Schalldruck konstant sind. Lediglich in der unmittelbaren Umgebung um die Schallquelle herum tritt ein räumlich begrenztes Direktschallfeld (= Feld der von der Quelle ausgesandten Wellen) auf. Die räumliche Ausdehnung des direkten und des diffusen Schallfeldes wird durch die Raumeigenschaften um die Schallquelle herum bestimmt, wobei die Grenze zwischen beiden Schallfeldern durch den sogenannten Hallradius gegeben ist. Diffusen Schallfeldern kommt in der akustischen Meßtechnik eine große Bedeutung zu. Zu ihrer Erzeugung gibt es eigens dafür geschaffene Räume, sogenannte Hallräume. — Sowohl im freien als auch im diffusen Schallfeld werden u. a. die Übertragungseigenschaften von elektroakustischen Wandlern meßtechnisch bestimmt. Darüber wird noch in einem späteren Aufsatz dieser Reihe berichtet. Abschließend sei ein Begriff noch erwähnt und erläutert, ohne den viele Erscheinungen bei der Schallausbreitung nicht zu verstehen wären, nämlich die Schallbeugung. Aus der Optik ist uns bekannt, daß jeder lichtundurchlässige Gegenstand, der im Strahlengang des Lichts steht, einen seinen Umrissen entsprechenden Schatten wirft, bzw. daß jede Blende in einer lichtundurchlässigen Wand nur einen solchen Lichtstrahl hindurchläßt, der genau der Form der Blendenöffnung entspricht. Eine derartige Schattenwirkung kann man bei der Schallausbreitung nur unter ganz bestimmten Bedingungen beobachten. Wie wir aus Erfahrung wissen, kennen wir normalerweise keine akustische Schattenbildung im streng optischen Sinne; wir sind gewohnt, auch Schallereignisse quasi „um die Ecke“ herum zu hören. Die Ursache dafür sind Beugungserscheinungen. Hindernisse oder Blenden, die man dem Licht entgegenstellt, sind i. a. sehr viel größer als die Lichtwellenlängen. In der Akustik ist das anders. Betrachtet man nur den Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 10 kHz, so entspricht dem ein Wellenlängenbereich von etwa 3,4 m bis 3,4 cm. Das ist aber genau der Bereich, in dem sich die Abmessungen sehr vieler Gegenstände unserer unmittelbaren Umgebung bewegen. Infolgedessen wird die Ausbreitung von Schall entscheidend durch die Gesetze der Beugung bestimmt.

Läßt man z. B. ebene Schallwellen gegen eine Wand laufen, die eine Blende besitzt, wobei die Blendenöffnung sehr viel größer als die Schallwellenlänge ist, so ist das hindurchtretende Schallwellenbündel tatsächlich ein Abbild der Blendengeometrie. Sind die Blendenabmessungen dagegen gleich groß oder gar noch kleiner als die Schallwellenlänge, so erfährt das ursprünglich hindurchtretende Schallwellenbündel eine so starke Beugung nach allen Seiten, daß daraus wieder Kugelschallwellen entstehen, die sich nach allen Richtungen des hinter der Blende befindlichen Halbraumes gleichmäßig ausbreiten.

In der nächsten Folge beschäftigen wir uns mit dem Aufbau und der Funktion unseres Gehörs.