Gehör-Mikrofon-Kopfhörer Teil 2

In dem hier vorliegenden zweiten Teil der Artikelserie „Gehör-Mikrofon-Kopfhörer" werden Aufbau und Funktion des menschlichen Gehörs ausführlich dargestellt, da die Kenntnisse der einzelnen Zusammenhänge eine wesentliche Voraussetzung zur späteren Beurteilung von akustischen Systemen ist.

von Dr. Ivar Veit
SENNHEISER electronic KG,
3002 Wedemark

2. Aufbau und Funktion des menschlichen Gehörs

Der nachfolgende zweite Teil dieser Aufsatzreihe befaßt sich mit unserem Hörorgan — dem Ohr. Neben dem Aufbau und der Funktion unseres Ohres wird über eine Reihe physikalisch wissenswerter Eigenschaften desselben berichtet, z. B. über den Unterschied zwischen ein- und zweiohrigem Hören, über unser Richtungsgehör sowie über das Hören im freien und im diffusen Schallfeld.

Bild 2.1 zeigt den Aufbau des menschlichen Ohres in einer stark vereinfachten und schematisierten Darstellung. So hat z. B. das Innenohr in Wirklichkeit die Gestalt einer Schnecke, während sie hier zur besseren Veranschaulichung der darin ablaufenden physikalischen Vorgänge ‚entrollt' gezeichnet ist. Genau so besteht unser Gleichgewichtsorgan aus drei Bogengängen, die nach den drei Raumrichtungen orientiert sind; hier sind sie zur Vereinfachung des Bildes stellvertretend nur durch einen Bogengang angedeutet. — Diese Darstellung läßt sehr deutlich die funktionelle Gliederung unseres Ohres in das Außenohr, Mittelohr und Innenohr erkennen.

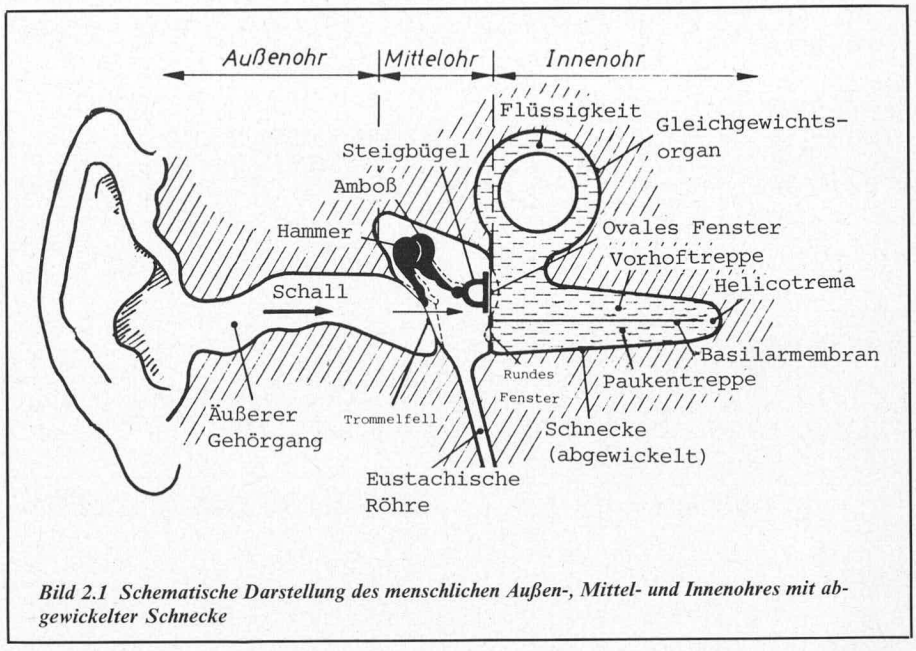

Bild 2.1 Schematische Darstellung des menschlichen Außen-, Mittel- und Innenohres mit abgewickelter Schnecke

Die Ohrmuschel mit dem darin beginnenden äußeren Gehörgang stellt den nach außen hin sichtbaren Teil unseres Gehörorgans dar. Bei einigen Tierarten bildet die Ohrmuschel eine große trichterförmige Erweiterung des Gehörganges, ganz offenkundig mit dem Ziel, von den eintreffenden Schallwellen einen möglichst großen Querschnitt zu erfassen. Die Abmessungen unserer menschlichen Ohrmuschel sind demgegenüber bescheiden und vergleichsweise klein gegenüber den Wellenlängen des größten Teils des Hörschallbereichs. Unsere Ohrmuschel trägt daher nur bei den höheren Frequenzen zur Richtwirkung unseres Hörorgans bei.

Den Gehörgang kann man physikalisch gesehen als eine akustische „Rohrleitung" ansehen, deren inneres Ende mit einer nachgiebigen Membran, dem Trommelfell, abgeschlossen ist. Das Trommelfell bildet gleichzeitig die Grenze zwischen äußerem und mittlerem Ohr.

Hinter dem Trommelfell beginnt das Mittelohr. Es besteht a) aus der luftgefüllten Paukenhöhle, die über die Eustachische Röhre mit dem Nasen-Rachenraum und der Mundhöhle und somit auch mit der Außenluft in Verbindung steht — und b) aus den drei durch Gelenke miteinander verbundenen Gehörknöchelchen (Hammer, Amboß und Steigbügel). Die Eustachische Röhre ist normalerweise durch das Gaumensegel luftdicht verschlossen. Es öffnet sich unwillkürlich, sobald wir gähnen oder schlucken; allgemein bekannt ist in dem Zusammenhang das deutlich spürbare Druckgefühl auf unseren Trommelfellen bei einer raschen Höhenänderung (z. B. im Fahrstuhl), von dem wir uns am einfachsten dadurch befreien können, indem wir beispielsweise gähnen und auf diese Weise die Druckdifferenz zwischen beiden Seiten der Trommelfelle ausgleichen.

Die Gehörknöchelchen bilden einen Hebelmechanismus, dem die Funktion eines akustisch-mechanischen Impedanztransformators zukommt. Das letzte Glied der Gehörknöchelchenkette ist der Steigbügel. Seine Fußplatte sitzt auf einer dünnen, ovalen Membran, dem sogenannten ovalen Fenster, hinter dem das Innenohr beginnt. Das Innenohr, unser eigentliches Hörorgan, ist flüssigkeitsgefüllt. Es besteht aus einem schneckenförmig aufgewickelten, abgeschlossenen Kanal, der Innenohr-Schnecke, von etwa 32 mm Gesamtlänge. Im Bild 2.1 ist die Schnecke, wie schon eingangs erwähnt, abgewickelt dargestellt. Die Transformation besteht darin, daß die relativ niedrige Schallkennimpedanz der Luft ($Z_o = 408\ Ns/m^3$), an die sehr viel höhere Kennimpedanz der Innenohrflüssigkeit ($Z_o = 1{,}44 \cdot 10^6\ Ns/m^3$) angepaßt werden muß.

Neben der Impedanztransformation üben die Gehörknöchelchen auch noch eine Schutzwirkung aus. Sie schützen das Innenohr vor einer Beschädigung, und zwar dadurch, indem sie bei sehr hohen Schalldruckpegeln durch zwei kleine Muskeln aus ihrer sonst üblichen Lage herausgedreht werden und dadurch eine zu heftige Kraftübertragung des Steigbügels auf das ovale Fenster verhindern.

Die Innenohr-Schnecke ist im knöchernen Felsenbein eingebettet. Der gesamte Schneckengang ist der Länge nach durch eine mittlere Scheidewand mit der sogenannten Basilarmembran als beweglichem Teil in einen oberen Kanal (= Vorhoftreppe) und in einen unteren Kanal (= Paukentreppe) geteilt. Genau genommen sind es sogar drei Kanäle (s. a. Bild 2.2), nur ist der dritte Kanal (= Schneckengang) durch eine akustisch nicht wirksame Trennwand (= Reißnersche Membran) von der Vorhoftreppe getrennt, so daß man ihn bei dieser Betrachtung außer acht lassen kann. — Die Vorhoftreppe beginnt hinter dem ovalen Fenster, und die Paukentreppe endet am runden Fenster. Beide Treppen stehen am Ende der Schnecke durch eine kleine Öffnung, dem sogenannten Helicotrema, miteinander in Verbindung. Räumlich oberhalb der Schnecke befindet sich das Gleichgewichtsorgan mit den drei senkrecht zueinander stehenden Bogengängen. Sie sind ebenfalls flüssigkeitsgefüllt und stehen in Verbindung mit dem Innenohr. Infolge der Flüssigkeitsverbindung zum Innenohr können sehr hohe Schalldruckpegel die Funktion des Gleichgewichtsorgans stören.

Schallwellen, die über den Steigbügel und das ovale Fenster auf die Innenohrflüssigkeit der Vorhoftreppe übertragen werden,

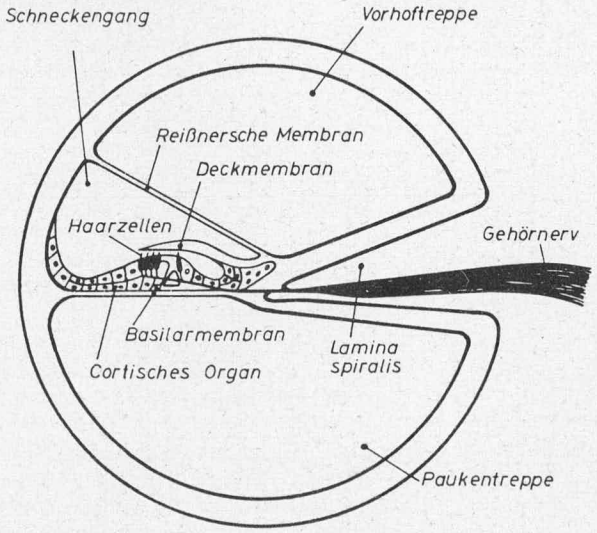

Bild 2.2 Schematische Schnittdarstellung durch einen Schneckengang unseres Innenohres in der unteren Windung

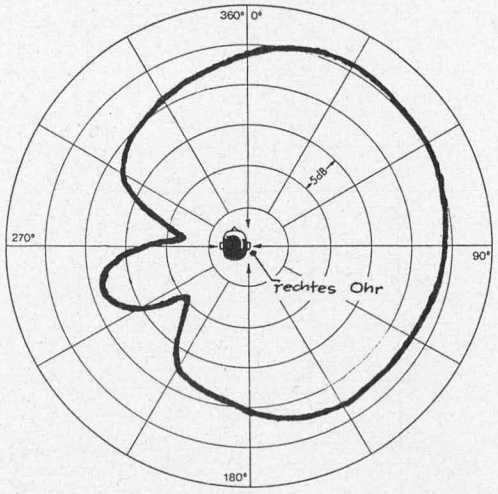

Bild 2.4 Horizontales Richtdiagramm (für den Schalldruckpegel) eines normalen menschlichen Ohres, gemessen mit Terzbandrauschen (Bandmittenfrequenz: f_m = 2 kHz)

und zwar in Form von hydromechanischen Druckwellen, veranlassen die Flüssigkeit nach der Möglichkeit eines Druckausgleichs zu suchen. Die einzige Möglichkeit dafür bietet das runde Fenster, das sich unterhalb des ovalen Fensters befindet und durch die Basilarmembran von der Vorhoftreppe getrennt ist. Die Wände des Schneckengehäuses sind starr. Die Druckwellen in der Innenohrflüssigkeit der Vorhoftreppe können sich entweder über das Helicotrema und die Flüssigkeit der Paukentreppe zum runden Fenster hin ausgleichen, oder aber sie können unter Umgehung des Helicotremas die Basilarmembran im Rhythmus der Schallfrequenz zu Schwingungen anregen und auf diese Weise das runde Fenster erreichen. Beim Hörvorgang geschieht das letztere.

Auf der Basilarmembran befindet sich das sogenannte Cortische Organ, an dem die eigentliche Umsetzung der Schallschwingungen in entsprechende Nervenreize erfolgt. Das Cortische Organ enthält eine Vielzahl von Haarzellen, die gegen eine Deckmembran stoßen, siehe Bild 2.2. Jede Bewegung der Basilarmembran verursacht eine entsprechende Reizung dieser Haarzellen. Die dadurch hervorgerufenen elektrischen Aktionspotentiale in den jeweiligen Nervenzellen des Cortischen Organs werden über den Gehörnerv dem Hörzentrum des Gehirns mitgeteilt, und es kommt zu einer akustischen Sinneswahrnehmung, die wir als „Hören" bezeichnen. — Bei einer sehr intensiven und wiederholt lang andauernden Schalleinwirkung (Lärm!) auf unser Gehör können die Haarzellen irreparabel geschädigt werden, so daß letztlich ein bleibender Hörschaden, eine Schallempfindungs-Schwerhörigkeit entsteht und zurückbleibt, wie man sie z. B. sehr häufig bei Lärmarbeitern antrifft.

Die relativ dicke und unterschiedlich breite Basilarmembran erstreckt sich entlang der Lichtung der knöchernen Schnecke. In unmittelbarer Nähe des ovalen Fensters ist die Basilarmembran am schmalsten, während ihre Breite in Richtung zur Schneckenspitze, d. h. zum Helicotrema hin zunimmt. Bei einer Beschallung unserer Ohren wird die Basilarmembran zu Schwingungen angeregt, deren Struktur und Ablauf von hydrodynamischen Vorgängen bestimmt wird, die sich innerhalb der Innenohrflüssigkeit abspielen. Die Erforschung dieses Funktionsmechanismus ist ein Verdienst von G. v. Békésy (1899–1972); er entdeckte 1928, daß hydraulische Druckwellen in der Innenohr-Schnecke in Form einer Wanderwelle über die Basilarmembran hinwegstreichen. Die Amplitude einer solchen Wanderwelle wächst während ihres Entlangwanderns entlang der Basilarmembran bis zur Erreichung eines Maximums an und sinkt danach sehr schnell ab. Der Ort auf der Basilarmembran, an dem die Wanderwelle ihr Amplitudenmaximum erreicht, ist frequenzabhängig und wird vom Gehör als Maß für die Höhe der Schallfrequenz gewertet. Je höher die Frequenz ist, um so näher rückt die Stelle des Amplitudenmaximums zum fensternahen Teil der Schnecke.

Die Ausbildung der Wanderwelle ist der letzte Vorgang in unserem Gehörorgan, bei dem sich der aufgenommene Schall noch als eine Schwingung, d. h. als ‚analoge' Größe manifestiert. Vom Cortischen Organ ab spielen sich sehr komplizierte Umwandlungs-, Fortleitungs- und Auswertevorgänge ab, bei denen der ursprünglich aufgenommene Schall nur noch in ‚digitaler' Form auftritt und nachweisbar ist.

Die Fähigkeit unseres Gehörs die Richtung zu erkennen, aus der wir akustische Signale empfangen, beruht auf seinem Vermögen, interaurale (= zwischen beiden Ohren auftretende) Zeit- und Intensitätsdifferenzen genau zu bewerten und zu interpretieren. Bei der Interpretation interauraler Intensitätsdifferenzen hat unser Gehör es im Verlaufe seiner Entwicklungsgeschichte gelernt, die durch die Schallbeugung — insbesondere im Bereiche der höheren Frequenzen — bedingten Pegelüberhöhungen, bzw. Pegelverringerungen unmittelbar vor den Gehörgängen richtig mitzubewerten.

Über das Phänomen der Schallbeugung wurde bereits berichtet. Welche Bedeutung hat nun die Beugung bezogen auf das sich um unseren Kopf herum ausbildende Schallfeld und damit auch für das, was wir letztlich mit unseren Ohren hören? Darüber gibt das Bild 2.3 eine sehr anschauliche Vorstellung. Bringt man ein schallhartes Gebilde, z. B. eine Kugel (Durchmesser: d) in ein freies ebenes Schallfeld, wobei die Schalleinfallsrichtung — bezogen auf die Flächennormale — durch den Winkel ϑ gegeben ist, so erhält man an dem mit dem Buchstaben A bezeichneten Ort jeweils eine Schalldruckpegeldifferenz — verglichen mit dem freien Schallfeld — wie das im Bild 2.3 zu sehen ist. Am Ordinatenmaßstab kann die Pegeldifferenz ΔL zwischen dem Schalldruckpegel L_A im Punkte A auf der Kugeloberfläche und dem Schalldruckpegel L_O am gleichen Ort im freien Schallfeld, d. h. bei Abwesenheit der Kugel, abgelesen werden. Auf der Abszisse ist das Verhältnis des Kugeldurchmessers d zur Wellenlänge λ aufgetragen. Solange der Kugeldurchmesser d klein gegenüber der Wellenlänge λ ist, herrscht in dem betrachteten Punkte A auf der Kugeloberfläche stets der gleiche Schalldruckpegel wie im freien Schallfeld ($\Delta L = O$). Der Körper stört das Feld nicht, er ist für das Feld nicht existent. Sind die Abmessungen dagegen vergleichbar mit der Wellenlänge, z. B. $d/\lambda = 1$, so unterscheiden sich die Schallpegel L_A sehr beträchtlich vom Pegel L_O im freien, ungestörten Schallfeld. Bei einer Kugel, bei der die Schalleinfallsrichtung identisch ist mit der Flächenormalen im Punkte A ($\vartheta = O°$), steigt der Schalldruckpegel mit größer werdendem Verhältnis d/λ monoton bis zu +6 dB gegenüber dem Pegel im freien Schallfeld an.

Aus den — je nach Schalleinfallsrichtung — unterschiedlichen Laufzeiten des Schalls zwischen seiner Quelle und unseren beiden Ohren einerseits und den unterschiedlich hohen Schalldruckpegeln vor unseren beiden Gehörgängen andererseits ist unser Sinnesorgan ‚Gehör' in der Lage, die Rich-

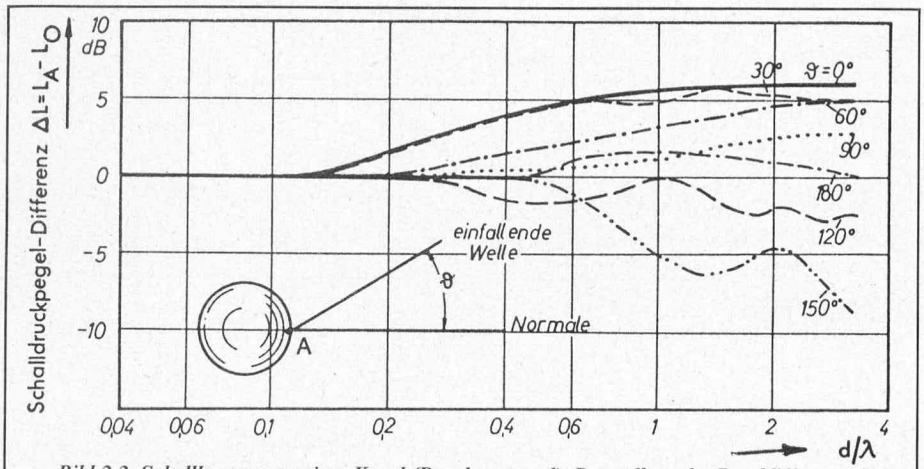

Bild 2.3 Schallbeugung an einer Kugel (Durchmesser: d). Darstellung der Pegeldifferenz ΔL zwischen dem Schalldruckpegel L_A im Punkte A an der Kugeloberfläche und dem Schalldruckpegel L_O im freien Schallfeld (ohne Kugel) am gleichen Ort. λ = Schallwellenlänge ϑ = Einfallswinkel der Schallwellen bezogen auf die Normale im Punkte A

tung des Schalleinfalls sehr präzise zu erkennen.

Neben unserem Kopf selbst tragen bei höhren Frequenzen auch unsere Ohrmuscheln einen gewissen Beitrag zu unserem Richtungsgehör bei. Bild 2.4 zeigt das horizontale Richtdiagramm (für den Schalldruckpegel) eines normalen menschlichen Ohres, gemessen vor dem (rechten) Gehörgang einer Versuchsperson bei einer Beschallung mit Terzbandrauschen (Bandmittenfrequenz: $f_m = 2$ kHz). Daraus kann für diesen speziellen Frequenzbereich ein Maximum des Richtungsempfangs abgelesen werden, das zwischen etwa 20° und 70° liegt. In der entgegengesetzten Richtung verursacht die abschattende Wirkung des Kopfes eine starke Abnahme des Schalldruckpegels, die in diesem Falle Werte zwischen etwa –12 und –20 dB erreichen kann.

Unser beidohrig angelegtes Gehör versetzt uns in die Lage, eine Schallquelle hinsichtlich ihrer Richtung sehr genau zu lokalisieren; die dabei noch auflösbaren Richtungsunterschiede können sehr klein sein. Die größte Ortungsgenauigkeit besitzen wir in der Medianebene (= senkrecht durch unseren Kopf verlaufende Symmetrieebene) unseres Kopfes, und zwar nach vorne gerichtet. Ändert sich hier die Richtung einer Schallquelle nur um etwa 3°, so kann diese Richtungsänderung unter günstigen Voraussetzungen bereits wahrgenommen werden. Zu beachten ist dabei, daß die Schallwellen sich nach Möglichkeit frei, d. h. ohne reflektierende Hindernisse oder Begrenzungen ausbreiten können. Die Richtungslokalisierung funktioniert am schlechtesten in einem halligen Raum (= quasi diffuses Schallfeld), während man ein Höchstmaß Richtungserkennung mit einem sehr kurzzeitigen Schallsignal erzielt, das man beispielsweise in einem reflexionsarmen Raum (= freies Schallfeld) abstrahlt.

Die hier angedeuteten Fähigkeiten unseres beidseitig arbeitenden Hörorgans ermöglichen es uns letztlich auch, einen dreidimensionalen, d. h. einen „räumlichen" Höreindruck vermittelt zu bekommen. Zu diesem Zweck müssen wir nicht unbedingt mit unseren beiden Ohren am Orte des akustischen Geschehens sein. Die heutigen Mittel der Elektroakustik erlauben es uns, den beidohrigen Höreindruck auch elektroakustisch mit Hilfe zweier Übertragungskanäle (= Zweikanaltechnik) zu übertragen (Stereophonie).

Bei der zweikanaligen Stereoaufnahmetechnik unterscheidet man grundsätzlich zwei Verfahren, die ‚Intensitäts'-Stereophonie und die ‚Laufzeit'-Stereophonie. Im ersten Falle wird der Richtungseindruck durch Intensitätsunterschiede und im zweiten Falle durch Laufzeitunterschiede zwischen beiden Übertragungskanälen vermittelt. — Soll eine stereophone Schallaufzeichnung auch monophon, d. h. einkanalig ohne Qualitätseinbuße wiedergegeben werden können, so empfiehlt es sich, das Schallereignis intensitäts-stereophon aufzunehmen. Würde eine derartige Aufnahme auch Laufzeitunterschiede beinhalten, so könnten bei der Signalzusammenführung aus beiden Kanälen störende Interferenzen in Erscheinung treten. Um von vorn herein das Auftreten von Laufzeitdifferenzen zu vermeiden, kann man beispielsweise zwei Richtmikrofone in der Weise zu einem Stereomikrofon zusammenfügen, daß sie räumlich sehr nahe beieinander stehen und somit vom einfallenden Schall quasi gleichzeitig erreicht werden. Nach einer geeigneten Ausrichtung der beiden Mikrofone entsprechend ihren Richtcharakteristiken werden nur die gewünschten Intensitätsunterschiede aufgenommen und zur Übertragung gebracht.

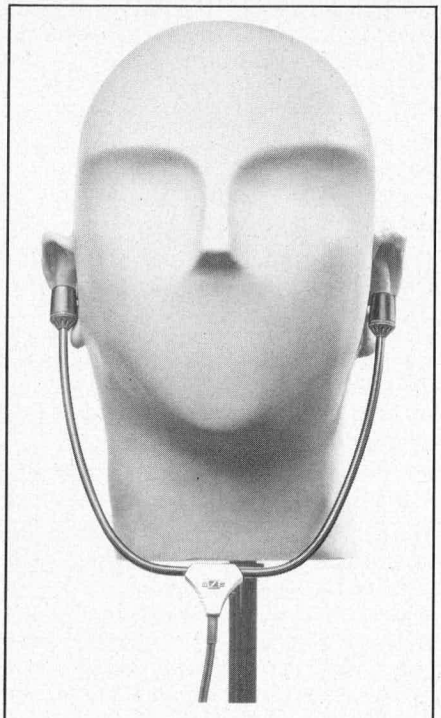

Bild 2.5 Stereomikrofon MKE 2002, geeignet für akustische Aufnahmen mit dem eigenen oder mit einem künstlichen Kopf. Der hier abgebildete Kunststoffkopf wurde speziell für dieses Stereomikrofon geschaffen. (Werkfoto: Sennheiser electronic)

Eine andere Aufnahmetechnik, die speziell für eine stereophone Kopfhörerwiedergabe entwickelt wurde, ist die sogenannte kopfbezogene Stereophonie. Dafür gibt es eigens geschaffene Stereomikrofone, die während der Schallaufnahme unmittelbar vor den Ohren eines künstlichen (oder auch echten) Kopfes getragen werden, s. Bild 2.5. Das in diesem Bild gezeigte Kopf-Stereomikrofon besteht aus einem Kinnbügel, der an seinen beiden Enden mit je einem (Elektret-)Kondensatormikrofon ausgerüstet ist. Der Bügel wird in die beiden Ohrmuscheln eingehängt, so daß die Mikrofone sich nur wenige Millimeter vor den Gehörgängen befinden.

In der Anfangszeit der Kunstkopf-Stereophonie beobachtete man eine sogenannte ‚Im-Kopf-Lokalisation' der Schallquelle. Dieser Effekt war gelegentlich Gegenstand der Kritik an diesem Verfahren, gleichsam aber auch Anlaß zu seiner gezielten Erforschung. Man spürte bei jenen Aufnahmen zwar deutlich den Richtungseindruck, hatte aber dennoch das Gefühl, als würde sich die Schallquelle innerhalb des Kopfes irgendwo zwischen den beiden Ohren befinden. Durch verschiedene Maßnahmen, beispielsweise durch eine naturgetreue Nachbildung der menschlichen Ohrmuscheln und Gehörgänge, ist dieser Effekt bei neueren Kunstköpfen weitgehend ausgeräumt, so daß unsere heutigen Kunstkopf-Aufzeichnungen bei einer Wiedergabe mit einem guten Stereokopfhörer kaum noch einen Wunsch offen lassen.

Abschließend noch einige Anmerkungen zur akustischen Empfindlichkeit unseres Gehörs; im nächsten Beitrag wird ohnehin noch sehr ausführlich die Rede davon sein. Bei der Definition des Schalldruckpegels im ersten Teil dieser Aufsatzreihe hatten wir bereits den Wert von 20 $\mu N/m^2$ als denjenigen effektiven Schalldruck genannt, den wir im Bereich um 1 kHz gerade noch wahrzunehmen vermögen. Bei tieferen und höheren Frequenzen bedarf es höherer Schalldruckwerte, um gerade noch gehört zu werden. Bei einem Schalldruck von 20 $\mu N/m^2$ und einer Frequenz von 1 kHz beträgt die Auslenkung der Luftteilchen nur 10^{-8} mm (= 1/10 Å; Å = Ångström). Längenabmessungen dieser Größenordnung entziehen sich unserem menschlichen Vorstellungsvermögen, unser Ohr registriert sie aber. — Die thermische Bewegung der Luftmoleküle übt auf unser Trommelfell einen ‚Rausch'-Schalldruck von etwa 5 $\mu N/m^2$ aus. Das bedeutet, die Natur hat die Empfindlichkeit unseres Gehörs bis an die Grenze des physikalisch noch Sinnvollen getrieben.