

2. Gehör und Hören

Das Ohr ist ein „Theil am Haupte, von dem der Schall aus der Luft aufgefangen, durch die zugehörigen Gefässe zu dem Gehirne geführt, und in demselben die Empfindung, welche man das Gehör nennet, erwecket wird“. Aus: Zedler Universallexikon, Halle und Leipzig, 1735.

2.1 Geschichte des Gehörs und des Hörens

2.1.1 Einführung

Die Geschichte der genaueren Erkundung des Gehörs beginnt mit dem sezierenden Messer des Forschers im 16. Jahrhundert. Die Anatomie ist aber eine Wissenschaft des Auges. Das Auge jedoch - darüber besteht heute kein Diskussionsbedarf mehr - gehört nicht zu den weitreichendsten Wahrnehmungsinstrumenten, die uns die Natur geschenkt hat. Die Rezeptionskapazität des Auges rangiert im Wellenbereich zwischen 400 und 700 Nanometern, dem Spektrum des sichtbaren Lichts. Alles, was darunter liegt - Röntgen- und Gammastrahlen zum Beispiel -, ist dem natürlichen Auge nicht erkennbar. Alle höheren Wellenlängen ebenso wenig. In Frequenzen übertragen bedeutet dies: Das Auge erfasst einen Bereich von etwa einer Oktave, das Ohr indessen »hört« zehn Oktaven.

Trotz dieser Diskrepanz ist es bis heute das Auge, dem die Fähigkeit zugesprochen wird, über das Ohr zu befinden. Das Auge, sagt bereits schon Johann Gottfried HERDER, sei der »Außen-«, das Ohr dagegen der »Innenminister« in der Regierung des Körpers. Die Geschichte der Erforschung des Gehörs macht deutlich, dass das Ohr, der Innenminister, jahrhunderte lang nicht nur dem Außenminister untergeordnet war, sondern allein mit dessen Mitteln, also mit den Kenntnissen und Erfahrungen eines anderen Ressorts »betrachtet« wurde. Wirkliche Erkenntnisse über die Funktion des Gehörs konnten sich daraus - beinahe zwangsläufig – lange Zeit nicht ergeben.

Darüber hinaus ist es unzutreffend und irreführend, ein Sinnesorgan des Menschen wichtiger zu nennen als das andere. Es ist notwendig, erkennbar werden zu lassen, dass das Ohr »sieht«, der Mund »riecht«, die Haut »hört«, die Augen »fühlen- und dass keines dieser Organe weniger wichtig ist als das andere. Dass folglich auch keine Schädigung eines dieser Organe weniger einschneidend sein kann, als die Schädigung eines anderen. Dass schließlich Lärm eine ebenso große physische und psychische Bedrohung sein kann wie grelles Licht für die Augen, Spritzmittel in Speisen, Säuren auf der Haut oder giftige Gase in der Nase.

Die Industrialisierung der Welt hat unser Hören (Sehen, Riechen, Schmecken, Tasten) verändert. Und mit der Veränderung des Hörens (Sehens, Riechens, Schmeckens, Tastens) hat sich auch die Methode verändert, die Welt wahrzunehmen. Hören, Sehen, Riechen, Schmecken, Tasten sind produktive, nicht nur rezeptive Vorgänge. Sie verändern die Welt, und die veränderte Welt veränderte sie.

2.1.2 Stammesgeschichte

Der Mensch kommt mit Ohren auf die Welt- die Evolutionsgeschichte kennt kein Säugetier ohne Gehör. Die Paläontologie sagt, dass der erste Mensch vor etwa 6 Millionen Jahren entstand. Das Gehör ist älter. Die sog. Vetebraten, jene vor geschätzten 500 Millionen Jahren im Wasser auftauchenden Urwirbeltiere, von denen wir abstammen, verfügten neben dem Seitenliniensystem bereits über ein Innenohr, das sich der Lehrmeinung zufolge durch Einrollen eines Teils der Seitenlinie ergeben hat.

Die Dreiteilung des Ohres in Außenohr, Mittelohr und Innenohr wurde mit dem Wechsel vom Wasser auf das Land notwendig: Die Flüssigkeit, die einstmal das Innenohr von außen umspülte, musste nun als körpereigene Flüssigkeit entwickelt und vor dem Austrocknen bewahrt werden. Es galt zudem, ein Handicap gegenüber den wirbellosen Landbewohnern auszugleichen. Das auf Wasserwellenlängen ausgerichtete Gehör der Wirbeltiere nahm nur etwa ein Tausendstel aller Geräusche wahr, die auf dem Land zu hören waren. Als System der Frequenzumwandlung von Luft- auf Wasserwellenlängen entstand deshalb vor rund 350 Millionen Jahren das einfache Mittelohr.

Weitere 150 Millionen Jahre hat es dieser Zeitrechnung zufolge gedauert, bis sich aus dem einfachen Mittelohr jenes empfindsame Instrument entwickelte, über das alle Säugetiere verfügen: Durch Reduktion und Abspaltung eines nicht mehr benötigten Kiefergelenkteils entstanden die Gehörknöchelchen Hammer, Amboss und Steigbügel, die zunächst frei in der Mittelohrhöhle vibrierten, bis sie - durch Bindegewebe verbunden – sich zu jenem Übertragungssystem entwickelten, das uns heutige Menschen ebenso ziert wie den »Australopithecus Afarensis«, dessen Überreste man mit einem Alter von 4,5 Millionen Jahren datiert - und somit als den ältesten Menschenfund betrachtet.

Die Fundstücke seines Schädels gaben Anlass zu der Vermutung, dass sein Gehirn ein Volumen von etwa 450 Kubikzentimetern besaß. Dem heutigen Menschen wird eine Gehirnfülle von durchschnittlich 1500 Kubikzentimetern attestiert. Das ist mehr als das Dreifache.

Da die Interpretation der akustischen Vorgänge über das Gehirn vonstatten geht, liegt die Vermutung nahe, dass sich im Laufe der Entwicklungsgeschichte nicht nur die akustische Erscheinung der Welt verändert hat, sondern auch die Art ihrer Wahrnehmung. Dass dieser Vorgang beendet wäre, scheint unwahrscheinlich.

Das Hören ist ein Prozess der Weltwahrnehmung, der sich mit dem Wandel der akustischen Erscheinungen verändert. Die Wahrnehmung der akustischen Erscheinungen ihrerseits verändert sich mit dem Wandel des Hörens. Hier geht es dem Ohr nicht anders als den Messinstrumenten der Physik, die der Mensch sich geschaffen hat, um seine Sinnesorgane zu ergänzen: Das Messen bestimmt das Messbare; jeder menschliche Maßstab erschafft eine eigene Welt.

Es wäre eine umfassende Studie wert, die Auswirkungen des Wechsels der akustischen Umgebung auf die Befindlichkeit, auf Denken, Fühlen, Handeln des Menschen zu untersuchen. M. SCHAFER, Vordenker einer „Akustischen Ökologie“, hat in seinem Buch „The Tuning of the World“, deutsche Ausgabe „Klang und Krach“, Verlag Athenäum, 1988, eine ganze Reihe jener Geräuschproduzenten aufgelistet, die uns seit der technischen Revolution umgeben.

Seit Mitte des 18. Jahrhunderts gibt es Trambahnen, die sich auf gusseisernen Schienen, zunächst noch von Pferden gezogen, fortbewegen. Die Dampfmaschine - der Motor der Industrialisierung schlechthin - wurde in den 80er Jahren des vorletzten Jahrhunderts eingeführt. Dampfschiffe gibt es seit 1781! Die Webmaschine - Gerhart Hauptmann hat von ihrem Lärm berichtet - wurde 1785 erfunden. Die erste Dreschmaschine 1788.

Ein Beispiel aus unseren Tagen: Bei Gärtnern und solchen die es sein wollen, ist der Laubbesen durch ein Blasgerät ersetzt worden, das ohrenbetäubenden Lärm erzeugt. Das Gerät sorgt seit einigen Jahren für buchstäblichen Wirbel. Kinder, die im Garten oder auf der Straße spielen, flüchten ins Haus zu ihren Eltern; ruhebedürftige Erwachsene, die in ihren Gärten sitzen, ziehen sich in ihr Haus zurück, wenn der überdimensionale Fön zu tönen beginnt. Die Markteinführung dieses Geräts ist nicht sonderlich erstaunlich. Sie ist symptomatisch für eine Gesellschaft, die einerseits den manuellen Vorgang des Laubfegens vermeiden will, andererseits aber den dadurch entstandenen Bewegungsverlust (und seine gesundheitlichen Folgen) mit eigens dafür entwickelten Sportformen auszugleichen versucht: Mit Sportformen, für die man wiederum eigens entwickelte Kleidung und Gerätschaft erwerben muss - will man sie »richtig« betreiben. Darin zeigt sich denn auch die Beharrlichkeit eines ökonomischen und ökologischen Prinzips, das sich nicht selten über das natürliche Empfinden des Menschen (zunächst des Herstellers) hinwegsetzt. Dass ein buchstäblich ohren- und sinnenbetäubender Laubfön in ansonsten höchst umweltbewußten Staaten wie Kalifornien und Deutschland bis heute erlaubt ist, bestätigt zudem die Überbewertung des Auges und die Unterbewertung des Ohrs. Es zeigt an, dass wir von einer Gleichwertigkeit unserer Sinnesorgane - und folglich von einer Gleichgewichtigkeit ihrer Belastungen - noch weit entfernt sind.

Die akustische Umgebung des Menschen, die Lautsphäre, hat sich in ihrer Lautstärke permanent höher entwickelt, was zunehmend zum Verschwinden von Nischen der Ruhe geführt hat, vergleichbar und eigentlich auch Hand in Hand mit dem Zubetonieren von Landschaft als Naturverlust. Die Polizeisirenen amerikanischer und deutscher Großstädte bieten dafür einleuchtende Beispiele. Um noch gehört zu werden, mussten sie von Jahrzehnt zu Jahrzehnt ihre Lautstärke vergrößern. Der Grundton der Städte begann sie zu übertönen.

Hauptlieferant des Lärms sind Maschinen. Eine elektrische Bohrmaschine erreicht 110 dB(A), ein Propellerflugzeug 120 dB(A), ein industrieller Niethammer 130 dB(A), ein Düsenflugzeug 140 dB(A), eine Rakete weit mehr. Doch diese Zahlen sagen wenig. Was bedeutet es, dass ein rauschender Fluss - in Dezibel A gemessen - ebenso »laut« sein kann wie eine verkehrsreiche Ausfallstraße?

Es ist erfreulich, dass seit einigen Jahren ein Bewusstsein zu entstehen beginnt für die Eigentümlichkeit der akustischen Erscheinungen dieser Welt - und für ihre Veränderbarkeit, nicht nur die sichtbare Geschichte der Menschen ist vergänglich - sondern auch die unsichtbare, und das heißt hier: die hörbare.

Für die sichtbare Geschichte haben wir Museen, Bücher und vielerlei andere Gelegenheiten der Dokumentation. Für die hörbare Geschichte, vor allem für die Alltagsgeschichte, findet sich Vergleichbares kaum, SCHAFFER ist wahrscheinlich der einzige, der Geräusche der Welt in einem Archiv sammelt. Hier geeignete Hör-Räume einzurichten und schließlich auch ein »Museum für die akustische Welt« zu gründen, in dem Landschaften, Tiere, Menschen, Maschinen, Gerätschaften mit ihren Klängen (und natürlich auch - denn es geht nicht um Ausschluss, sondern um Erweiterung - mit ihren Bildern) aufbewahrt sind, das ist eine Aufgabe unserer heutigen Gesellschaft.

Es scheint inzwischen eine nicht von der Hand zu weisende Notwendigkeit, Zeiten und Orte des Ruhigseins und des Hörenkönnens zu fordern und ihre Einrichtung öffentlich zu fördern. Keine neuen Kirchen sind damit gemeint, keine teuren Meditationstempel, keine esoterischen Entspannungssalons, keine Mind-Stations und keine akustischen Saunen.

Was benötigt wird, sind ideologiefreie, kostenfreie, politikfreie, verkaufsfreie, musikfreie Zonen. Es sind Orte ohne Gurus und ohne Verkäufer. Orte des wirklichen Ruhigwerdens, in denen wir hinhören und zuhören (lernen) können, auch und gerade auf jene Person, der wir oftmals am wenigsten vertrauen, obwohl sie uns am nächsten ist. Wie ist es bestellt mit dem Hören auf uns selbst?

Das Ohr ist ontogenetisch und phylogenetisch das älteste Organ des Menschen, erfährt man aus dem Buch „Der Klang des Lebens“, das der Pariser Hals-Nasen-Ohren-Arzt und Professor für »Audio-Psycho-Phonologie«, TOMATIS, 1981 unter dem Titel „La Nuit uterine“ veröffentlichte. Phylogenetisch gehe das Ohr sogar der Entstehung des Nervensystems voraus. Es sei deshalb nicht abwegig zu vermuten, dass das Gehör die Entwicklung des Nervensystems initiierte.

Das ist allerdings die weitreichendste Spekulation in der bisherigen Geschichte der Hörforschung: Das Hören oder das Horchen, wie TOMATIS es nennt, als Impuls des Organismus, ein Nervensystem auszubilden, um aufrecht zu gehen, sich voranzubewegen und sprechen zu lernen.

Die Forschung weist aus, dass die embryonale Entwicklung des Ohrs bereits am 22.Tag nach der Befruchtung beginnt. Das Innenohr, Cochlea und Cortisches Organ, werden im dritten Monat der Schwangerschaft morphologisch ausgebildet und erreichen in der 20. Woche ihre volle und endgültige Größe. Nach vier bis fünf Monaten, einige Forscher sagen sechs, ist das Gehör mit Innen-, Mittel- und Außenohr vollständig ausgebildet und funktionsfähig. Bis dahin hat das Ohr ontogenetisch auch alle Schritte der Phylogenese durchlaufen.

Für TOMATIS - und nicht erst, wie sich zeigen wird, für ihn - besteht ein unlösbarer Zusammenhang zwischen dem Hören und dem Sprechen: Dass das Sprechen mit dem Hören in Verbindung steht, dass wir nur sprechen können, was wir hören - das zeigt jeder Umgang mit tauben Menschen: Die Geschichte des Ohrs ist, nebenbei bemerkt, deshalb auch die Geschichte der Taubheit.

2.1.3 Physiologie

Die Geschichte der Physiologie und der physiologischen Erforschung des Ohrs ist die Geschichte der philosophischen, religiösen, kulturellen, soziologischen, psychologischen (et cetera) Interpretation der jeweils beobachtbaren körperlichen Erscheinungen des Menschen. Sie ist nirgends und bis heute nicht eine Wissenschaft der „objektiven“ Beobachtung, für die sie sich zeitweilig hielt - und sie war dies am wenigsten, je lautstärker sie behauptete, es zu sein.

Die Physiologie der Antike zeigt nur geringen Bezug zur Anatomie. Vorherrschend ist die Lehre von den vier Grundelementen Feuer, Wasser, Luft und Erde, die durch die bewegenden Kräfte von Liebe und Hass vereint oder getrennt werden. Das philosophische Denkgebäude ist rational und systematisch, aber spekulativ, ohne Bezug auf Beobachtung und nachvollziehbare Erfahrung.

Das Gehirn gilt als »Zentralfeuer des Mikrokosmos Mensch«, und das Gehör erscheint als „Hohlraumsystem“. Man kennt nur das äußerlich Sichtbare: Mittel- und Innenohr sind nicht bekannt.

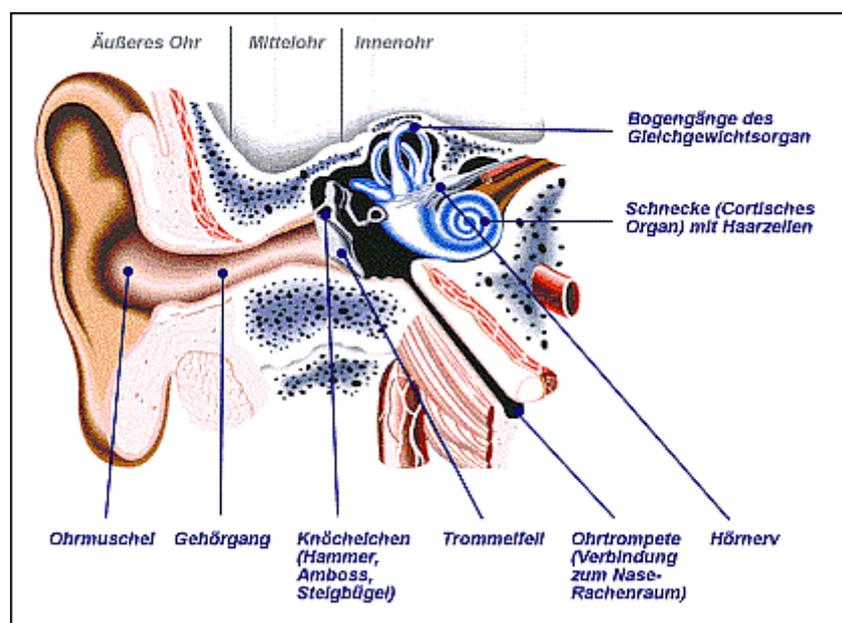
Die Vereinigung der Naturphilosophie mit Verfahren der Naturbeobachtung findet sich in der Physiologie des HIPPOKRATES, doch auch sie ist noch ohne wesentlichen Bezug auf die Anatomie: Das Heilen ist dem Forschen übergeordnet.

Das Gehirn gilt den Hippokratikern als Sitz und Vermittler der Seele. Es ist feucht und zieht durch die Nasengänge trockene Luft und den trockenen Geruch ein, wodurch das Riechen entsteht. Man kennt akute und chronische Mittelohrerkrankungen, mit ihren Komplikationen und Gefahren - und man behandelt häufig vorkommende Verletzungen der Ohrmuschel und Knorpelfrakturen, für deren Behandlung es genaue Vorschriften gibt. Das eigentliche Hörorgan des Innenohrs ist nicht bekannt, wohl aber der äußere Gehörgang bis zum Trommelfell.

Entscheidend für die Physiologie der Antike ist das philosophische System des ARISTOTELES, das im vierten Jahrhundert (von 384 bis 322) vor Christi Geburt entsteht. Es wird bis in das späte Mittelalter hinein prägend sein für die Vorstellungen vom Menschen: Allem Sein liegen zwei Dinge zugrunde, der Stoff und die Form. Der Stoff ist passiv und unbewegt, die Form aktiv und bildend. Der Stoff ist der Leib, die Form ist die Seele. Zentrales Organ des Organismus ist nicht das Gehirn, sondern das Herz. Es ist Ort der Blutbildung, Ursprung des Gefäßsystems und Sitz der Körperwärme. Das Hören entsteht, indem die Bewegung der Luft auf die im Ohr eingeschlossene Luft übertragen wird. Das Ohr erscheint als Organ des Luftsinns, so wie die Nase als das des Feuersinns und das Auge als das des Wassersinns.

Von der Spätantike - zuletzt den für das Ohr nicht wesentlich neuen Erkenntnissen Galens - bis hinein in das späte Mittelalter, bis in die Zeit der Renaissance, klafft eine Lücke in der Geschichtsschreibung.

Mit dem 16. Jahrhundert verzeichnen wir den Beginn der anatomischen Erforschung des Ohrs, ermöglicht durch die Sektion des menschlichen Körpers, die in Spätantike und Mittelalter aus religiösen Gründen verboten war. In der Renaissancezeit erhält sie ihre Legitimation durch die medizinische Forschung.



VESALIUS legt 1543 die erste vollständige und in ihren Grundzügen bis heute gültige Anatomie des menschlichen Körpers vor. Sie enthält die erste Dokumentation des menschlichen Ohrs in seiner Dreiteilung von Außen-, Mittel- und Innenohr. Erstmals werden in ihr der Vorhof des Ohr-Labyrinths, die Kiefer-, die Stirn- und die Steinbeinhöhle beschrieben. Ein halbes Jahrhundert zuvor hatte ACHILLINI die Gehörknöchelchen Hammer und Amboss entdeckt.

Im Jahr 1561 folgen die ersten Beschreibungen der Bogengänge, der Fenster und des Mittelohrs durch FALOPPIO. EUSTACHIO entdeckt drei Jahre später das dritte Gehörknöchelchen, den Steigbügel, die Spindel der Schnecke, die häutige Schnecke sowie die nach seinem Namen benannte „tuba auditiva“, die Eustach'sche Röhre.

1570 gewinnt der Arzt KOYTER die bis heute gültige Ansicht über die Funktion des äußeren Ohrs als reflektierendes Organ und über das Trommelfell und die Gehörknöchelchen als Schallüberträger sowie über die Leitung der Gehörimpulse durch den „nervus acusticus“ in das Gehirn.

Ebenfalls im 16. Jahrhundert erfahren wir zum ersten Mal vom Zusammenhang des Hörens mit dem Sprechen: In Spanien demonstriert der Benediktinermönch PONEE, dass Taubstummheit nicht auf einem Mangel der Sprechorgane, sondern auf einem Mangel der Hörorgane beruht. Er beweist den Zusammenhang von Taubstummheit und Nicht-Hörenkönnen, indem er - zur Verblüffung der Zeitgenossen - Taubstummen das Sprechen lehrt.

Im Jahr 1601 legt CASSERIUS ein illustriertes Werk über den Stimm- und Gehörgang vor, durch das die Menschheit erstmals von den Otolithen erfährt.

1640 ist das Jahr der ersten künstlichen Trommelfell-Implantation! BANZER hieß der Mediziner, der es wagte und dies in seiner Schrift „De auditione laesa“ beschrieb.

1645 legt FOLIUS die erste vollständige Darstellung der Schnecke vor. 1683 folgt die ausführliche Behandlung der Anatomie des Ohrs durch VERNEY: Er zeigt uns erstmals die Ohrenschmalzdrüsen. 1691 liefert RUYSCHE die erste genaue Darstellung der Gefäßversorgung der Paukenhöhle. Und schließlich erhalten wir im Jahr 1704 die erste eingehende Darstellung der Physiologie des menschlichen Ohrs durch VALSAVA, der 1666 bis 1723 in seinem „De aure humana“ unter anderem auch den „Valsavaschen Versuch“ beschrieb: Um Eiter aus dem Ohr zu entfernen, presse man bei geschlossenem Mund und geschlossener Nase Luft durch die Nase, so werde man den Eiter austreiben.

CASSEBOHN fasst 1735 die Anatomie des Ohrs in einer ausführlichen Monologie zusammen und unternimmt als erster die Einteilung des äußeren Gehörgangs in einen knorpeligen und einen knöchernen Teil. Sein Verdienst ist die genaue Erforschung der Schnecke. Er berichtigt Irrtümer über eine angebliche Verbindung zwischen Schädel und Paukenhöhle.

Von 1738 datiert die früheste hörpsychologische Entdeckung über die Fähigkeit des Zurechthörens. EULER begründet die »Elastizität« des Gehörs durch das Verhältnis zwischen dem physiologischen Aufbau des Ohrs und den im psychischen Bereich verankerten Hörnormen.

1760 liefert COTUGNO als erster den Nachweis, dass das Labyrinth mit Flüssigkeit gefüllt ist. Bis hierher galt die Aristotelische Ansicht, es enthalte Luft.

MORGAGNI kommt in der Geschichte der Naturwissenschaften das Verdienst zu, 1761 die physiologische Anatomie des Ohrs auf „feste“, wie es in der Literatur gelegentlich heißt, wissenschaftliche Grundlagen gestellt zu haben. Er beschreibt den Inhalt der Paukenhöhle der Neugeborenen, die Bedeutung der Tuben, die Beziehungen von Mittelohreiterungen und Gehirnabszessen und reflektiert über den Wert der Knochenleitung.

2.1.4 Neurologie

In den Jahren 1742-53 machen BREUCHEL und ZINN im Anschluss an CASSEBOHN erste Angaben zur Neurologie der Schnecke. SEARPA entdeckt 1789 das membranöse Ohrlabyrinth und den „nervus nasopalatinus“.

1846 entdeckt der italienische Arzt CORTI die nach ihm benannten Endorgane der Hörnerven, das Cortische Organ, im Ohrlabyrinth. 1850 findet SCHULTZE die Endungen der Hörnerven in den Vorhofsäcken und Ampullen. 1852 errechnet der Physiologe und Physiker HELMHOLTZ als erster, wie schnell sich ein Nervenimpuls ausbreitet, indem er die Übertragungsgeschwindigkeit in der Nervenzelle eines Frosches misst. 1857 stellt Helmholtz seine Resonanztheorie für das Gehör auf. Darin behauptet er, dass die quergerichteten Fasern der Basilarmembran in der Schnecke des Innenohrs als Resonatoren - also etwa wie gestimmte Klaviersaiten - fungieren.

1886 publiziert RUTHERFORD seine „Telefontheorie“, nach der das Ohr wie ein Telefon die Schallereignisse an das Gehirn vermittelt, selber aber keinerlei analytische Funktion wahrnimmt. Die Entdeckung der Haarnerven hebt RUTHERFORDS Theorie auf. Auch die zunächst unwidersprochene Resonanztheorie von HELMHOLTZ erfährt eine Korrektur. 1905 erhebt WIEN den Einwand, dass im Ohr Eigenschaften gedämpfter und ungedämpfter Schwingungen zusammen auftreten, weshalb die Resonanz des Schallereignisses allein nicht zur Frequenzanalyse ausreichen kann.

Helmholtz hatte angenommen, jede einzelne Faser der Basilarmembran besäße eine natürliche Schwingungszeit und reagiere auf einen bestimmten Laut, dessen Schwingungsbreite innerhalb dieser Spanne lag. Jeder normale Laut setze sich aus vielen einzelnen Schwingungen zusammen, und diese Einzelschwingungen würden ihrerseits entsprechende Fasergruppen in Schwingung versetzen. Die nervösen Impulse, die von den schwingenden Fasern ausgingen, würden dann als Ganzes vom Gehirn als ein Laut von bestimmter Höhe, Lautstärke und Qualität interpretiert.

Untersuchungen von BEKESY, einem Spezialisten für Akustik beim ungarischen Telefondienst, ergaben schließlich, dass diese Theorie nicht zutreffend sein konnte. BEKESY konstruierte ein System, das die wichtigsten Funktionen der Cochlea imitieren konnte und fand in einer Reihe von Experimenten heraus, dass die durch die Cochleaflüssigkeit laufenden Schallwellen, stehende Wellen an der Basilarmembran erzeugten. Von der Form dieser Wellen, die sich je nach Höhe, Lautstärke und Qualität verändert, liest das Gehirn den jeweiligen Laut ab. BEKESY nannte dieses Phänomen „Wanderwelle“. 1961 erhielt er als erster Physiker den Nobelpreis für Medizin und Physiologie.

Alles Weitere gehört in die jetzige Zeit. Sie hat mit der Erforschung des Gehirns zu tun, mit EDV-gestützten Messverfahren aber auch mit zunehmenden Grenzen von Mess-Systemen überhaupt. KÜKELHAUS, Vater des »Erfahrungsfelds der Sinne«, konstatiert in „Hören und Sehen in Tätigkeit“, Frankfurt a. M., 1978: „Das Gehör entsteht, wie es wirkt: als Raumlage- Sinn, beim Menschen in Besonderheit als Individual-Sinn. (...). Das Gehör entsteht nicht aufgrund (oder zum Zwecke) der Hörbarkeit von Schall. (...). Die eigentliche Wirkung des Schalls liegt jenseits oder unterhalb der Hörbarkeit“.

ZWICKER, der verstorbene Münchner Ordinarius, notiert in seinem Buch „Psychoakustik“, Berlin/Heidelberg/New York, 1982: „Die modernste Elektronik ist

nicht in der Lage, auch nur einigermaßen das nachzubilden, was uns als gesundes Gehör geschenkt ist. Demnach darf und soll das Studium des menschlichen Gehörs dazu dienen, sich im Wundern zu üben“.

Dieser Abschnitte folgte leicht gekürzt einem Aufsatz von:

KARST, Karl: Geschichte des Ohrs. In: Welt auf tönernen Füßen. Schriftenreihe Forum, Bd. 2, Verlag Steidl, Göttingen 1994, S. 45 ff.

2.2 Aufbau und Funktion

Der anatomische Aufbau des menschlichen Ohres ist bereits geschichtlich beleuchtet worden und in Bild 2.1 noch einmal schematisch dargestellt.

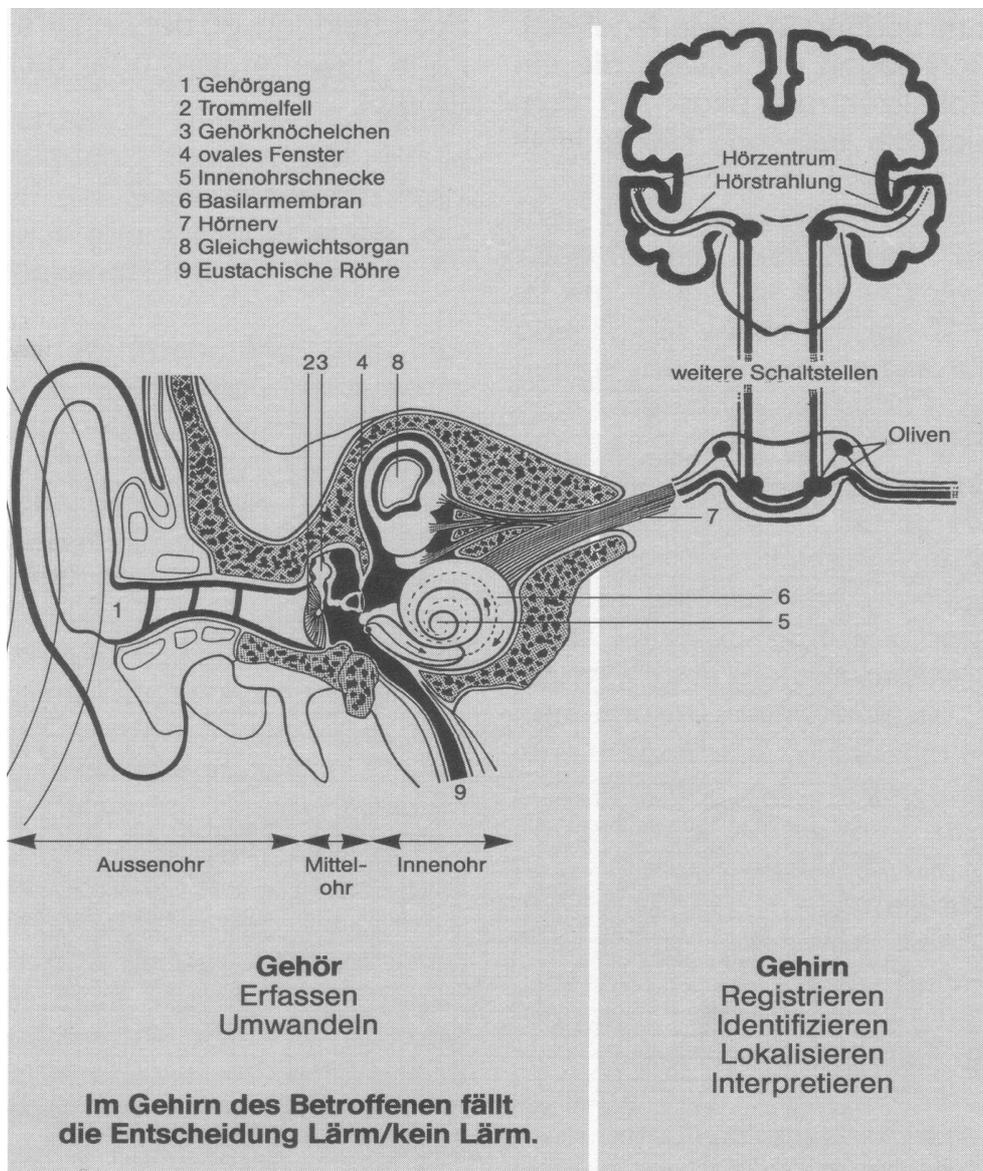


Bild 2.1. Schematische Darstellung des menschlichen Gehörs mit seiner nervösen Signalverarbeitung. © SUVAPro, Luzern.

Hier folgen noch ein paar physiologische Details. Der Schall als physikalischer Reiz wird von der Ohrmuschel aufgefangen und gelangt durch den äußeren Gehörgang auf das Trommelfell, welches er in Schwingungen versetzt. Die Ohrmuschel hat Einfluss auf das Richtungshören. Der Gehörgang ist etwa 2,5 cm lang, das Trommelfell hat durchschnittlich eine Fläche von etwa 55 mm² und eine Dicke von 0,1 mm. Der äußere Gehörgang hat bereits Einfluss auf das Schallereignis, indem er Frequenzen zwischen 2000 Hz und 4000 Hz bevorzugt, messbar in der sog. *Außenohr-Übertragungsfunktion*. Über das System der *Gehörknöchelchen* im Mittelohr werden die Schwingungen des Trommelfells auf die Membran des sog. *ovalen Fensters* des mit Lymphe gefüllten Innenohrs übertragen. Damit das Trommelfell nicht durch statische Luftdruckunterschiede außen minus innen vorverformt werden kann, hat das Mittelohr zum Druckausgleich eine Verbindung über die *Eustach'sche Röhre* (auch Ohrtrumpete) zum Rachenraum. Die Hebelwirkung der drei Gehörknöchelchen „*Hammer*“, „*Amboss*“ und „*Steigbügel*“ ist von großer Wichtigkeit, sie dient der Anpassung des Luftschalls an den Flüssigkeitsschall im Innenohr, indem sie die Schwingungen relativ großer Amplituden und kleiner Kraft am Trommelfell in Schwingungen kleiner Amplitude und großer Kraft am ovalen Fenster umsetzen, das Verhältnis beträgt etwa 22, man nennt das auch Impedanzanpassung. Eine weitere Eigenart der Knöchelchen liegt in ihrer Schutzfunktion. Bei akustischer Übersteuerung versteifen sie sich, dieser Effekt setzt bereits bei etwa 80 bis 85 dB Schalldruckpegel ein, ist jedoch mehr auf den unteren Frequenzbereich beschränkt. Sie können allerdings das Gehör nicht vor Zerstörung schützen, die etwa ab 130 dB einsetzt. Das Innenohr ist umgeben von besonders hartem Knochengewebe, dem sog. Felsenbein, und in Form einer *Schnecke (Cochlea)* mit etwa zweieinhalb Windungen ausgebildet. Im Innenohr befindet sich das *Cortische Organ* in dem letztendlich die Umsetzung des Schallreizes in Nervenimpulse stattfindet. Um den Aufbau und die Funktion zu verstehen, ist es hilfreich diese Schnecke abgewickelt in einem Längs- und Querschnitt darzustellen, Bild 2.2 und Bild 2.3.

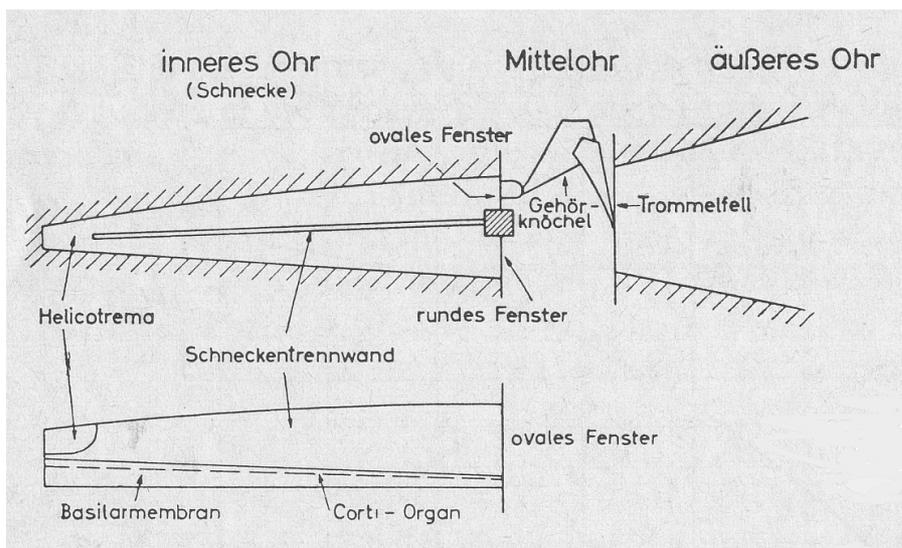
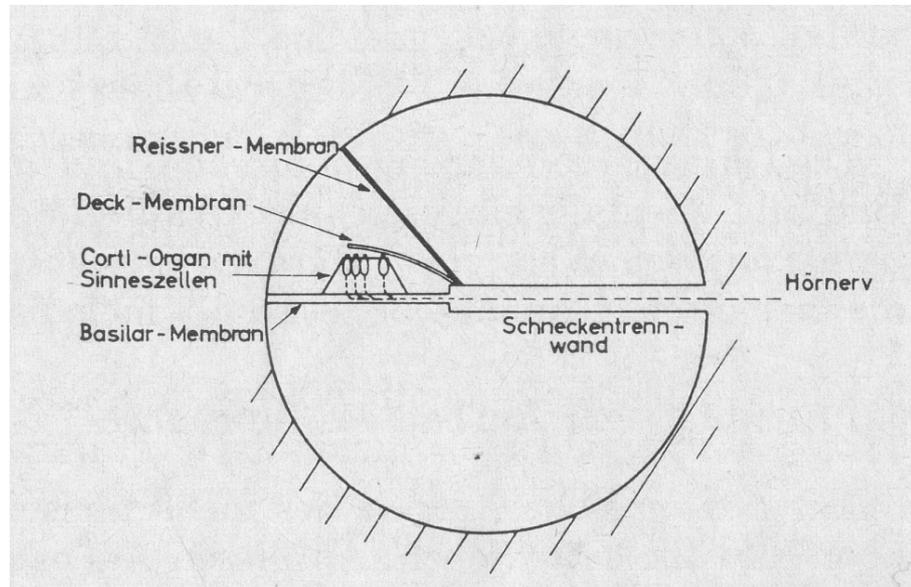


Bild 2.2. Aufbau des Gehörs, schematisch. Längsschnitt, Schnecke abgewickelt. © S. Hirzel Verlag, Stuttgart

Der Innenraum wird durch die Schneckentrennwand in einen oberen und unteren Teil geteilt. Ein Loch am Ende der Trennwand, das sog. *Helicotrema*, sorgt dafür, dass sich Flüssigkeitsunterschiede oben und unten ausgleichen können. Die Trennwand reicht nicht von einer Wand der Schnecke zur anderen. Sie lässt vor der Außenwand auf der ganzen Länge einen Spalt frei, der von einer schwingungsfähigen Membran,

der *Basilarmembran*, überbrückt wird. Diese ist am ovalen Fenster nur 0,17 mm breit, während sie am Helicotrema etwa 0,5 mm misst, ihre Länge beträgt ca. 32 mm. Auf der Basilarmembran ist in der gesamten Längsrichtung das Cortische Organ angeordnet, in dem sich mehrere Reihen von insgesamt 24000 Sinneszellen, das sind feine Haarzellen, befinden, die wiederum durch 28000 Nervenfasern mit dem Gehirn verbunden sind. Vom freien Ende der Schneckentrennwand ist schräg nach

Bild 2.3.
Querschnitt
durch das
Innenohr
(Schnecke),
schematisch
© S. Hirzel
Verlag,
Stuttgart.



oben eine sehr feine Membran, die *Reissner-Membran*, gespannt, unter ihr liegt die Deckmembran, die mit einem Rand an der Schneckentrennwand fest verbunden ist und mit dem anderen Rand lose auf den Haarzellen aufliegt. Wenn nun eine Schallwelle über das Trommelfell und die Gehörknöchelchen die Membran des ovalen Fensters in Schwingungen versetzen, so werden diese Wechselbewegungen zunächst auf die Lymphe des oberen Schneckenkanals und des Kanals zwischen Reissner-Membran und Basilarmembran übertragen und über das Helicotrema auch auf die Lymphe des unteren Schneckenkanals, der wegen der Inkompressibilität der Flüssigkeit mit einer elastischen Membran, dem runden Fenster, abgeschlossen ist. Dabei breitet sich längs auf der Basilarmembran eine Welle geringer Fortpflanzungsgeschwindigkeit aus, die durch die Elastizität des Gewebes bestimmt wird. Diese sogenannte *Wanderwelle* beginnt am ovalen Fenster und versetzt die Basilarmembran im Zusammenspiel mit der Reissnermembran in radiale und longitudinale Scherbewegungen, die wiederum zu einer Relativbewegung mit den Haarzellen führt. Diese werden dadurch mechanisch verbogen und erzeugen so Reizströme in den Nervenfasern. Die Amplitude der Wanderwelle ist am Einspannpunkt, also am ovalen Fenster noch klein, nimmt dann längs der Basilarmembran bis zu einem Maximum (Wellenbauch) langsam zu, um zum freien Ende hin schnell abzufallen. Bild 2.4. Bei Anregung mit einer tiefen Frequenz liegt das Maximum der Wanderwelle eher am Ende, bei einer hohen Frequenz mehr in Richtung ovales Fenster. Die Selektivität ist relativ unscharf, denn das Maximum der Wanderwelle für eine bestimmte Frequenz hat immer eine gewisse Breite auf der Membran, so dass auch Haarzellen anderer Töne mit angeregt werden können. Geräusche mit vielen Frequenzanteilen und deren Amplituden werden in eine komplizierte räumliche Abbildung auf der Basilarmembran zerlegt (Erregungsmuster)

und das Gehör ist in der Lage daraus in einer hoch komplizierten Art und Weise Tonhöhe, Klangeindruck und Lautstärke zu bilden.

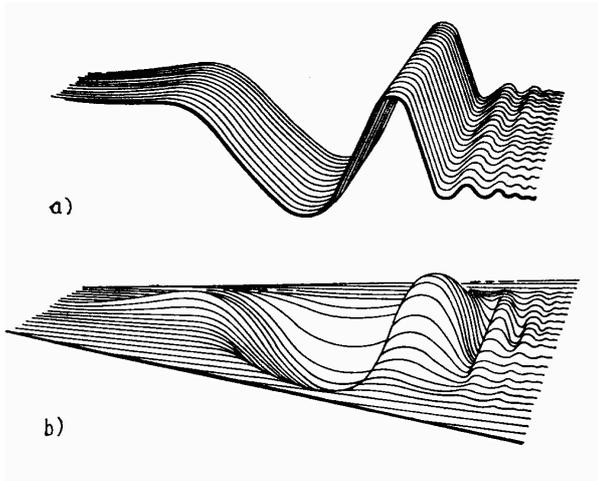


Bild 2.4. Räumliche Darstellung der Wanderwelle auf der Basilarmembran; links liegt das ovale Fenster, rechts das freie Ende. (a) ohne, (b) mit Berücksichtigung der seitlichen Fixierung. © VEB Verlag Technik, Berlin.

Es gibt frequenzabhängige untere und obere Empfindlichkeitsgrenzen des Gehörs, dargestellt in den *Kurven gleicher Lautstärke* Bild 2.5, wobei zu beachten ist, dass der Begriff Lautstärke bereits das subjektive Empfinden meint.

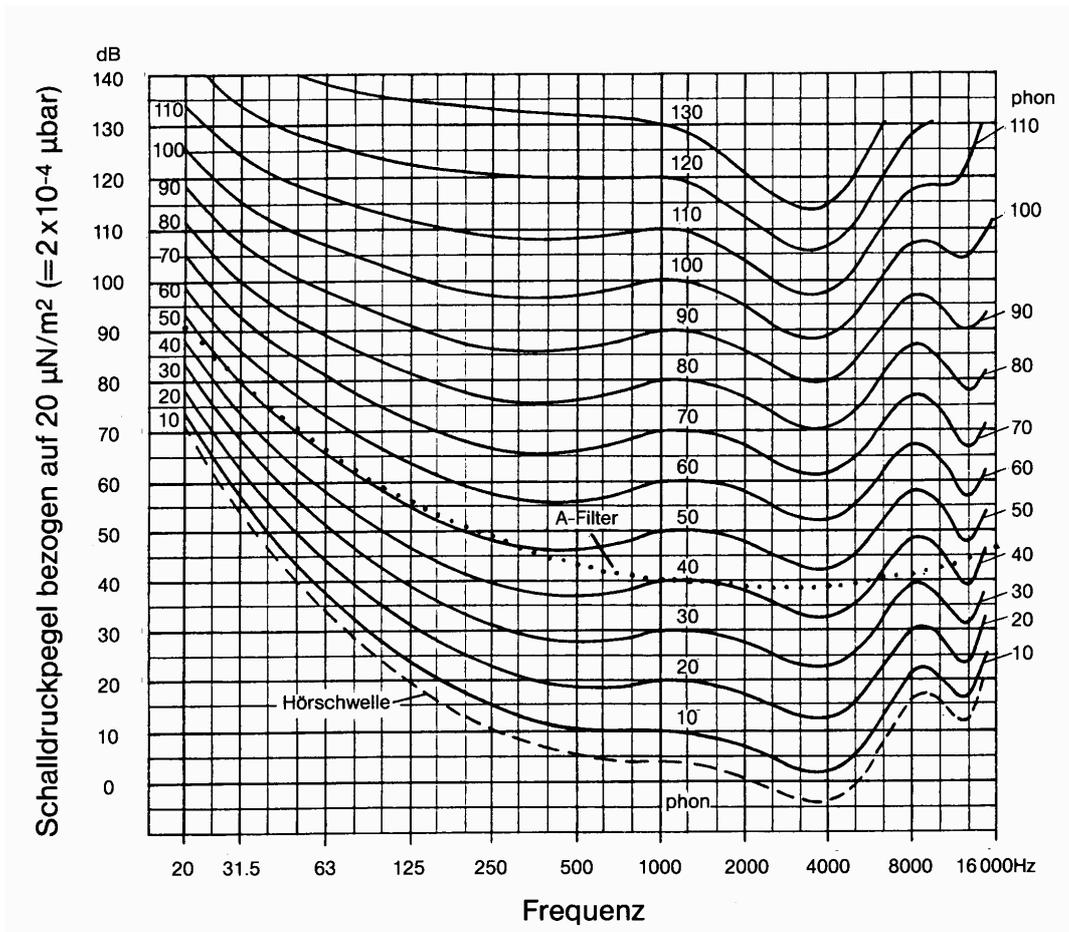


Bild 2.5. Kurven des Schalldruckpegels gleicher Lautstärkeempfindung über der Frequenz. © SUVA, Luzern.

Danach ist das Ohr bei tiefen und hohen Frequenzen unempfindlicher als im mittleren Bereich zwischen 1000 Hz und 5000 Hz und um 4000 Hz (c5-Senke) am empfindlichsten, hat eine mittlere Hörschwelle bei etwa $2 \cdot 10^{-5}$ Pascal, was als 0 dB festgelegt ist, und eine Schmerzgrenze bei ca. 60 bis 200 Pa, einem Pegel von 130 bis 140 dB. Die durch die Kurven eingeschlossene Fläche nennt man auch Hörfläche, in ihr liegen alle natürlichen Schallereignisse wie Sprache oder Musik. Über einen Pegel von 130 dB hinaus können bleibende Hörschäden entstehen. Diese können allerdings auch schon bei viel geringeren Pegeln auftreten, wenn eine Dauerbelastung zum Beispiel über eine Arbeitsschicht von 8 Stunden vorliegt, und dem Gehör keine ausreichenden Erholzeiten zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund ist beim Arbeitsschutz das Tragen von Gehörschützern ab 90 dB Schalldruckpegeln Pflicht. Auch können sehr kurzzeitige hohe Schallimpulse (Schießlärm oder Feuerwerk bis 150 dB Spitzenpegel !!) das Gehör bleibend schädigen.

Die Hörschwelle verschiebt sich frequenzabhängig bei gleichzeitigem Vorhandensein von Störschallen und eigentlichem Reiz, abhängig davon ob es sich um Störgeräusche oder Störtöne handelt, diese Kurven heißen dann *Mithörschwellen*. Die Verschiebung tritt deswegen auf, weil Störschalle verdeckende Wirkung haben können. Die Bewertung einer physikalischen Messung durch die A-Kurve soll dem Ingenieur ein adäquates Maß für die frequenzabhängige Lautstärkeempfindung des Menschen liefern, der Messwert hat dann die Dimension dB(A), vergl. Abschn. 1.7. Das Gehör übersetzt physikalischen Reiz und Wahrnehmung nicht immer 1:1. So ist die empfundene Lautstärke eines Schallereignisses etwa doppelt so hoch, wenn der Schalldruckpegel um 10 dB(A) ansteigt, deswegen hat die Lautstärke eigene Einheiten wie das PHON (veraltet) oder das SONE. Das PHON stimmt nur bei 1000 Hz zahlenmäßig mit dem Schalldruckpegel in dB überein, siehe Bild 2.5. Auch die empfundene Tonhöhe stimmt zahlenmäßig nur bis etwa 500 Hz mit der physikalischen Frequenz überein, wie Bild 2.6 zeigt, Darüber bleibt die subjektiv empfundene Tonhöhenänderung hinter dem physikalisch vorgegebenen Intervall zurück und heißt *Tonheit* mit den entsprechenden Skalen MEL (melodische Tonhöhe) oder BARK (1 BARK= 100 MEL).

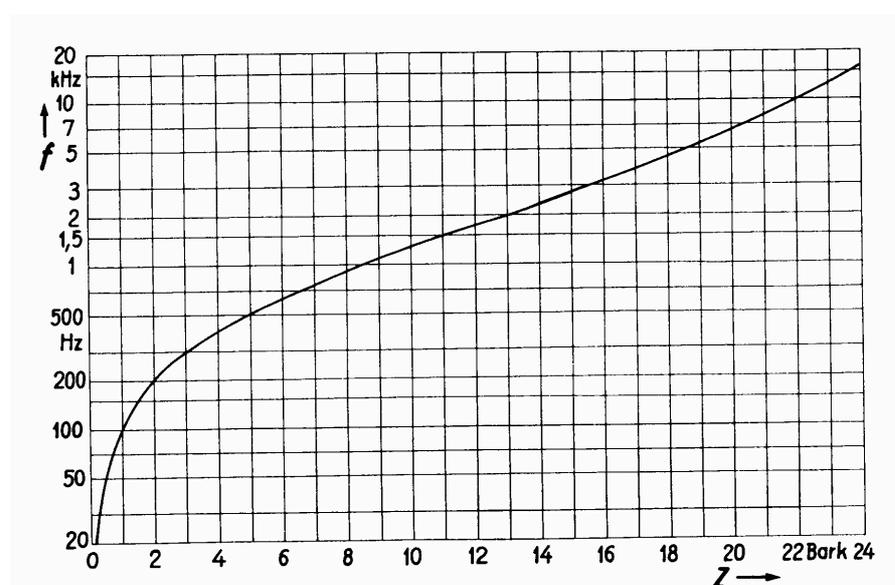


Bild 2.6.
Zusammenhang
zwischen
physikalischer
Frequenz und
empfundener
Tonhöhe (Tonheit in
Bark). Nur bis 500
Hz sind beide
Größen proportional.
© S. Hirzel Verlag,
Stuttgart.

In Wirklichkeit ist das Gehör noch viel komplizierter als hier beschrieben werden kann. Denn es existieren beim Hören eine Reihe von Regel- und

Rückkopplungsprozessen mit einer komplexen Signalverarbeitung im Gehirn, Interpretation findet erst hier statt, ein Forschungsfeld von Physiologen und Neurologen. Das Gehirn ist beispielsweise in der Lage mangelhaftes Hören zum Teil aus dem Kontext und der Erfahrung auszugleichen, dabei wird wie im Fall von Sprache die gesamte „abgespeicherte“ Grammatik genutzt. Auch wäre der Mensch total überfordert, wenn er ständig jeden einzelnen Ton, der an sein Ohr dringt, isoliert wahrnehmen und analysieren müsste. Vor dieser Überforderung schützt ihn die Fähigkeit zur „auditiven Diskrimination“: Töne, welche als weniger wichtig eingestuft werden, können weitgehend ausgeblendet oder in den Hintergrund verdrängt werden. Zugleich wird die Wahrnehmung auf jene Töne und Schallquellen konzentriert, die man wirklich zu hören wünscht. Deshalb ist es dem Individuum auch möglich, sich in lauter Umgebung auf spezifische akustische Informationen zu konzentrieren und sich im Geräusch- und Stimmengewirr eines öffentlichen Lokals auf bestimmte Gesprächspartner zu fixieren, sog. *Cocktailparty-Effekt*. Eine weitere Fähigkeit des menschlichen Gehörs ist die räumliche Wahrnehmung: Dank der Position der beiden Ohren und dem dazwischen liegenden Abstand ist das gesunde menschliche Gehör in der Lage, Schallwellen zu orten – also beispielsweise in einem Raum sofort festzustellen, wo sich ein sprechender Mensch, ein Radio oder ein Wecker befindet. Die unterschiedliche Schallintensität und die wenigen Mikrosekunden, um die die Wahrnehmung der Schallwellen von einem Ohr zum anderen differiert, gestatten zumeist eine rasche Information über die Herkunft des Schalls. Zudem kann sich der Mensch seiner Stimme und seines Gehörs wie eines Echolots bedienen – zum Beispiel, um sich in einem dunklen Raum zu orientieren.

Schallereignisse können darüber hinaus, abhängig davon ob sie angenehm oder störend sind, eine ganze Reihe an psychosomatischen Prozessen im Körper in Gang setzen, mit diesen Fragen beschäftigen sich Lärmwirkungsforscher in Zusammenarbeit mit Medizinern und Psychologen.

Zusätzliche Literatur

FASOLD, W., KRAAK, W., SCHIRMER, W (Hrsg.): Taschenbuch der Akustik, Teil 1, Kap. 2. VEB Verlag Technik, Berlin, 1984,

ZWICKER, E.; FELDTKELLER, R.: Das Ohr als Nachrichtenempfänger. Monographien der elektrischen Nachrichtentechnik; 19. S. Hirzel Verlag Stuttgart, 1967.

ZWICKER, E.: Psychoacoustics – Facts and Models. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, NY, 1999.