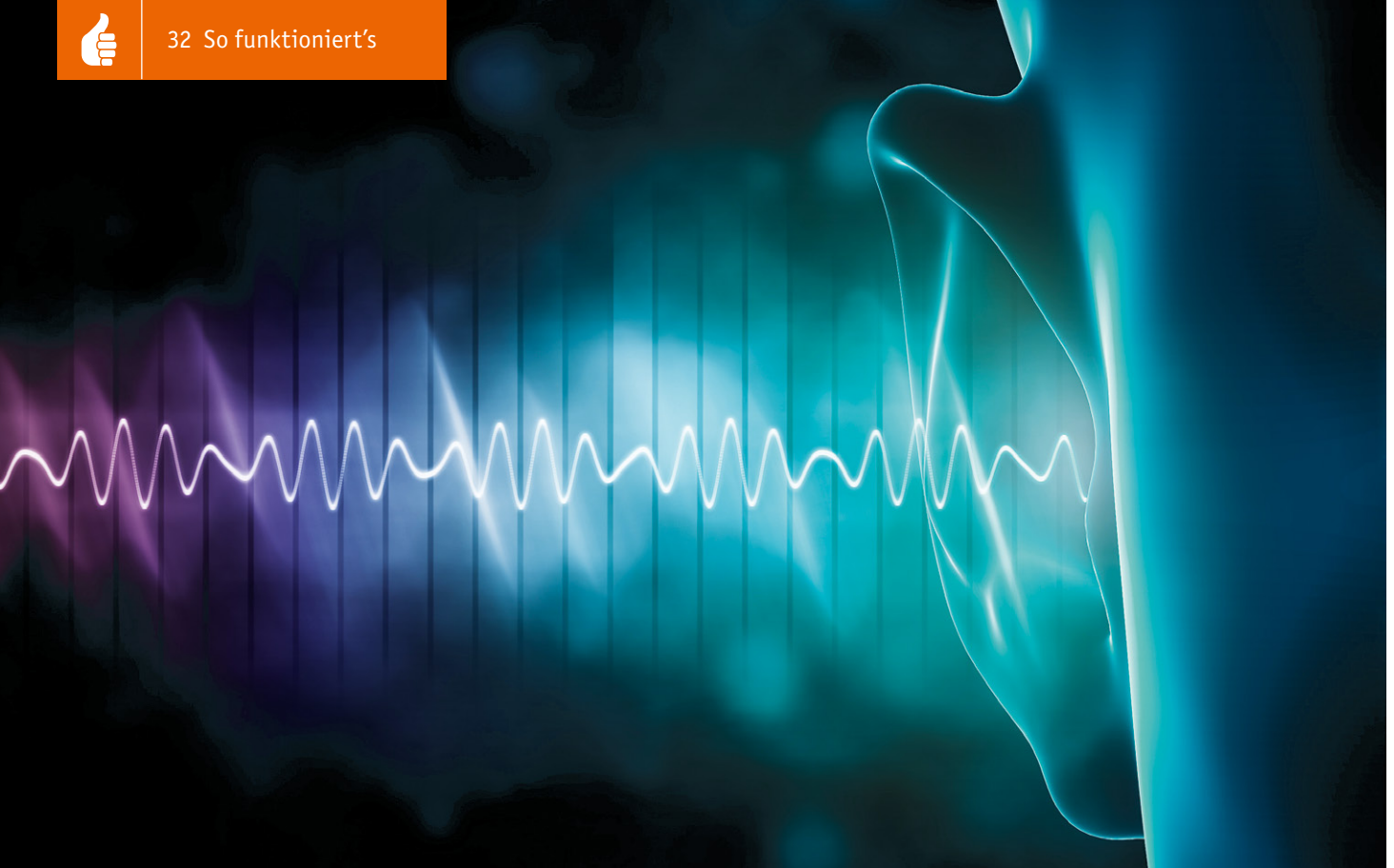




Unser Gehör

Akustik-Serie Teil 10

Aufbau, Funktion, Hörschwelle, Schmerzschwelle, Lautstärke, Lautheit, Hörverlust, Hörgeräte und Audiometrie

Unser Gehör ist eines unserer wichtigsten Sinnesorgane. Kinder, die ohne oder mit eingeschränktem Hörvermögen geboren werden, haben Schwierigkeiten, sprechen zu lernen. Mit dem verminderten Gehörsinn gehen Verständnis- und Verständigungsschwierigkeiten einher. Nicht umsonst leitet sich der Begriff „doof“ von dem Wort „taub“ ab. Im Vergleich zu unserem Auge, das sichtbares Licht mit Wellenlängen zwischen etwa 380 nm und 780 nm wahrnimmt, was nur einer Oktave entspricht, ist unser Ohr in der Lage, Frequenzen zwischen etwa 20 Hz und bis zu 20 kHz wahrzunehmen. Das entspricht einem Frequenzumfang von etwas mehr als 10 Oktaven. Man spricht hier auch vom Hörfrequenzbereich.“

Aufbau und Funktion des Gehörs

Den Aufbau unseres Ohres zeigt das **Bild 1**. Die Ohrmuschel mit dem darin beginnenden äußeren Gehörgang stellt den von außen sichtbaren Teil unseres Hörorgans dar. Den äußeren Gehörgang – er hat einen mittleren Querschnitt von etwa 0,4 cm² und eine mittlere Länge von etwa 25 mm – kann man als einseitig offenes, „praktisch“ schallhartes Rohr betrachten, dessen anderes Ende durch eine nachgiebige Membran, dem Trommelfell, abgeschlossen ist. Im mittleren Frequenzbereich schließt das etwa 1 cm² große Trommelfell den Gehörgang nahezu reflexionsfrei ab.

Das Trommelfell bildet die Grenze zwischen dem äußeren und dem mittleren Ohr. Hinter dem Trommelfell beginnt das Mittelohr, siehe dazu auch die schematische Darstellung im **Bild 2**. Es besteht aus der luftgefüllten Paukenhöhle, die über die Eustachische Röhre mit dem Nasen-Rachen-Raum und der Mundhöhle in Verbindung steht; des Weiteren besteht es aus den drei über Gelenke ineinandergreifenden Gehör-

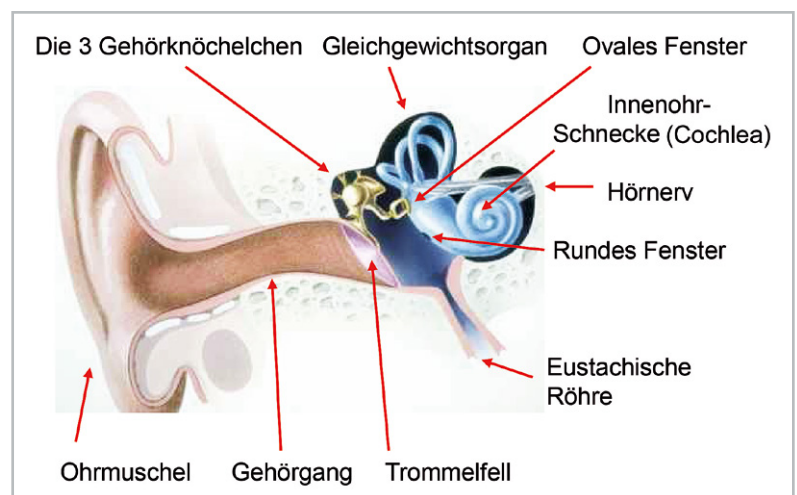


Bild 1: Das menschliche Ohr. Die drei Gehörknöchelchen (Hammer, Amboss und Steigbügel) haben die Funktion eines Impedanztransformators. Sie sorgen dafür, dass die Schnelle v_{Tr} , mit der die relativ große Fläche S_{Tr} des Trommelfells (ca. 1 cm²) bei Beschallung des Ohres schwingt, auf die sehr viel kleinere Fläche S_{oF} des ovalen Fensters vom Innenohr verstärkt übertragen wird. Das ovale Fenster schwingt infolgedessen mit einer im Verhältnis der beiden Flächen S_{Tr}/S_{oF} deutlich erhöhten Schwingschnelle $v_{oF} = v_{Tr} \cdot S_{Tr}/S_{oF}$.



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 (ELVjournal 4/2020)
- Raum- und Bauakustik – Sabine'sches Gesetz, Nachhallzeit und äquivalente Absorptionsfläche (ELVjournal 4/2020)
- **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.

knöchelchen (Hammer, Amboss und Steigbügel). Die Gehörknöchelchen bilden einen Hebelmechanismus, dem zusammen mit den unterschiedlich großen Flächen von Trommelfell und ovalem Fenster die Funktion eines Impedanztransformators zukommt. Das letzte Glied der Gehörknöchelchenkette, der Steigbügel, sitzt auf dem schon erwähnten ovalen Fenster, einer sehr dünnen Membran, und stellt damit eine direkte Verbindung zum Innenohr her.

Das Innenohr ist das eigentliche Hörorgan. Es besteht aus einem mit $2\frac{1}{2}$ -Windungen schneckenförmig aufgewickelten und am Ende abgeschlossenen Kanal von insgesamt etwa 32 mm Länge, der sogenannten Schnecke (Cochlea). Es ist mit einer Flüssigkeit (Perilymphe) gefüllt. Unter der Impedanztransformation versteht man die Anpassung der relativ niedrigen Schallkennimpedanz der Luft an die sehr viel höhere Schall-

kennimpedanz der Innenohrflüssigkeit. Das geschieht erstens über die Gehörknöchelchenkette und zweitens über die Flächentransformation S_{Tr}/S_{Of} , siehe dazu die Bildunterschriften zu den Bildern 1 und 2.

Die Innenohrschnecke ist im knöchernen Felsenbein eingebettet. Der Schneckengang seinerseits ist der Länge nach durch eine Scheidewand mit der Basilar-membran als beweglichem Teil in einen oberen Kanal, der Vorhoftreppe (Scala vestibuli), und in einen unteren Kanal, der Paukentreppe (Scala tympani), geteilt. Die Scala vestibuli beginnt hinter dem ovalen Fenster, und die Scala tympani endet am runden Fenster. Beide Treppen oder Kanäle stehen am Ende durch eine kleine Öffnung, dem Helicotrema, miteinander in Verbindung. Räumlich oberhalb der Schnecke befindet sich der Vestibular-Apparat (Gleichgewichtsorgan) mit den drei Bogengängen. Sie sind ebenfalls mit Perilymphe gefüllt. Im Bild 2 sind die Bogengänge symbolisch nur durch einen Bogengang angedeutet.

Schallwellen, die über den Steigbügel und das ovale Fenster auf die Innenohrflüssigkeit der Vorhoftreppe übertragen werden, und zwar in Form von hydraulischen Druckwellen, veranlassen die Flüssigkeit, nach einem Druckausgleich zu suchen. Die einzige Möglichkeit dafür bietet das runde Fenster, das sich unterhalb des ovalen Fensters befindet und durch die Basilar-membran davon getrennt ist. Dass die Schnecke umgebende knöchernen, schallharte Felsenbein scheidet dafür aus. Die Druckwellen der Innenohrflüssigkeit oberhalb der Basilar-membran können sich daher entweder über die Öffnung des Helicotremas (Bild 2) und die Flüssigkeit der Scala tympani zum runden Fenster hin ausgeglichen oder aber sie können unter Umge-

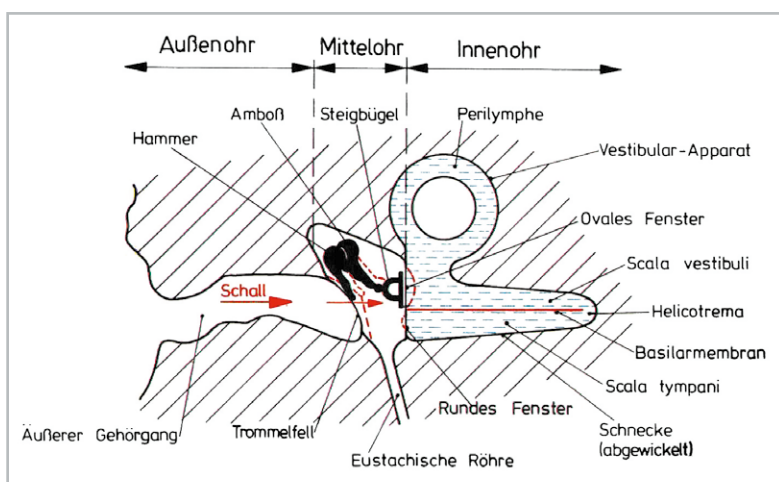


Bild 2: Schematische Darstellung des menschlichen Außen-, Mittel-, und Innenohres mit dessen abgewickelter, flüssigkeitsgefüllter Schnecke (Cochlea), die normal aus $2\frac{1}{2}$ Windungen besteht. Das Trommelfell und das ovale Fenster sind hier nicht maßstabsgerecht abgebildet. Das Verhältnis ihrer Flächen zueinander S_{Tr}/S_{Of} beträgt etwa 17:18.



hung der Helicotrema-Öffnung die Basilarmembran im Rhythmus der Schallanregung in Schwingungen versetzen und auf diese Weise das runde Fenster erreichen. Beim Hörprozess geschieht Letzteres.

Auf der Basilarmembran befindet sich das Cortische Organ, an dem die eigentliche Umsetzung der Schallschwingungen in Nervenreize erfolgt. Das Cortische Organ enthält drei bis fünf Reihen von Haarzellen, denen in geringem Abstand eine Deckmembran gegenübersteht, siehe Bild 3 und Bild 4. Alle (Schwing-) Bewegungen der Basilarmembran verursachen eine Reizung dieser Haarzellen, die ihrerseits entsprechende elektrische Impulse erzeugen und diese über den Gehörnerv dem Hörzentrum des Gehirns mitteilen, und es kommt zur Sinneswahrnehmung des Hörens. Das Cortische Organ bildet somit den ersten, uns von der Natur mitgegebenen „Analog-Digital-Wandler“: Die analogen Schallschwingungen werden in eine Folge von (kompliziert codierten) digitalen elektrischen Impulsen umgewandelt.

Diese Haarzellen (Bild 4) sind es dann auch, die bei langanhaltender Beschallung (mit mehr als 85 dB(A) und länger als 8 h täglich) über eine längere Zeit hinweg unwiederbringlich zerstört werden. Mehr darüber im nächsten Beitrag der Akustik-Serie im ELVjournal.

Aber auch das Schwingverhalten der Basilarmembran ist interessant und bemerkenswert. Die kleinste

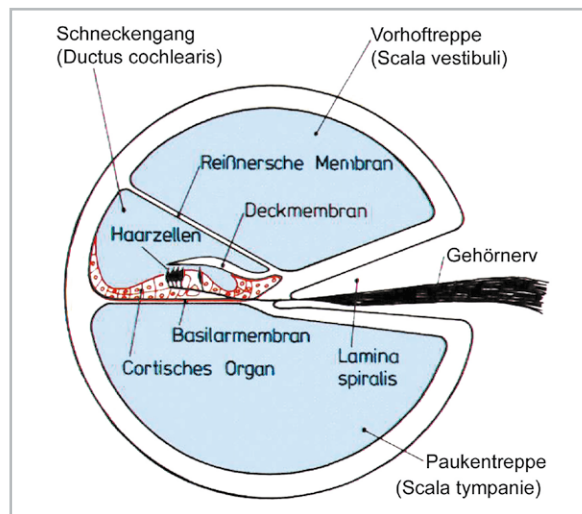


Bild 3: Schnittdarstellung durch einen Gang der Innenohrschnecke. Auf der Basilarmembran befindet sich das Cortische Organ, an dem die Umsetzung der mechanischen Schwingungen in elektrische Nervenimpulse erfolgt. Das Cortische Organ enthält eine Vielzahl von Sinneszellen, deren härchenartige Fortsätze (Haarzellen) in geringem Abstand einer Deckmembran gegenüberstehen. Bewegungen der Basilarmembran verursachen eine Reibung an den Haarzellen.

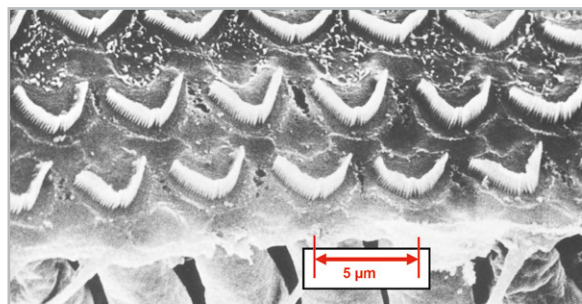


Bild 4: Sinnes- (Haar-) Zellen auf einem intakten Cortischen Organ in unserem Innenohr (elektronenmikroskopische Aufnahme)

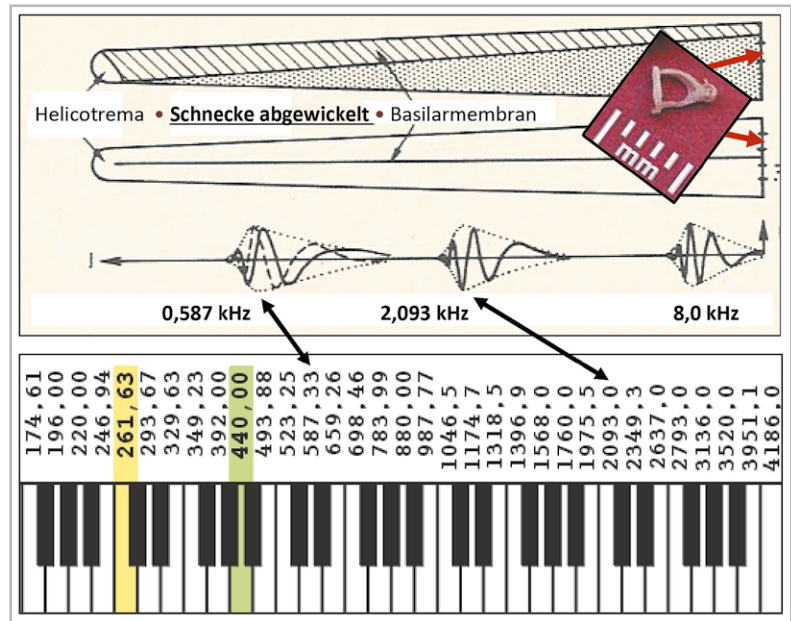


Bild 5: Die obere Darstellung zeigt noch einmal schematisch das Innenohr mit abgewinkelter Schnecke, bei der die Schwingungsanregung durch den Steigbügel hier von rechts nach links erfolgt, im Gegensatz zur sonst üblichen Darstellung. Das hat hier damit zu tun, dass die auf der Basilarmembran auftretenden Auslenkungsmaxima auch von rechts nach links anwachsen. Bei den tiefen Frequenzen entstehen die Auslenkungsmaxima in Richtung zur Schneckenspitze hin, während diese Maxima für die hohen Frequenzen im basalen Ende des Innenohres entstehen. – In der rechten oberen Ecke des Bildes sieht man den Steigbügel im Größenvergleich zu einem mm-Maßstab. Die Auslenkungsmaxima sind außerordentlich klein (im nm- und Å-Bereich).

Breite hat die Basilarmembran in unmittelbarer Nähe des ovalen Fensters, d. h. dort, wo der Durchmesser der Cochlea am größten(!) ist, während ihre Breite in Richtung zur Schneckenspitze, d. h. zum Helicotrema hin, zunimmt. Trifft Schall auf das Ohr, gerät die Basilarmembran in Schwingungen, und zwar mit Auslenkungsmaxima, die je nach Frequenz an unterschiedlichen Stellen ortsfest auf dieser Membran zu beobachten sind.

Diese Tatsache hat Hermann von Helmholtz seinerzeit dazu veranlasst, die Funktion der Basilarmembran mit den Vorgängen auf einem Zungenfrequenzmesser zu vergleichen. Diese Vorstellung erscheint auf den ersten Blick zwar sehr einleuchtend, stimmt aber nicht. Die tatsächlichen Vorgänge auf der Basilarmembran werden, wie wir heute wissen – insbesondere durch die Arbeiten von György von Békésy (1899–1972) –, durch hydrodynamische Vorgänge in der Perilymphe bestimmt. Im Jahre 1928 stellte von Békésy fest, dass hydraulische Druckwellen in der Cochlea in Form einer Wanderwellenbewegung über die Basilarmembran hinwegstreichen, siehe dazu auch die obere Darstellung im Bild 5. Die Amplitude der Hüllkurve der Wanderwelle wächst während des Entlangwanderns über die Membran bis zum Erreichen ihres Maximums an und sinkt danach steil ab. Diese Auslenkungen sind extrem klein (zwischen etwa 1 nm und einigen Å). Diejenige Stelle auf der Basilarmembran, an der die Wanderwelle ihr Maximum erreicht, wird vom Gehör als Maß für die Höhe der Schallfrequenz gewertet. In der genannten Darstellung von Bild 5 sind das z. B. die Frequenzen 0,587 Hz und 2,093 Hz. Die Wanderwelle auf der Basilarmembran ist der letzte Vorgang in unserem Gehör, bei dem man den Schall noch als (analoge!) Schwingung verfolgen kann. Für die Entdeckung des Wanderwelleneffekts erhielt von Békésy 1961 als einziger Nichtmediziner den Nobel-Preis für Medizin. Er war von Beruf Physiker.

Hörschwelle und Schmerzschwelle

Wie wir aus Erfahrung wissen, kann unser Gehör akustische Ereignisse nur innerhalb eines bestimmten Frequenz- und Schallpegelbereichs wahrnehmen. Die untere Schallpegelgrenze bezeichnet man als Hörschwelle und die obere Schallpegelgrenze als Schmerz(empfindungs)schwelle, siehe Bild 6. Das Gebiet zwischen beiden Schwellen nennt man Hörfläche. Die



Hörschwelle beschreibt denjenigen Schalldruck bzw. Schalldruckpegel, bei dem unser normales, gesundes Ohr Schall gerade noch wahrnimmt. Die Hörschwelle lässt sich sehr genau durch eine Ja-Nein-Aussage ermitteln. Beide Schwellen sind frequenzabhängig. Die größte Empfindlichkeit besitzt unser Ohr im Frequenzbereich zwischen etwa 700 und 6000 Hz. Der kleinste Schalldruck, den wir in diesem Bereich noch wahrnehmen, beträgt etwa $20 \mu\text{N/m}^2$. Dieser Wert wurde als Bezugswert für den Schalldruckpegels L_p ($= 0 \text{ dB}$) festgelegt.

Jede Beeinträchtigung des Hörvermögens äußert sich am auffälligsten im Verlauf der individuellen Hörschwelle. Die Messung der Hörschwelle erfolgt mit Sinustönen. Das Ergebnis ist ein sogenanntes Tonaudiogramm, das für die Diagnostik von Hörschäden bedeutsam ist. Man versteht darunter den Schallpegelabstand zwischen der gemessenen Hörschwelle eines Hörgeschädigten und der Hörschwelle normalhörender Personen bei den einzelnen Messfrequenzen.

Lautstärke und Lautheit

Wie Bild 7 sehr deutlich zeigt, verläuft die Hörschwellenkurve stark frequenzabhängig. Um subjektive Lautstärkeempfindungen quantitativ besser beurteilen zu können, hat man neben der physikalischen Größe des Schalldrucks auch gehörbezogene Größen eingeführt. Die bekannteste davon ist die Lautstärke bzw. der Lautstärkepegel L_n (Einheit: phon), der durch subjektiven Hörvergleich mit einem genauso laut empfundenen, kalibrierten 1-kHz-Sinuston ermittelt wird. Unter der Lautstärke von beispielsweise 80 phon versteht man einen Schall (beliebiger Frequenz), der genauso laut empfunden wird wie ein 1-kHz-Sinuston mit einem Schalldruckpegel von 80 dB.

Den ersten anerkannten Vorschlag für die Wahl eines Lautstärkemaßstabes machte H. Barkhausen im Jahre 1926. Von ihm stammt auch der erste Lautstärkemesser auf der Basis des subjektiven Lautstärkevergleichs. Zur Vermeidung der unbequemen subjektiven Messung wurden auch objektiv messende und anzeigende Messgeräte geschaffen, wie z. B. der DIN-Lautstärkemesser. Sie enthielten im Wesentlichen ein Mikrofon, einen Messverstärker und eine Messwertanzeige. Darüber hinaus besaßen sie zusätzlich noch drei Ohrkurvenfilter, mit denen für die verschiedenen Pegelbereiche die Kurven gleicher Lautstärke angenähert wurden. Das waren die Bereiche 0–30 DIN-phon, 30–60 DIN-phon und über 60 DIN-phon.

Bei den heute üblichen objektiven Pegelmessgeräten, die aus dem DIN-Lautstärkemesser hervorgegangen sind, ist man bei den Messergebnissen vom DIN-phon abgekommen und gibt stattdessen die Messwerte (nach IEC) als bewertete Schalldruckpegel an. Die Bewertung erfolgt jetzt mit den Bewertungsfiltren A, B und C, siehe Bild 8, die mit den früheren Ohrkurvenfiltern weitgehend übereinstimmen. Die so gemessenen und bewerteten Pegel werden in dB(A), dB(B) oder dB(C) angegeben. Bei Lärmmessungen dominiert heute die Angabe in dB(A). Außerdem ist man heute bei den Messgeräten selbst von der analogen Technik weitestgehend abgekommen und hat sie durch digitale Einheiten ersetzt.

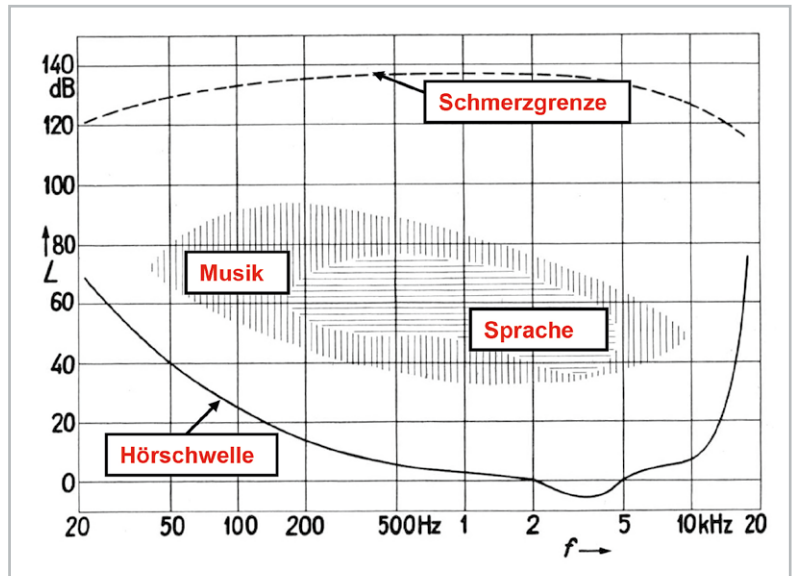


Bild 6: Hörfläche von normalhörenden Probanden für Sinustöne. Schraffiert eingetragen: Spektrale Schallpegelverteilungen für Musik und Sprache. Die kleine Ausbeulung der Hörschwelle zwischen 2 und 5 kHz stellt eine Empfindlichkeitssteigerung um fast 5 dB dar, bedingt durch die Wirkung des äußeren Gehörganges als $\lambda/4$ -Resonator.

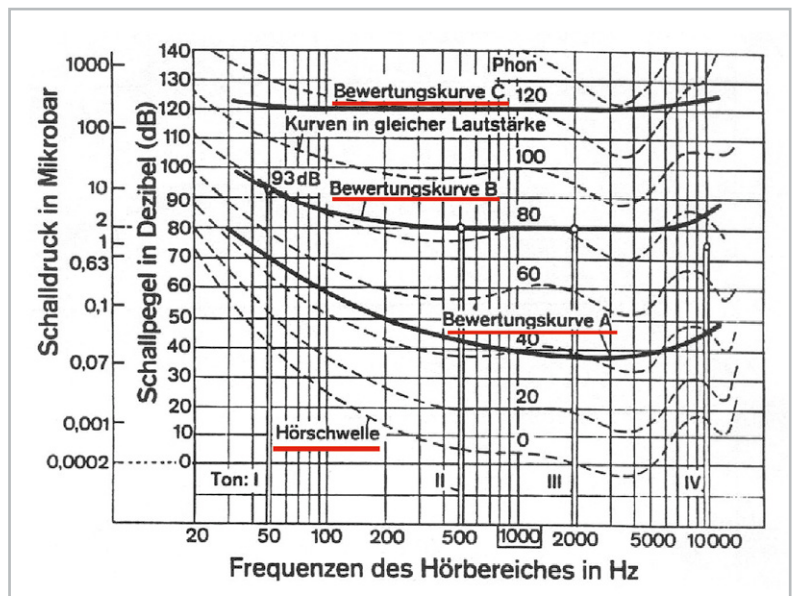


Bild 7: Kurven gleicher Lautstärke (Isophonen) für sinusförmige Töne und Bewertungskurven A, B und C. Der Schalldruck ist hier in μbar angegeben ($1 \mu\text{bar} = 0,1 \text{ N/m}^2 = 0,1 \text{ Pa}$), die Lautstärke hat die Einheit phon.

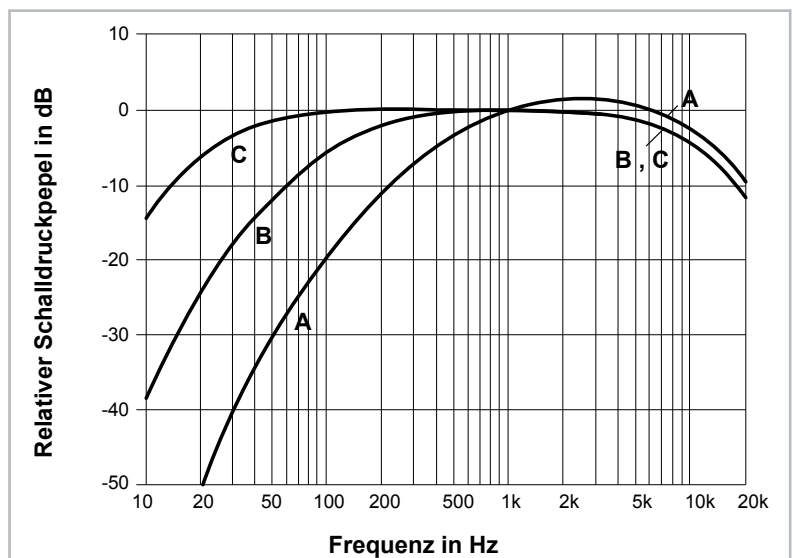


Bild 8: International festgelegte Bewertungskurven für Schallpegelmesser mit den Bewertungsfiltren A, B und C gemäß IEC

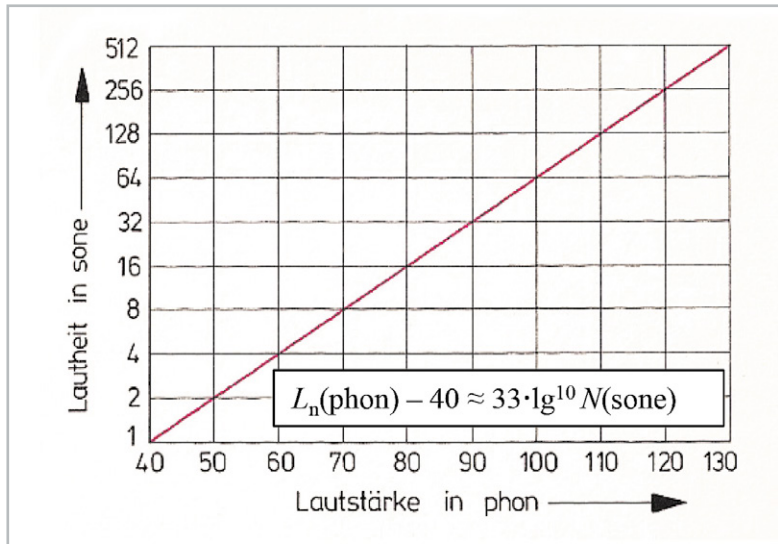


Bild 9: Zusammenhang zwischen der Lautheit N (in sone) und der Lautstärke L_n (in phon). Unterhalb von 40 phon ist der Zusammenhang nicht mehr linear. Die im Diagramm stehende Formel erlaubt es, auch für Dezimalwerte der Lautstärke (in phon) oder umgekehrt auch für Dezimalwerte der Lautheit den jeweils anderen Wert zu berechnen.

Eines noch: Die phon-Skala bzw. die dB-Skala bereitet dem Praktiker von ihrer Anschaulichkeit her oftmals Schwierigkeiten. Ein Beispiel: Wenn der Lärm einer Maschine z. B. einen Lautstärkepegel von 77 phon hat und wenn man neben ihr eine weitere, gleichlaute Maschine in Betrieb nimmt, erhöht sich der gesamte Lautstärkepegel, wegen der Energieverdopplung, auf „nur“ 80 phon. Eine Verdopplung des Zahlenwertes wäre da hilfreich. Und da hilft der Begriff der Lautheit N (Einheit: sone) weiter, siehe Bild 9. Die Lautheit von 1 sone entspricht einer Lautstärke von 40 phon, und zwar per Definition. Der doppelt so laut empfundene Schall hat eine Lautheit von 2 sone, der vierfach so laut empfundene 4 sone usw. Oberhalb von 40 phon entspricht jeder Lautheitsverdopplung ein Lautstärkezuwachs von etwa 10 phon. Dieser Zusammenhang gilt auch für Schalldruckpegel L_p , aber nur bei 1 kHz!

Knochenschall

Das Thema Knochenschall wurde bereits in einem früheren Beitrag dieser Serie im Rahmen des Beitrages über Kopfhörer behandelt. Dort wurden auch spezielle Knochenleitungshörer vorgestellt. Hier folgen daher nur noch einige ergänzende Anmerkungen dazu.

Unter Knochenschall versteht man Körperschall, der über unseren Schädelknochen unser Innenohr erreicht und somit den gleichen Hörindruck erzeugen kann wie luftgeleiteter Schall, der unser Innenohr auf dem üblichen Wege über den äußeren Gehörgang und über das Trommelfell, die drei Gehörknöchelchen und über das ovale Fenster erreicht. Beide Schallübertragungswege führen zum gleichen Zielort, nur dass der Knochenschall das Mittelohr umgeht. Die Erregung der Schneckenendorgane auf der Basilarmembran ist die gleiche. Das hat im Jahre 1932 der schon erwähnte Forscher G. von Békésy nachgewiesen, und zwar durch ein sehr eindrucksvolles Experiment. Er erregte dabei den Kopf von der Stirn her mit einem 400-Hz-Ton und beschallte gleichzeitig beide Ohren mit Luftschall der gleichen Frequenz. Es gelang ihm dabei, durch Veränderung von Amplitude und Phase des luftgeleiteten Schalls den über Knochenleitung zugeführten Ton im Innenohr praktisch auszulöschen, quasi durch eine Art Antischalleffekt. Über den Antischall als ein Mittel für den persönlichen Schallschutz wird in einem späteren Beitrag noch sehr ausführlich berichtet.

Aus hörphysiologischer Sicht scheint der Knochenschall nie einem wichtigen Zweck gedient zu haben. Im Gegenteil, dafür spricht auch die bemerkenswert gute Körperschall-Isolation unseres Innenohres, die durch eine ausgeprägte Pneumatisation zustande kommt. Diese besteht aus lufthaltigen Zellen und Hohlräumen um denjenigen Knochenbereich

herum, in dem die Innenohrschnecke eingebettet ist, nämlich dem Mastoid, siehe Bild 10. Dennoch gelangt ein gewisser Teil unserer akustischen Umwelt, insbesondere oberhalb von etwa 800 Hz, auch über den Knochen unseres Schädels zum Innenohr.

Abschließend zum Thema Knochenschall sei nur noch auf eine weniger bekannte Möglichkeit hingewiesen, wo auch Knochenleitungshörer zum Einsatz kommen können, nämlich bei Mobiltelefonen, siehe dazu das Bild 11.

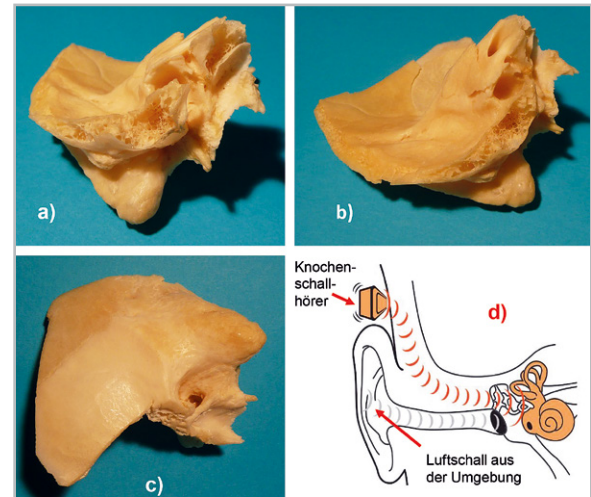


Bild 10: Felsenbein-Präparat
a) und b) mit deutlich erkennbarer Pneumatisation
c) Seitenansicht mit Gehörgangsöffnung
d) Einleitung von Knochenschall zum Innenohr hin



Bild 11: Beispiel für ein Mobiltelefon (Typ TS 4, Sanyo) mit eingebautem Knochenleitungshörer. Das Telefon kann man sich an die Stirn, an die Wange oder an eine andere Stelle des Kopfes halten, und die Gehörgänge bleiben dabei offen.

Hörgeräte

Ist das Innenohr erst einmal geschädigt, z. B. durch Lärm, so helfen nur apparative Lösungen, und das sind im Wesentlichen Hörgeräte. In früheren Zeiten waren das zunächst Hörrohre. Aber schon Ende der 1940er-Jahre kamen die ersten elektronischen Hörhilfen auf den Markt, zunächst noch netzbetrieben mit Elektronenröhren (RV12 P 2000), gefolgt von batteriebetriebenen Taschengeräten, ebenfalls noch röhrenbestückt (DF 651, DF 67). Im Prinzip sind Hörgeräte Schallverstärker, bestehend aus Mikrofon, Verstärker, Hörer (zunächst noch Einsteckhörer) und Stromquelle (Batterie).

Als dann zwischen 1954 und 1957 die Transistortechnik sowie eine weitere Miniaturisierung der Bauteile einen platzsparenderen Aufbau von Hörgeräteverstärkern ermöglichten, wurden die anfänglich

benutzten Kristallmikrofone durch elektromagnetische Mikrofone abgelöst, die bald auch in erstaunlich kleinen Abmessungen zur Verfügung standen. Und an Stelle der Taschenhörgeräte kamen Hinter-dem-Ohr-Hörgeräte (HdO) und Im-Ohr-Hörgeräte auf den Markt. Bild 12 zeigt zwei Beispiele davon, und zwar in transparenter Ausführung. Man erkennt darin besonders gut die beiden Wandler, den Verstärker und die Batterie.

Lediglich mit der mikrofonseitigen Übertragungsqualität war man noch nicht zufrieden. Gegen Ende der 1960er-Jahre entstand auch das erste piezoelektrische Keramikmikrofon und 1972 das elektrostatische Elektret-Mikrofon, beide in Kleinstausführung speziell für Hörgeräte. Nur bei den Hörern blieb man weiterhin, wegen des hohen Wirkungsgrades, beim elektromagnetischen Wandler-System. Neben den zweipoligen Ausführungen gibt es nun auch Hörer mit drei Anschlüssen, und zwar für den Betrieb an Gegentakt-Endstufen.

Inzwischen ist man bei den HdO-Geräten davon abgekommen, den Schall vom Hörer zum Gehörgang per Hörschlauch zu leiten. Stattdessen verwendet man speziell geschaffene Einsteckhörer, die per Drahtleitung mit dem Gerät verbunden sind, siehe Bild 13. Auch bei der Elektronik hat sich im Laufe der Jahre vieles geändert. Die heutigen Hörgeräte enthalten eine digitale Elektronik, mit deren Hilfe jedes Gerät auf die individuelle Hörschädigung eingestellt werden kann, siehe Bild 14. Die Versorgungsmöglichkeiten von Personen mit Hörschäden sind heutzutage vielfältig. Dazu zählen – um nur eine Möglichkeit zu nennen – z. B. Cochlea-Implantate.

Zum Abschluss noch ein Blick auf die Art und Weise, wie das Ausmaß einer Hörbeeinträchtigung ermittelt wird. Grundsätzlich gibt es dazu mehrere Verfahren. Neben einigen speziellen Untersuchungsmethoden sind das im Wesentlichen die Tonaudiometrie und die Sprachaudiometrie. Das Bild 15 zeigt als Beispiel den Vordruck eines Tonaudiogramms. Darin werden die gemessenen Hörverlustwerte für die einzelnen Frequenzen eingetragen, ausgehend von der Nulllinie, die der normalen Hörschwelle entspricht, und zwar sowohl für Luftschall als auch für den Knochen-schall. Fallen beide Messkurven zusammen, so ist das ein klarer Hinweis auf eine Schädigung im Innenohr.

Ausblick

Im Nachgang zu dem Thema über unser Gehör befasst sich der nächste Beitrag mit dem persönlichen Schallschutz. Ein aus unserem modernen Leben – leider – nicht mehr wegzudenkender Begleiter ist der Lärm, sei es am Arbeitsplatz, im Straßenverkehr, in der Schule oder auch in der Freizeit. Für unser Gehör ist der Lärm der größte Feind. Und so wundert es nicht, dass es zum Schutz unseres Gehörs vor Lärm extra eine Richtlinie gibt, nämlich die VDI 2560 (seit 1983). Behandelt werden im nächsten Beitrag die geltenden Grenzwerte für eine Lärmbelastung unseres Gehörs, des Weiteren die damit zusammenhängenden Begriffe TTS und PTS. Ausgiebig wird auf die Mittel für den passiven Schallschutz eingegangen, angefangen von den Gehörschutzstöpseln bis hin zu den Gehörschutzhelmen. Es folgt danach ein sehr ausführlicher Teil über den aktiven Schallschutz mithilfe von Antischall. **ELV**

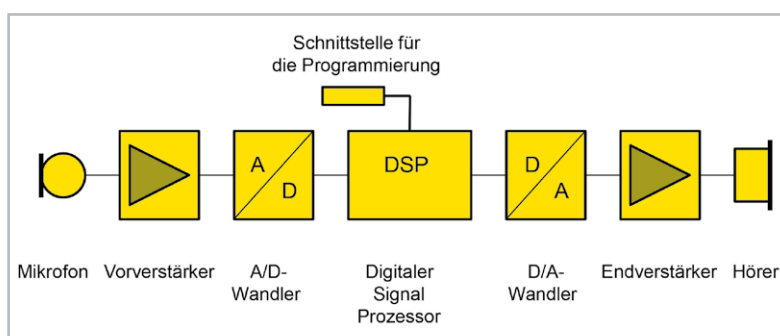


Bild 14: Stark vereinfachtes Blockschaltbild eines digitalen Hörgeräts. Der Hörer ist hier ebenfalls ein Einsteckhörer, der direkt im Gehörgang getragen wird.

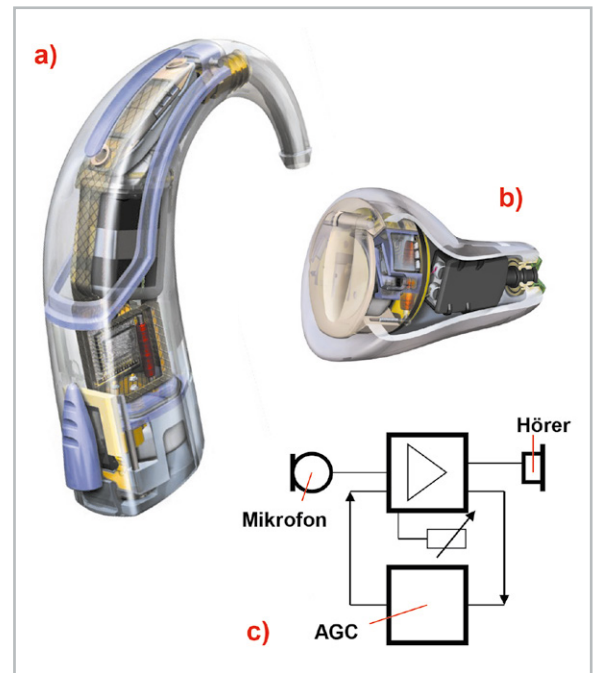


Bild 12: Ausführungsbeispiele von Hörgeräten in transparenten Gehäusen

- a) HdO-Gerät mit Richtmikrofon, erkennbar an den zwei Schalleintrittsöffnungen (oben), Mikrofon und Hörer gelagert in elastischen Neoprentaschen zur Vermeidung von Rückkopplungen
b) Im-Ohr Gerät
c) Blockschaltbild eines Standardhörgeräts mit AGC (automatic gain control) für Hörgeschädigte mit Recruitment, d. h. einer komprimierten Hörfläche: angehobene Hörschwelle und abgesenkte Schmerzempfindungsschwelle. Die Verstärkung wird automatisch dem Eingangspegel angepasst.



Bild 13: Zwei Beispiele für HdO-Hörgeräte mit Außenhörer

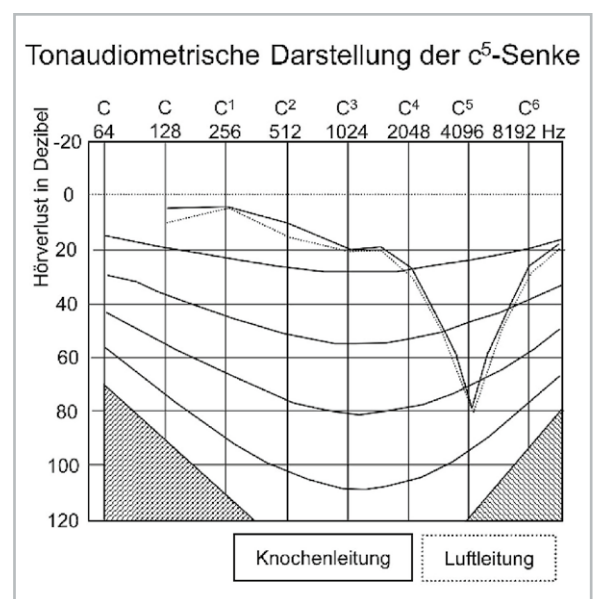


Bild 15: Vordruck für ein Tonaudiogramm. Die c^5 -Senke im Tonaudiogramm bei Luft- und Knochenleitung ist ein typisches Merkmal für eine Innenohrschädigung, z. B. durch Lärm.