

Wussten Sie schon, dass...

Von WILHELM HERZOG

... **unser Gehör** Frequenzen zwischen 16 und 20.000 Hertz wahrnehmen und etwa 400.000 Klangfarben unterscheiden kann?

... **wir unsere** eigene Stimme auch über die Kopfknochen hören? Deshalb empfinden wir sie als fremd, wenn wir sie vom Tonband hören.

... **das Trommelfell** auch Schwingungen weiterleitet, die nur ein Millionstel Millimeter ausmachen? Die Weiterleitung geschieht über drei winzige Knochen, die nach ihrem Aussehen Hammer, Amboss und Steigbügel genannt werden.

... **die Schwingungen** in der Cochlea, einem mit Flüssigkeit gefüllten Labyrinth (Schnecke), in hydraulische Schwingungen umgewandelt werden? Diese Schwingungen gelangen dann zum Cortischen Organ.

... **das Cortische Organ** unser eigentliches Hörorgan ist? Es besteht aus fast 50.000 Einzelteilen und wandelt wie ein Mikrofon die Druckwellen in elektrische Impulse um. Dabei helfen zwei Membranen, die sich um eine Winzigkeit (0,1nm = Atomdurchmesser) zueinander verschieben, wenn die hydraulischen Wellen auf sie treffen.

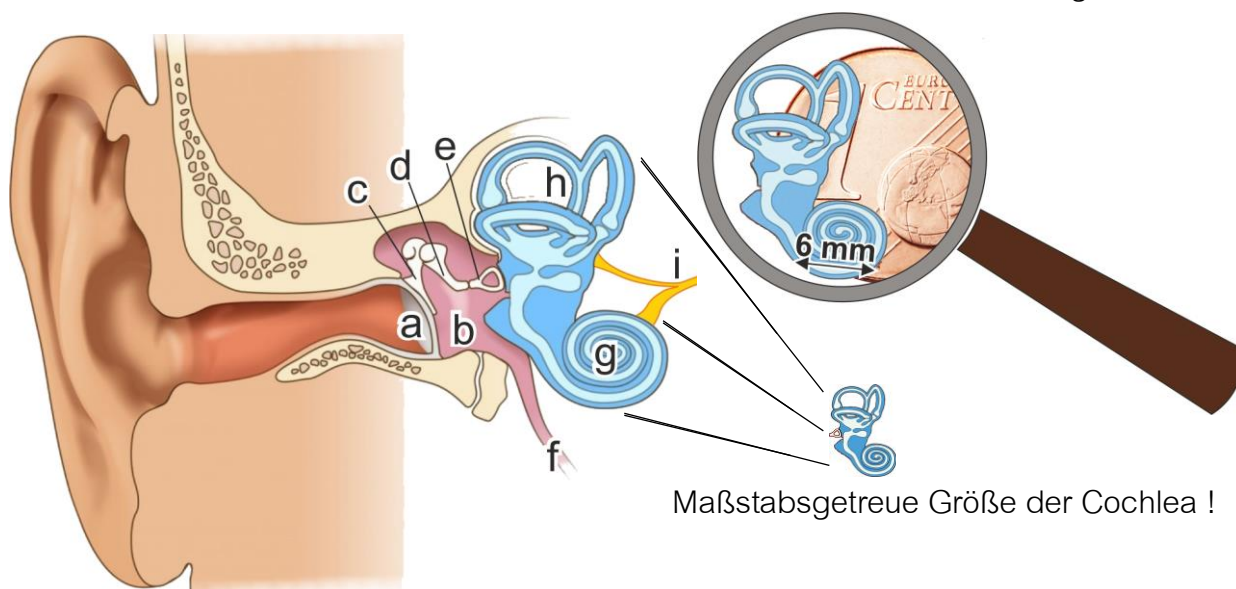
... **zwischen** diesen Membranen bis zu 20.000 winzige Härchen wachsen? Etwa 4.000 davon, die inneren Haarzellen, erzeugen codierte elektrische Impulse, wenn sie durch Verschiebung der Membranen bewegt werden. Diese Impulse verarbeitet das Hörzentrum im Gehirn zu Hörbildern. Die übrigen Härchen (äußere Haarzellen) haben die Aufgabe, die Impulse je nach Notwendigkeit zu verstärken.

... **erst das Hörzentrum** im Gehirn entscheidet, welche Geräusche wir tatsächlich wahrnehmen?

... **ein Gerät**, das das menschliche Gehör komplett ersetzen sollte, so groß wie ein Kühlschranks wäre?

... **die wahre Größe der Cochlea** im Durchmesser nur 6 mm beträgt. Das gesamte Innenohr samt Bogengängen fände auf einer 1-Cent Münze Platz. Die Hörschnecke passte somit in die kleine Weltkugel auf dieser Münze! Das Cortische Organ, welches Flüssigkeitsvibrationen in Nervenimpulse umwandelt, hat die Dicke eines Haars.

... **bereits im 3. Schwangerschaftsmonat** das gesamte Hörorgan im Mutterleib voll funktionsfähig arbeitet; d.h. ein Neugeborenes hat bereits 6 Monate gehört!



Innenohr: a. Trommelfell; b. Paukenhöhle; c. Hammer; d. Amboss; e. Steigbügel; f. Ohrtrumpete (Tube); g. Schnecke mit Cortischem Organ; h. Bogengänge (Gleichgewichtssinn); i. Gehörnerv (zum Gehirn)

Vom Gehör zum Gehirn: die Neurobiologie des Hörens

Eckhard Friauf, TU Kaiserslautern

Das Hören ist einer der wichtigsten Sinne des Menschen, und unser Gehör ist ein ganz besonderes Organ. Wie kein anderes Sinnessystem ermöglicht es uns die zwischenmenschliche Kommunikation, d.h. den Kontakt zu den Mitmenschen. Beim Ausfall des Gehörs erfolgt ein rascher Rückzug des Betroffenen aus der Gesellschaft der Sprechenden und Hörenden. Die taubstume und blinde Helen Keller formulierte die Brisanz eines ausgefallenen Gehörs einmal sehr treffend: „Blindheit isoliert von den Dingen, Taubheit dagegen von den Menschen“. Das Gehör, und dies gilt für Mensch und Tier, dient natürlich nicht nur der akustischen Kommunikation, sondern es ist auch wichtig für das Überleben des Individuums. Als Beispiel möchte ich den Dschungel nennen, ein Biotop voller Geräusche, die es zu interpretieren und zu erkennen gilt, will man auf Beute, Fressfeind und Artgenossen adäquat reagieren. Leben oder Tod stehen hier häufig zur Debatte.

Nun, wie funktioniert eigentlich das Hören? Unser Schulwissen erinnert uns, dass der Gehörapparat aus Außenohr, Mittelohr und Innenohr besteht. Außenohr und Mittelohr sind durch das Trommelfell getrennt, und im Mittelohr übernehmen drei winzige Knöchelchen, die kleinsten im ganzen Körper, die Übertragung des Schalls aus der luftgefüllten Außenwelt ins flüssigkeitsgefüllte Innenohr. Technisch spricht man bei diesem Prozess von einer Impedanzanpassung. Das schneckenhausförmige Innenohr, die Cochlea, ist Sitz des eigentlichen Hörorgans, Cortisches Organ genannt. Dort erfolgt die mechanoelektrische Transduktion, d.h. die Umformung der mechanischen Schallenergie in elektrische Nervenzellsignale. Im Cortischen Organ sitzen im linken wie im rechten Ohr jeweils ca. 16.000 kleine Haarzellen, die aufgrund ihrer haarförmigen Schöpfe so genannt werden. Die ‚Haare‘ (der Fachausdruck ist Stereozilien), etwa 100 pro Zelle, sind Ausstülpungen der Zellmembran und haben eine große Steifheit; sie sind deswegen eher borsten- oder sogar nadelartig als haarförmig. Die Haarzellen bilden eine innere und drei äußere Reihen und dieses Organisationsprinzip ist vom basalen Ende der Cochlea bis zu deren Spitze, dem Apex, verwirklicht.

Die inneren Haarzellen, also nur 4.000 Zellen pro Cochlea, sind die eigentlichen Sinneszellen, mit denen wir hören. Verglichen zu anderen Sinnessystemen ist diese Zahl verschwindend klein. In der Netzhaut unseres Auges haben wir beispielsweise 120 Millionen Sinneszellen. Wenn von diesen 4.000 ausfallen, so führt dies zu einem kaum merkbaren Sehverlust. Werden dagegen die 4.000 inneren Haarzellen in der Cochlea stark geschädigt, so führt dies zu vollständiger Taubheit des betroffenen Ohrs. Schädigungen des Stereozilien-Schopfes sind häufig, und sie werden durch lauten Lärm hervorgerufen, etwa in Diskotheken, aus wattstarken Walkman-Lautsprechern und in Form von Industrielärm. Wegen der aktuellen Lärmbelastung nimmt der Anteil der Schwerhörigen in unserer Gesellschaft drastisch zu und stellt mittlerweile ein sozioökonomisches Problem dar, das gelöst werden muss.

Das Innenohr ist also ein sehr delikater Apparat und alles andere als robust. Bezüglich der Messgenauigkeit kommen ihm Eigenschaften zu, die in der maschinellen Technik bislang unerreicht sind. Der Dynamikbereich, d.h. der Bereich der Schalldrucke, die wir erkennen und unterscheiden können, ist nahezu unvorstellbar groß. Am Hörschwellenbereich, wo wir die leisesten Töne gerade noch wahrnehmen können, haben die Schallschwingungen eine Intensität, die nur ein Milliardstel (10^{-9}) des atmosphärischen Luftdrucks beträgt. Am oberen Ende des Hörbereichs, wenn die Schallenergie so groß geworden ist, dass die Schmerzschwelle erreicht wird und Hören in Schmerzempfinden übergeht, ist die Intensität 10.000.000.000-fach (10^{13} -fach) größer. Ein Vergleich des Hörorgans mit einer Waage sieht demnach so aus: eine und dieselbe Waage wäre in der Lage, Gewichte von 1 mg bis zu 1 Tonne zu erkennen. Zur Veranschaulichung: eine junge Bienenmade wiegt ca. 1 mg, ein ausgewachsener Stier ca. 1 Tonne. Eine solche Waage hat die Technik bisher noch nicht entwickelt.

Die Stereozilien der Haarzellen spielen beim Hörvorgang eine entscheidende Rolle. Sie werden durch die ins Innenohr übertragenen Schallschwingungen rhythmisch ausgelenkt. Wie kleine Stäbe bewegen sich die Stereozilien um ein Drehgelenk, über welches sie mit dem Zellkörper der Haarzelle verbunden sind. Die Auslenkung ist dabei winzig klein: bei der Hörschwelle bewegen sich die Stereozilien nur um 0.003° , an ihren oberen Spitzen entspricht das einer Amplitude von 0,1 nm und somit weniger als dem Durchmesser eines Wasserstoffatoms. Übertragen auf den 312 m hohen Eiffelturm bedeutet dies, dass seine Spitze um 1 Daumenbreite (2 cm) ausgelenkt würde (allein durch den Wind schwankt dessen Spitze jedoch schon um ein Vielfaches davon). Eine weitere Erhöhung der Sensitivität im Innenohr ist aus physikalischen Gründen nicht möglich, da wir sonst die Brown'sche Molekularbewegung und so das thermische Rauschen hören könnten. Die Natur hat während der Evolution hinsichtlich der Empfindlichkeit also einen optimalen Apparat erschaffen, der nicht weiter verbessert werden kann.

Die Äußeren Haarzellen haben eine wichtige Funktion beim Hörvorgang im Hörschwellenbereich. Sie können aktiv ihre Länge verändern und pumpen dadurch Energie in den Transduktionsprozess. Die Längenveränderung erfolgt nicht so wie in den Muskelzellen, sondern sie ist wesentlich schneller und arbeitet nach einem völlig anderen Prinzip. Ein kürzlich entdecktes Protein, wegen seiner Schnelligkeit ‚Prestin‘ benannt, scheint an der Längenveränderung mitzuwirken. Der hohen Sensitivität des Hörorgans liegt also ein aktiver Verstärkungsmechanismus zugrunde, der bei lauten Signalen abgeschaltet wird und so einen von mehreren Schutzmechanismen bildet, der das Innenohr vor schädigender Übererregung bewahrt.

Unser Hörvorgang ist bei weitem nicht auf die Prozesse im Innenohr beschränkt. Erst in der zentralen Hörbahn im Gehirn werden Leistungen möglich, die durch die Peripherie nicht erreicht werden können. Eine davon ist die Möglichkeit der Schall-Lokalisation. Darunter versteht man das Erkennen der Richtung, aus der der Schall kommt. Unser Gehirn vergleicht dazu Zeit- und Pegelunterschiede, die im Schall zwischen beiden Ohren auftreten. Die mit dieser Aufgabe betrauten neuronalen Strukturen liegen im Hirnstamm und sind phylogenetisch sehr alt. Anatomisch wurden sie als „Superiorer Olivenkomplex“ identifiziert. In ihm erfolgen Verarbeitungsschritte, die das exakte Eintreffen von Eingängen aus beiden Ohren erfordern. Zeitverarbeitung im Mikrosekundenbereich sowie das Zusammenspiel verschiedener Transmittersysteme sind hierfür unbedingte Voraussetzungen.

Die Signalverarbeitung von komplexen Signalen, z.B. von Sprachinhalten, erfolgt auf höchster Ebene in der Hörbahn, nämlich in den Hirnrindenarealen des Großhirns, dem Neocortex. Hierzu gehört auch das Erkennen prosodischer Inhalte. Die Prosodie bezeichnet die Silbenbetonung und die Sprechmelodie. An folgendem Beispiel sollen prosodische Unterschiede veranschaulicht werden: DER MINISTER GENEHMIGT DEM PROFESSOR ZU SCHREIBEN. Je nachdem, wo der sprechmelodische Akzent gesetzt wird, wird der Professor schreiben dürfen oder ein Schreiben erhalten (‚Der Minister genehmigt dem Professor, zu schreiben‘ bzw. ‚Der Minister genehmigt, dem Professor zu schreiben‘). Die kleine Pause von wenigen Millisekunden macht den großen Unterschied. Und unsere kleinen grauen Zellen haben die nicht triviale Aufgabe, sie zu erkennen.

Im Vortrag zur Verleihung des Akademie-Preises wurden noch weitere Aspekte des Hörens behandelt, z.B. der Frequenzbereich von mehr als 10 Oktaven, der Cocktailparty-Effekt und die Semantik. Aus Platzgründen muss in dieser Zusammenfassung auf die Darstellung dieser Aspekte verzichtet werden. Hoffentlich ist das nicht un-erhört!