

Hören und Sehen – eine Gedankensammlung

Wer wissen will, was am Hören so besonders ist, schaut sich am besten zuerst das Sehen an. Denn beide Sinne unterscheiden sich fundamental.

Sehen – die Menge macht's.

Jedes Auge enthält rund 120 Mio. Stäbchen zum Hell-Dunkel-Sehen und 6 Mio. Zapfen zum Farbsehen. Hinter diesen Fotorezeptoren liegt in der nur wenige Zehntel Millimeter dünnen Netzhaut (Retina) eine Schicht von 2 Mio. retinalen Schaltzellen, welche bereits eine erste Vorverarbeitung und Konzentration des „Gesehenen“ vornehmen. Je 120 Stäbchen werden auf eine Ganglienzelle (Nervenzelle) geschaltet. Bei den Zapfen sind es jeweils 6. Darüber hinaus werden z. B. Kontrastgrenzen (in Helligkeit und Farbe) herausgearbeitet, Bewegtes gegenüber Unbewegtem hervorgehoben, die Auflösung am Bildrand gegenüber der in der Bildmitte reduziert usw. Aus dem Auge heraus führen schließlich nur 1,2 Mio. Nervenfasern der Ganglienzellen, die den Sehnerv bilden. Das heißt, dass bereits im Auge eine Reduktion der Informationsflut im Verhältnis ~100:1 durchgeführt wird.

Die Sehnerven beider Augen kreuzen sich wenige cm hinter dem Auge im Chiasma opticum. Dort verzweigt jeweils die Hälfte der Nervenfasern auf die andere Seite. Es folgt das Corpus geniculatum laterale. Hier werden je 10 Nervenimpulse, die vom Auge kommen, auf 4 abgehende reduziert. Ab hier werden auch Bewegungsinformationen (Magnokanal) getrennt von Farbe, Form und "Tiefe"/Stereosehen (Parvokanal) weitergeleitet. Schließlich treffen die Fasern der Sehnerven in der primären Sehrinde (primärer visueller Cortex) auf rund 200 Mio. Cortex-Neurone, welche den Seheindruck zur eigentlichen Seh-, „Wahrnehmung“ weiterverarbeiten.

Die Netzhaut im Auge besitzt eine Region für besonders scharfes Sehen, die Fovea. Diese hat nur 1,5 mm (0,5 mm) Durchmesser. Hier liegen ausschließlich Zapfen besonders dicht beieinander. Und hier liegt das Verhältnis von Zapfen zu Ganglienzellen fast bei 1:1. Diese Sonderstellung der Fovea zeigt sich auch im Gehirn. Dort nehmen die von der Fovea kommenden Reize vier Fünftel des primären visuellen Cortex in Anspruch.

Informationen hauptsächlich aus <http://dasgehirn.info/wahrnehmen/sehen/>

Noch ein kleiner Hinweis zum Schluss: Die Fotorezeptoren in unseren Augen sind empfindlich für Licht von ca. 380-780 (360-720) nm Wellenlänge. Das entspricht etwa einer Oktave.

Hören – jeder fängt klein an

Unser Ohr hört mit Haarzellen, die im Innenohr entlang der Basilarmembran in der Hörschnecke (Cochlea) aufgereiht sind. In jedem Ohr hat der Mensch ca. 20.000 Haarzellen auf der Außenseite der Basilarmembran und ca. 3600 auf der Innenseite. Nur die inneren 3600 Haarzellen sind reine Sinneszellen, die ausschließlich Hörreize **zum** Gehirn schicken. Die 20.000 äußeren Haarzellen sind in erster Linie **vom** Gehirn gesteuerte Muskelzellen, welche das Schwingungsverhalten der Basilarmembran beeinflussen. Dadurch sorgen sie für klarer abgegrenzte Schwingungsmuster auf der Basilarmembran und steuern die Lautstärkedynamik.

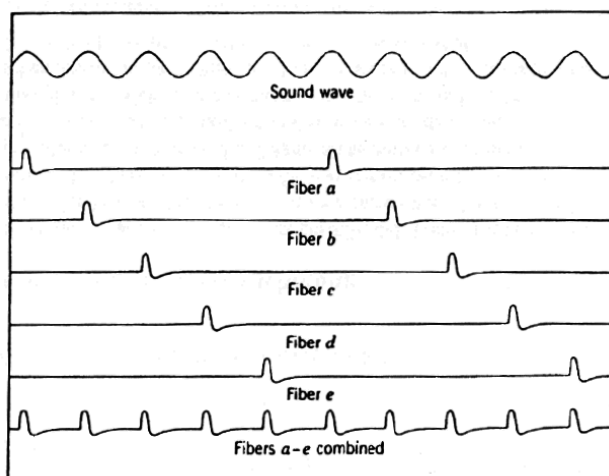
Die Nervenfasern der Haarzellen verlassen die Cochlea über den Hörnerv. Dieser besteht aus ca. 30.000 Fasern. 1800 davon leiten vom Gehirn **zum** Ohr, der Rest **vom** Ohr zum Hirn. Das bedeutet, dass die einzelne Sinneszelle bereits im Ohr mit 10-15 weiterführenden Nervenzellen verschaltet wird.

Über verschiedene Zwischenstationen, von denen teilweise noch die Rede sein wird, wird der Sehnerv in der Großhirnrinde auf den auditorischen Cortex weitergeleitet. Dieser besteht beim Menschenaffen aus rund 10 Mio. Zellen - beim Menschen sicher noch mehr.

Das heißt im Vergleich: Unser Ohr muss mit einem Zwanzigtausendstel der Sinneszellen auskommen, die dem Auge zur Verfügung stehen. Und während sich im Sehnerv die Information von 100 Sinneszellen auf eine Faser konzentriert, fächert sich im Hörnerv die Information einer Sinneszelle auf mindestens 10 Fasern auf. Im auditorischen Cortex schließlich „bedient“ jede Faser des Hörnervs mindestens doppelt so viele Zellen wie jede Faser des Sehnervs.

Betrachten wir noch ein paar Aspekte der Neurologie des Hörens in Bezug auf Geschwindigkeit und Auflösung:

1.) Auf der Basilarmembran sind die Haarzellen entlang einer Frequenzskala aufgereiht. Jede Haarzelle(ngruppe) repräsentiert einen bestimmten Frequenzbereich. Ein einzelner Impuls dieser Haarzelle X signalisiert also: „Ich höre gerade die Frequenz xxx.“ Dieser Impuls stellt aber keinen Ton dar. Deshalb versuchen die Haarzellen gleichzeitig, einen „echten“ Wellenzug der Frequenz xxx wiederzugeben, indem sie xxx mal in der Sekunde einen Impuls abgeben (feuern). Das funktioniert nur bis zu einer gewissen Frequenz. Denn nach jedem Impuls muss sich die Zelle kurz regenerieren. Deshalb kann sie maximal 500-800 Impulse pro Sekunde erzeugen – also maximal 800 Hz. Wenn das nicht ausreicht, können benachbarte Haarzellen noch phasenversetzt mitfeuern:



Die Anzahl der mitfeuernden Nachbarzellen ist auf wenige beschränkt. Deshalb können nur Frequenzen bis ca. 1,6 kHz echt nachgebildet werden. Darüber hinaus wird nur noch die Hüllkurve gehört.

2.) Wenn Nervenzellen eine höhere Intensität signalisieren sollen, steigern sie dafür meist ihre Feuerungsrate. Das ist beim Hörsinn nicht möglich, da die Feuerungsrate für die Frequenz reserviert ist. Bei steigendem Schalldruck einer Frequenz feuern deshalb immer mehr naheliegende Haarzellen mit. Parallel dazu haben die Haarzellen unterschiedliche Reizschwellen. Manche feuern überhaupt erst bei höheren Schalldrücken. Das führt dazu, dass mit steigender Lautstärke die Frequenzauflösung sinkt.

3.) Die Basilarmembran in der Hörschnecke ist ca. 34 mm lang. Jeder Klang durchwandert sie von vorn nach hinten mit einer Geschwindigkeit von durchschnittlich 10 m/s.

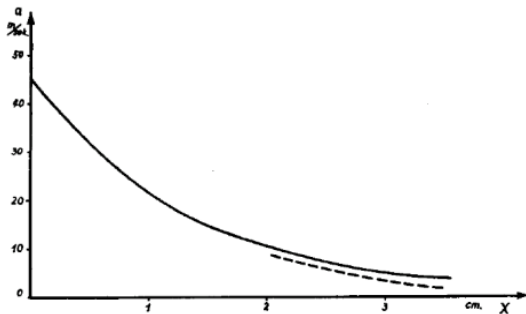
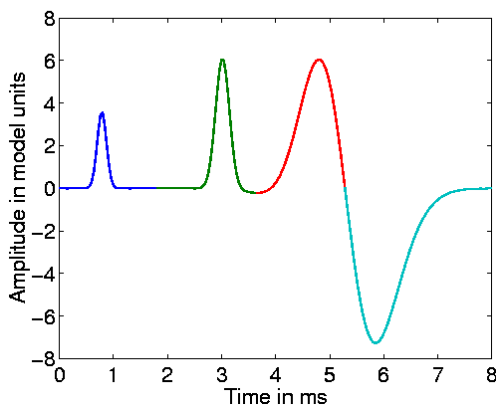


Abb. 18. Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen an der Basilarmembran in Funktion der Entfernung vom ovalen Fenster für die Frequenz 1000 Hz. a = Fortpflanzungsgeschwindigkeit einzelner Wellen, v = einer Wellengruppe (gestrichelt).

Die höchsten Frequenzen werden am Anfang registriert, die niedrigsten am Ende. Je steiler ein Sprung oder Impuls ist, desto höhere und tiefere Frequenzen müssen in ihm enthalten sein. Um einen Dirac-Sprung zu registrieren, müssen deshalb die vollen 34 mm durchlaufen werden. Das entspricht etwa 3,4 ms.

Natürlich darf man davon ausgehen, dass diese Zeitdifferenz an irgendeiner Stelle im Gehirn wieder ausgeglichen wird. Dennoch erscheint es unwahrscheinlich, dass dabei ein Dirac-Sprung von wenigen μ s wieder hergestellt wird.

4.) Auf dem Weg in den auditorischen Cortex durchlaufen die Hörsignale mehrere Verarbeitungsstufen. Dabei besteht die Tendenz, scharfe Einzelsignale (Impuls, Knack, Klick) deutlich zu vergrößern:

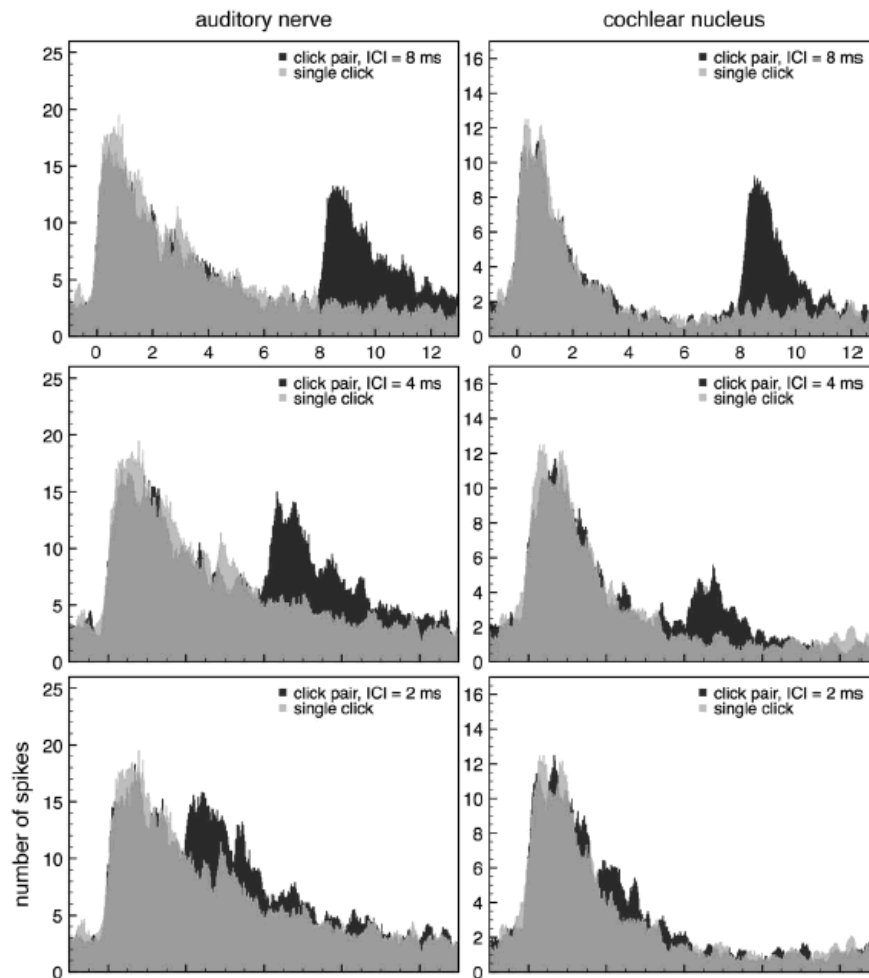


Blau ist ein Impuls beim Austritt aus der Cochlea, grün im darauf folgenden Nucleus cochlearis, rot in der oberen Olive und türkis im Colliculus interior (schematische Darstellung).

<http://www.neuro.uni-bremen.de/~langeoog02/Vortrag/ThorstenD/vortrag.ppt> Folie 24

5.) Die folgende Abbildung zeigt Messungen eines Einzelklicks (grau) bzw. eines Doppelklicks (schwarz) im Frequenzbereich 1790 Hz bis 16 kHz. Links Messungen am Hörnerv beim Austritt aus der Cochlea und rechts nach der „Bearbeitung“ im Nucleus cochlearis. Der Doppelklick hat in den

oberen Diagrammen einen Abstand von 8 ms, in der Mitte von 4 ms und unten von 2 ms. Der erste Doppelklick verbirgt sich jeweils hinter dem Einzelklick.



Man sieht deutlich, wie der „Nachhall“ des Klicks im Nucleus cochlearis weitgehend abgeschnitten wird. Grund dafür ist die Regenerationszeit der beteiligten Neuronen, die ein erneutes Feuern erst nach mindestens 2 ms erlaubt. Das führt dazu, dass der zweite Klick mit einem Abstand von 2 ms vom ersten Klick fast völlig unterdrückt wird.

http://www.researchgate.net/publication/5941690_Modeling_the_cochlear_nucleus_a_site_for_monaural_echo_suppression

Die Beispiele 4.) und 5.) zeigen, wie freizügig unser Gehör mit dem „Timing“ und „Shaping“ von Impulsen verfährt. Das Gehör ist überhaupt nicht auf eine möglichst exakte Nachbildung von Anstiegs- oder Nachhallflanken vorbereitet. Es soll vor allem kleine signifikante Einzelgeräusche aus einem Rausch- oder Hallteppich hervorheben, um frühzeitig unsere Aufmerksamkeit zu wecken.

An welcher Stelle exaktes Timing wichtig ist und auch geleistet wird, zeigt das letzte Beispiel:

6.) Die bei weitem zeitschärfste Messung des Hörsinns erfolgt interaural. Das Gehör trennt noch Schallquellen aus seitlichen Einfallsrichtungen voneinander, die sich lediglich um 5° Abstand unterscheiden. Bei Schalleinfall von vorne liegt die Auflösung sogar bei nur etwa 1°. Dabei werden Laufzeitunterschiede zwischen den beiden Ohren gemessen, die nur etwa 10 µs betragen. Wie bewerkstelligt unser Gehirn eine solch hohe Zeitauflösung und was für ein neuronaler Mechanismus steckt dahinter?

Längere Zeit wurde hierfür ein „Koinzidenz-Detektor“ angenommen, in dem spezifische Neuronen feuern, wenn sie der Schall gleichzeitig von beiden Ohren erreicht - wobei die externen interauralen Laufzeitunterschiede (ITD) durch interne neuronale Laufzeitdifferenzen exakt kompensiert werden.

Mittlerweile erscheint es wahrscheinlicher, dass die ITD durch frequenz- und phasenselektive Neuronengruppen in der oberen Olive ausgewertet wird. Dort treffen erstmals die Nervenbahnen beider Ohren aufeinander. Während die einzelnen Neuronen höchstens bis 1,6 kHz empfindlich sind und ihre Feuerrate 150 Hz nicht übersteigt, agieren die Neuronen der jeweiligen Seite so miteinander, dass ihre Differenz eine Unterscheidung bis herunter zu 10 μ s erlaubt.

<http://www.ploscompbiol.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pcbi.1002013>

Auch hier ein kleiner Hinweis zum Schluss: Die Haarzellen in unseren Ohren registrieren Schall von ca. 20-20.000 Hz. Das entspricht etwa zehn Oktaven.

Fazit

Die obige Aufstellung beschreibt bei weitem nicht alle Mechanismen und Stufen der jeweiligen Sensorik und Wahrnehmung von Seh- und Hörsinn. Es geht lediglich darum, einige grundsätzliche Unterschiede in Quantität und Qualität herauszuarbeiten.

Erkennbar wird, wie sich das Ohr aus relativ wenigen und relativ diffusen Sinnesreizen einen Eindruck zusammendichten, oder besser -phantasieren muss. Hilfreich ist dabei natürlich eine große Hörerfahrung. Diese kann aber nicht verhindern, dass das einzelne Ohr eine zeitliche Auflösung unter 1 ms kaum schafft. Es fehlt dem Hören ja auch jede Art von Extraschärfe oder Fokussierbarkeit, wie sie die Fovea für das Sehen bietet.

Mittlerweile haben unsere akustischen Messmöglichkeiten von Frequenz, Lautstärke und Zeitintervallen eine Präzision erreicht, die von unserem Hörsystem fast nirgendwo erreicht wird. Das täuscht im Umkehrschluss vielen eine Hörpräzision vor, die von unserer Biologie gar nicht geleistet werden kann. Daran sollte sich jeder erinnern, der meint, mit seinem Gehör die Grenzen aktueller Messtechniken bereits hinter sich gelassen zu haben.