

Neues zu Hörphänomenen und -mechanismen

Eckard Blumschein, Magdeburg

blumschein@et.uni-magdeburg.de

<http://home.arcor.de/eckard.blumschein>

Es kommt weiterhin vor, dass Akustik und Physiologie dem zu widersprechen scheinen was wir tatsächlich hören. Nicht nur die Mechanismen subjektiven Hörens sind unzureichend erforscht und werden deshalb hier erneut unter Aspekten betrachtet, die einer naturwissenschaftlichen Klärung durch kritische Vergleiche von fremden Arbeiten zugänglich sind. Auch etablierter Auffassungen zu Grundfragen des Hörens haben sich in Diskussionen von Beobachtungen und neuen Ideen als zweifelhaft erwiesen.

1 Mikrowellen-Hören und „Knochenleitung“

Elektromagnetische Hochfrequenzimpulse schlagen bei der TMS [1], beim Meteoriteneinschlag und weniger hart bei Blitzen auf unser Gehirn. Auch Radar- und anderen steilen Impulsen sind wir alle in zunehmendem Maße ausgesetzt. Sie können der von Alan Frey bestimmten Hörschwelle (80 mW/cm^2) nahe kommen und stehen in Verdacht ein Auslöser für das Brumm-Phänomen [2] zu sein. Man stellt sich vor, dass in der cerebrospinalen Flüssigkeit (CSF) ein freilich äußerst schwacher Druckstoß entsteht. Neu sind zwei Erkenntnisse: Erstens wird der Druckimpuls überwiegend nicht vom Knochen übertragen sondern von zwei Aquädukten [3]. Zweitens gelangt die Druckwelle dabei unterschiedlich verzögert [4] an Ober- und Unterseite der Basilarmembran (BM). Die Endolymphe koppelt den Druck über das endolymphatische Säckchen und das vestibuläre Aquädukt in die Scala media. Die Perilymphe im meist nur 0,05 bis 0,5 mm weiten cochlearen Aquädukt verbindet die CSF direkt mit den anderen Seiten von BM und Reissner's Membran. Die Differenz der Verzögerungen mag erklären warum der Frey-Effekt von der Steilheit der Impulse abhängt und nur wenig von ihrer Dauer. Reissner's Membran ist sehr nachgiebig. Dementsprechend setzt das Mikrowellen-Hören intakte Haarzellen im Bereich hoher Best-Frequenzen voraus und man hat den Höreindruck als untypisch für die Signalform geschildert. Das „Brummen“ ohne akustische Ursache beruht jedoch nicht direkt auf dem Mikrowellen-Hören.

2 Neues zu Brumm-Illusion und Tinnitus

Die Interessengemeinschaft zur Aufklärung des Brummtons (www.igzab.de) hat auch bei Infraschallmessungen kein Signal gefunden, welches zu den Brumm-Wahrnehmung passt. Sie hat versucht mit einem Hum-Simulator die Frequenz des Brummens zu bestimmen. Anzeichen für eine unmittelbare physikalische Ursache wurden nicht gefunden. Alles spricht dafür, dass das Brummen eine im Gehirn manifeste Illusion ist, die eventuell von äußeren Reizen ausgelöst wird. Welche Rolle ein individuelles Nachbrummen dabei spielt, ist noch nicht geklärt. Immerhin lässt sich die Brumm-Illusion gut vom Tinnitus abgrenzen. Sie reagiert auf viele Einflüsse umgekehrt. Während eine Erkältung den Tinnitus verschlimmert, vertreibt sie das Brummen. Gewisse Bewegungen oder Haltungen von Kopf und Hals verstärken den Tinnitus, lassen aber das Brummen kurzzeitig verstummen. Man schreibt solche Effekte zwar Kopplungen zwischen parallel laufenden Nerven aus den Muskeln mit Nerven aus dem Innenohr zu, sei es schon im nucleus cochlearis [5], im IC oder erst im Großhirn. Im Selbstversuch hat der Autor jedoch ein Indiz dafür gefunden, dass die Hörbarkeit schneller Bewegungen des Kopfs auch mit der Trägheit der Flüssigkeit im Innenohr zu tun haben mag. Wenn er den Kopf ruckartig bejahend nickt oder verneinend schüttelt, dann hört er erwartungsgemäß nichts, denn dann stimmt die Drehachse nicht mit der Achse der Hörschnecke überein. Bei schneller Winkelbeschleunigung in der dritten Achse hört er einen hohen Ton im rechten Ohr während der Kipp-Beschleunigung nach rechts unten oder auch etwas stärker beim Abbremsen des Kippens nach links. Möglicherweise biegt dabei die Trägheit der Perilymphe das runde Fenster des rechten Innenohrs nach innen. Während die mechanischen Reize oder auch Schall das Brummen sofort vorübergehend verdrängen, wirkt sich ein Ortswechsel

speziell im Urlaub wenn überhaupt gewöhnlich erst um Stunden oder gar Tage verzögert aus. Die Betroffenen stimmen darin überein, dass sie ein unruhiges Brummen unter 100 Hz hören. Dies wirft die Frage auf, inwieweit unsere Modellvorstellungen vom Hören bei so niedriger Frequenz überhaupt noch gelten.

3 Zum Hören unter 100 Hz

Audiogramme Betroffener zeigt www.lfu.baden-wuerttemberg.de/lfu/abt3/brummtton/ergebnis.html. Die für 23 Frequenzen von 600 bis herab zu 25 Hz gemessene Hörschwelle gleicht dem normalen Bild. Sie verläuft nur bis etwa 100 Hz zackig und steigt dann glatt an. Vermutlich hat der Mensch nur wenige oder gar keine äußeren Haarzellen mit Bestfrequenzen unter 100 Hz. Otoakustische Emissionen wären dort also nicht möglich. Am Ende der Cochlea nimmt die Breite der Basilarmembran wieder ab. Je tiefer die Frequenz des Schalls unter der tiefsten Bestfrequenz liegt, desto höhere Schallpegel sind nötig um einige innere Haarzellen zu stimulieren. Diese Vorstellung wird gestützt durch Messungen zum „peak splitting“ [6] bei Katzen. Maximal hat Cai etwa 4 ms Latenz gemessen. 30 Hz entsprechen 33 ms. Die Begrenztheit der Bestfrequenzen lässt tatsächliche Frequenz-Zeit-Muster [7] im Hörnerv stark vom auch für tiefere Frequenz berechneten Cochleagramm [8] abweichen. Naidu und Mountain [9] verweisen auf die Diskrepanz zwischen dem weiten Bereich hörbarer Frequenzen und der sich weniger ändernden Steifigkeit der BM. Musiker spielen im tiefen Bassregister, wo eine Frequenzgruppe (critical bandwidth CB) breiter als eine große Terz ist, keine Terzen mehr [10]. Grob formuliert entfällt unter 100 Hz die spektrale Auflösung. Statt dessen nimmt man, wie die von Warren [11] aufgezeigte Verdopplung der scheinbaren Frequenz zeigt, die zeitliche Struktur (Modulation) des Signals wahr. Der Dynamikbereich schrumpft.

4 Die stehenden Wanderwellen

Unlängst haben Experten die Korrektheit von Messungen [12] bezweifelt, die auf der Basilarmembran (BM) eine „stehende“ Wanderwelle zeigen. Gemäß dem mechanischen Modell von Lighthill sollte diese Wanderwelle stark asymmetrisch sein, etwa so wie die Tuning-Kurven. Tatsächlich hat sie nur etwa die Breite einer Frequenzgruppe, und sie ist ziemlich symmetrisch. Diese Diskrepanz überrascht all jene nicht, welche schon lange davon überzeugt sind, dass Wanderwellen auf der BM nicht darauf beruhen dass sie akustische Energie von der Basis zur Spitze der Cochlea transportieren sondern andere Mechanismen als Epiphänomen begleiten. Nahe der Hörschwelle, also bei geringem Schallpegel, bewirken elektrisch aufgeladene äußere Haarzellen das Hören. Die akustische Energie würde gar nicht ausreichen um die BM zu bewegen. Der Zusammenhang zwischen Latenz und Bestfrequenz entspricht generell dem für lokale Resonanz zu erwartenden, unabhängig von mechanischen Besonderheiten. Offensichtlich versagt das Modells von Lighthill in Fällen einer akustischen Fovea. Ohne dass es die entscheidende Funktion der äußeren Haarzellen einbezieht ist dieses passive Modell an einige psychoakustische Daten viel zu gut angepasst um glaubhaft zu sein. Lokaler Resonanz gilt zwar ebenfalls als verworfen, da sie die Phasenakkumulation nicht sofort erklärt. Sie scheint aber mit den „stehenden“ Wanderwellen vereinbar zu sein. Während die Hüllkurve einer normalen Wanderwelle wandert, steht sie bei einer stehenden Wanderwelle im Raum still. Anders als bei der uns vertrauteren stehenden Welle wandern jedoch in der fixierten Hülle immer neue Wellen in eine Richtung. Praktisch bedeutsam ist die Schmalheit der Hüllkurve. In unserem Innenohr mögen theoretisch etwa 30 stehende Wanderwellen verschiebbar neben einander Platz haben. Strittig ist, was die Wellen antreibt und wie sie sich in radialer Richtung so bewegen, dass die Kopplung von den äußeren zu den inneren Haarzellen erfolgt. Bisher nimmt man

an dass sich die BM wie ein starrer Hebel um die Pfeilerzellen herum dreht. Bell [13] stellt sich Oberflächen-Wellen auf der Tectorialmembran (TM) vor. Der Autor schließt nicht aus, dass die stehende Welle auch in radialer Richtung wandert und zwar auf der TM so von innen nach außen, dass die Wellenfront auf der äußersten Reihe der äußeren Haarzellen am wenigsten weit in der bezüglich Schnecke tangentialen Richtung fortgeschritten ist. Anders als Vögel haben Säuger ihre Fasern hoher Spontanrate auf der abneuralen Seite der inneren Haarzellen [14].

Für die in Bild 1 skizzierte Wellenfront sprechen die um etwa 15 Grad zur Basis hin geneigte „Blickrichtung“ der w-förmigen Haar-Bündel, die entlang der angenommenen Wellenfront verlaufenden afferenten Anschlüsse an die äußeren Haarzellen und die Resonanz der TM bei einer Frequenz ungefähr eine halbe Oktave unterhalb der Bestfrequenz [15]. Wahrscheinlich ist bei geringem Schallpegel die Bewegung der BM erst eine Folge stets spontan vorhandener und sich lediglich in die eine oder andere Richtung orientierender Aktivität der äußeren Haarzellen. Zur Komponente der Bewegung in tangentialer Richtung tragen in den beiden äußeren OHC-Reihen entsprechende Verbindungen von den Deiters'schen Zellen zu nachfolgenden äußeren Haarzellen bei.

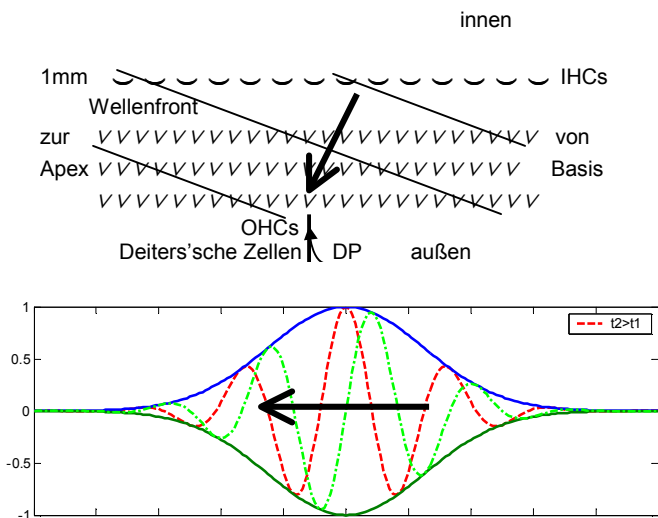


Bild 1 Stehende Wanderwelle

5 Realistische Spektrogramme

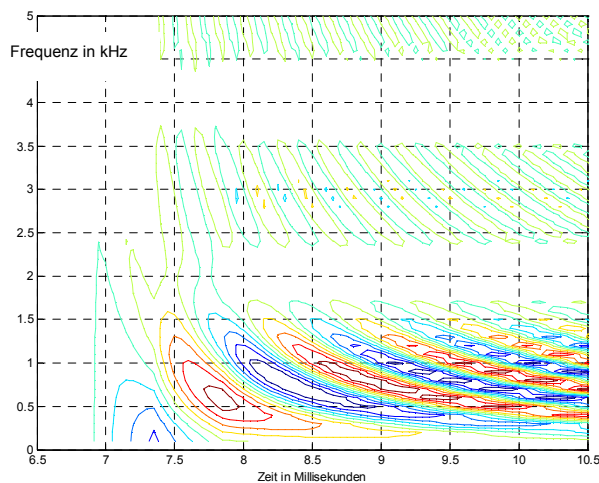


Bild 3 Kausales Spektrogramm eines Dipulses [16]

Gewöhnliche Spektrogramme zeigen bei breitbandiger Einstellung (Bild 2 links) senkrechte, bei schmalbandiger Einstellung (rechts) waagerechte Linien. Übliche Wavelets und Correlogramme sind ebenfalls akausal und damit auf den ersten Blick unrealistisch. Das in Bild 3 gezeigte kausale Spektrogramm erinnert dagegen stark an die im Hörnerv gemessenen Muster [7]. Eine ähnliche

Vorstellung vom epiphänomenal raumzeitlichen Wandern der Antwort auf Schallimpulse hatten auch schon die auf Gammaton-Filter-Modellen basierenden Cochleagramme vermittelt [8]

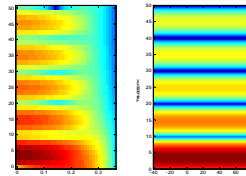


Bild 2

Übliche Spektrogramme des auch in Bild 3 analysierten Dipulses. Matlab-Einstellungen WINDOW = NFFT = 64 (links) bzw. 4096 (rechts). Signale erscheinen schon vor den Sprungzeitpunkten.

6 „Rücktransformation“ im Gehirn?

Radar- und Sonartechnik verwenden zur Ortung ein einfaches Verfahren. Auf ein frequenzmoduliertes Signal wird die Fourier-Transformation bzw. FCT [15] hin und zurück angewandt. Beides zusammen entspricht der Autokorrelation genannten Faltung des Signals mit sich selbst. Beim Hören erfolgt nur die erste Frequenzanalyse im Ohr. Gewissermaßen als Spektrum des Spektrums, finden dann Neuronen im Gehirn durch zeitliche Koinzidenz am Ort resultierender Autokorrelation die Tonhöhe. Vorbereitet wird die neuronale Spektralanalyse vermutlich durch multipolare Zellen im ventralen nucleus cochlearis. Deren Chopperfrequenz ist viel niedriger als die Signalfrequenz, so dass sie ins Gehirn übertragen und dort erkannt werden kann. Während die Wanderwellen mit nur je einer einzigen Frequenz auf der Stelle „rollen“, überstreicht jede Frequenzgruppe im Gehirn wieder ein Frequenzband. Die zeitliche Zweitkodierung der Tonotopie erklärt, warum es sowohl für eine spektrale als auch für eine zeitliche Signalverarbeitung im Gehirn überzeugende psychoakustische Beweise gibt.

Literatur

- [1] Ch. Plewna, M. Bartels, Ch. Gerloff: Transient suppression of tinnitus by transcranial magnetic stimulation. *Ann. Neurol.* **53**(2003) 263-266.
- [2] E. Blumschein: Prävention subjektiver Störgeräusche. DAGA 2002 Bochum.
- [3] Sh. Freeman et al.: Bone conduction experiments in animals – evidence for a non-osseous mechanism. + H. Sohmer et al.: Bone conduction experiments in humans - a fluid pathway from bone to ear. *Hearing Research* **146** (2000) 1-2, 72-80 + 81-88.
- [4] A. Ernst et al.: Intracranial and Intralabyrinthine Fluids. Berlin: Springer-Verlag 1996, Beitrag von Carlborg et al., Seiten 63-72.
- [5] R.A. Levine: Somatic (cranio-cervical) tinnitus and the dorsal cochlear nucleus hypothesis. *Am J Otolarynol* **20** (2000) 351-362.
- [6] Y. Cai, C.D. Geisler: Temporal patterns of the responses of auditory-nerve fibers to low-frequency tones. *Hearing Research* **96** (1996) 83-93.
- [7] S.A. Shamma: The representation of speech sounds in the response of the auditory nerve. *JASA* **78** (1985) 1612-1621.
- [8] R.D. Patterson et al.: Time-domain modeling of peripheral auditory processing: modular architecture and software platform. *JASA* **98** (1995) 4, 1890-1894.
- [9] R.C. Naidu, D.C. Mountain: Measurements of the stiffness map challenge a basic tenet of cochlear theories. *Hearing Research* **124** (1998) 124-131.
- [10] J.G. Roederer: The Physics and Psychophysics of Music. 3rd ed. New York: Springer-Verlag 1995.
- [11] R.M. Warren: Auditory Perception. A New Analysis and Synthesis. Cambridge: University Press 1999.
- [12] T. Ren: Longitudinal pattern of basilar membrane vibration in the sensitive cochlea. *PNAS* 2002 Dec 2.
- [13] A. Bell: The underwater piano: revival of the resonance theory of hearing. May 2000, <http://cogprints.soton.ac.uk/>.
- [14] G. Manley et al.: Auditory Worlds: Sensory Analysis & Perception in Animals & Man. Weinheim: Wiley-VCH 2000, p.17.
- [15] W. Hemmert, H.-P. Zenner, A.W. Gummer: Three-Dimensional Motion of the Organ of Corti. *Biophysical Journal*. **78** (2000) 5, 2285-2297.
- [16] E. Blumschein: Mathematik und akustische Realität. DAGA 03 Aachen.