

## Informations - Informationen - Informazioni - Notes

### STUDIORUM PROGRESSUS

#### Hörempfindungen im Ultraschallgebiet

Von CLAUS TIMM, Mainz<sup>1</sup>

Da die Anwendung des Ultraschalles in den letzten Jahren immer weiter um sich greift und dieser heutzutage aus Technik, Medizin und Biologie nicht mehr fortzudenken ist, erscheint es angezeigt, an dieser Stelle auf einige noch wenig bekannte Phänomene hinzuweisen, die in der wissenschaftlichen Literatur noch kaum diskutiert sind. Gemeint sind die Hörempfindungen, die im Gebiet des niederfrequenten Ultraschalls unter bestimmten Bedingungen wahrzunehmen sind und erstmalig von KUNZE und KIETZ beobachtet wurden.

Für den Menschen im mittleren Lebensalter liegt die untere Frequenzgrenze des Hörens bei etwa 20 Hz, die obere bei 15–20 kHz. Das gilt seit GILDEMEISTER<sup>2</sup> als feststehend und wurde vielfach bestätigt; zuletzt von WATSON<sup>3</sup> 1938. Daher ist hervorzuheben, daß diese Grenzen für Zuleitung des Schalles sowohl auf dem Luft- als auch auf dem Knochenwege gelten. Für Tiere liegt die obere Frequenzgrenze vielfach höher; z. B. nehmen Meerschweinchen, Katzen und Hunde, wie seit langem bekannt ist, noch Frequenzen bis rund 50 kHz auf dem Luft- und Knochenwege wahr; von den in jüngster Zeit genauer untersuchten Fledermäusen (GRIFFIN, GALAMBOS<sup>4</sup>) werden Frequenzen bis zu 80 kHz zu Orientierungszwecken ausgesandt und auch auf dem Luftwege wahrgenommen (Echolotung); ja sogar im Reich der Insekten zeigen die Nachtschmetterlinge ein Hörvermögen bis weit über 100 kHz bei Luftzulieferung des Schalles (SCHALLER und TIMM<sup>5</sup>). Selbst bei Außerachtlassung des Hörvermögens niederer Tiere findet sich also bei manchen Säugetieren, deren Hörorgane ja nicht nur relativ, sondern auch weitgehend absolut ähnlich gebaut sind, ein Hörvermögen in jenem Frequenzgebiet, das nach der heute üblichen anthropozentrischen Einteilungsweise zum «Ultraschall» gehört. Es ist also grundsätzlich nicht sehr verwunderlich, wenn wir auch beim Menschen ein Hörvermögen in diesem Gebiet feststellen können. Freilich weist dies Besonderheiten auf, die im folgenden kurz skizziert werden sollen.

Während – wie gesagt – im mittleren Lebensalter des Menschen Frequenzen bis 15–20 kHz noch bei Luft- und Knochenleitung von allen Punkten des Schädels aus zu Tonempfindungen führen, können höhere Frequenzen bis etwa 200 kHz nur dann zu Tonempfindungen führen, wenn sie an bestimmten Punkten des Körpers, in erster Linie Kopf und Hals, appliziert werden, also nur dann, wenn sie durch Gewebs-(Knochen)-Leitung zum Innenohr gelangen. Diese Punkte sind sehr zahlreich, von uns wurden ca. 60 derartige Punkte systematisch an über 150 Versuchspersonen untersucht. So uneinheitlich das Bild im einzelnen ist, so ergibt sich doch übereinstimmend, daß diese Punkte sehr gleichmäßig über die Partien des Gesichts- und Hirnschädels verteilt sind (Abb. 1). Dabei wird bei normalhörigen Versuchspersonen die Tonempfindung über der Medianlinie des Schädels auch im allgemeinen median lokalisiert, die lateral davon gelegenen «Hörpunkte» führen dagegen zu Lateralisation der Hörempfindungen auf ein Ohr, aber keineswegs immer auf das Ohr der Gleiseite, sondern mindestens ebensooft auf das Ohr der Gegenseite! Dabei kommt der Schallfrequenz eine besondere, aber wohl nicht systematische Rolle zu. Bei kontinuierlicher Frequenzänderung des auf einem Hörpunkt applizierten Schalles kommt es schon bei geringen Frequenzänderungen zu einem fortwährenden Umspringen der Hörempfindungen vom einen Ohr auf das andere, z. B. werden von einem Hörpunkt aus die Frequenzen 51–55–59 kHz rechtsseitig wahrgenommen, die benachbarten Frequenzen 53–57–61 kHz dagegen linksseitig. Ein gleiches Umspringen läßt sich über manchen Punkten beobachten, wenn der Schallgeber nur um wenige Millimeter seitlich verschoben wird, besonders auffällig ist dies z. B. über der Austrittsstelle des Nervus mentalis aus dem Unterkiefer der Fall. Über diesem Punkt wird die Hörempfindung in der Regel auf dem gegenseitigen Ohr hervorgerufen, bei Verschiebung des Schallgebers um wenige Millimeter jedoch springt die Hörempfindung in das gleichseitige Ohr um. Soviel über die Lokalisation der Hörempfindungen in dem niederfrequenten Ultraschallgebiet.

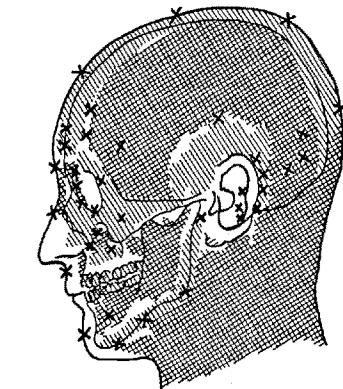


Abb. 1. Seitenansicht des Kopfes mit durch Kreuz markierten Hörempfindungspunkten.

Nun zu den Hörempfindungen selbst! Alle Frequenzen in diesem Gebiet, d. h. 20–176 kHz, die von uns untersucht worden sind, führen stets zu der gleichen Tonempfindung. Es sind also bestimmten Frequenzschritten nicht bestimmte Empfindungen zugeordnet, sondern es wird immer dieselbe hohe Ton wahrgenommen, der identisch mit dem höchsten durch Luft- und Knochenleitung wahrgenommen ist. Der Ton wird als unangenehm hoch empfunden, führt jedoch normalerweise nicht zur Schmerzempfindung. Bei gleichseitiger Applikation von 2 Frequenzen, die nahe benachbart sind, (am deutlichsten bei 30 Hz Differenz) kommt es zur Wahrnehmung von Schwebungen, die den aus dem niedrfrequenten Bereich bekannten gleichen. Sie konnten von KUNZE und KIETZ<sup>1</sup> im gesamten untersuchten Frequenzbereich bis über 100 kHz nachgewiesen werden.

<sup>1</sup> W. KUNZE und H. KIETZ, Arch. Ohren- und Nasenheilk. 155, 683 (1949).

<sup>2</sup> M. GILDEMEISTER, Z. Sinnesphysiologie 50, 161 (1919).  
<sup>3</sup> G. WATSON, J. Acoust. Amer. Soc. 299 (1938).  
<sup>4</sup> D. R. GRIFFIN und R. GALAMBOS, J. exper. Zool. 86, 481 (1941); 89, 478 (1942).  
<sup>5</sup> F. SCHALLER und C. TIMM, Exper. 5, 162 (1949).

Diese Autoren stellten auch fest, daß Differenztöne und Modulationsschwingungen im Ultraschallgebiet wahrgenommen werden können, allerdings mit der Einschränkung, daß entweder bei Normalhörigen ein Gehörgang verschlossen wird oder daß eine einseitige Schwerhörigkeit vorliegt. In allen bisher genannten Versuchen ist keine Frequenz durch Besonderheiten ausgezeichnet, es sei die höchste, von uns geprüfte, 176 kHz. Diese Frequenz führt im mittleren Lebensalter lediglich dann zu der beschriebenen Tonempfindung, wenn sie auf den Stirnhöckern appliziert wird, im jugendlichen und Kindesalter oftmals außerdem noch bei Applikation auf den Warzenfortsatz. Diese Erscheinung rechtfertigt es, zusammen mit der Beobachtung von KUNZE und KIETZ, daß bei 400 kHz keine Höremppfindung mehr ausgelöst werden konnte, von einer wenn auch vielleicht nicht absoluten, so doch zumindest relativen oberen Hörgrenze bei rund 175–200 kHz für den Menschen zu sprechen. Diese Einschränkung muß deshalb gemacht werden, weil einerseits aus dem bisher als «Hörschall» anerkannten Frequenzgebiet die Bedeutung der Schallintensität für die Lage der oberen Hörgrenze hervorgeht – eine Tatsache, die schon GILDEMEISTER veranlaßt hat, eine «absolute» obere Hörgrenze abzulehnen, sondern diese als eine Intensitätsfrage aufzufassen –, was also zur Vorsicht mahnt, andererseits aber die verminderte Auslösbarkeit von Höremppfindungen bzw. ihr Aufhören, sowie die Tatsache der Schwellenerhöhung in diesem Bereich auf das Vorliegen einer tatsächlichen oberen Grenze hindeutet. Bemerkenswerterweise sind Höremppfindungen in der Biologie bis jetzt auch nur bis zu dieser Frequenzgrenze hin überhaupt beobachtet worden. Die Frage, welcher absolute Schalldruck erforderlich ist, um die beschriebenen Erscheinungen hervorzurufen, konnte bislang noch nicht befriedigend von uns gelöst werden; vergleichsweise soll nur erwähnt werden, daß die elektrische Energie, mit der die Schallgeber betrieben wurden, maximal etwa 1 Watt betrug, daß jedoch vielfach ein Bruchteil dieser Energie ausreichte.

Obwohl eine Deutung dieser Erscheinungen heute noch verfrüht ist, so kann doch wohl – wenn auch mit aller Zurückhaltung – folgendes zum Ausdruck gebracht werden. Da sich keine anderen als die angewandten Frequenzen über dem Schädel haben nachweisen lassen, insbesondere auch keine, die in den Frequenzbereich unter 20 kHz fallen, muß bis auf weiteres angenommen werden, daß tatsächlich auch niederfrequente Ultraschallfrequenzen bis etwa 175 kHz zu Höremppfindungen führen können, wenn sie auf dem Wege der Knochen- oder Gewebsleitung zugeführt werden. Die Lokalisation wird durch die verschiedenen an der Ausbreitung des Schalles beteiligten Medien mit ihren verschiedenen Leitungsbedingungen, die zu Reflexionen, Brechung, Interferenz, stehenden Wellen usw. führen, bedingt und ist für eine weitere physikalische Analyse wohl noch viel zu kompliziert. Da es sich bei den beschriebenen Phänomenen um Höremppfindungen handelt, die durch Schall hervorgerufen werden, fallen sie auch innerhalb des durch die Begriffe «obere» und «untere» Hörgrenze abgesteckten Frequenzbereiches. Dieser muß also für Knochenleitung in Vervollständigung unserer bisherigen Kenntnisse aus begrifflichen Gründen grundsätzlich um eine Zehnerpotenz erweitert werden, nämlich von 20 kHz als bisheriger oberer Hörgrenze auf 200 kHz – auch dann, wenn den Höremppfindungen dieses Gebietes Eigentümlichkeiten anhaften, wie etwa das Fehlen einer Unterschiedsempfindlichkeit und die Auslösbarkeit von nur bestimmten Punkten, die im Bereich bis 20 kHz hin nicht vorhanden sind. Das gilt um so mehr als eine Erklärung im Rahmen unserer bisherigen bewährten Vor-

stellungen sehr wohl denkbar ist. In Übereinstimmung mit der Einortstheorie muß der fensternahe Teil der Schnecke als Ort der Erregung angesehen werden, wobei die Frage, wie es im einzelnen hier zur Erregung kommt, offenbleiben darf. Aus den Untersuchungen von GALAMBOS und DAVIS<sup>1</sup> an Einzelfaserpräparaten der Schnecke ergibt sich, daß die Frequenz der Aktionspotentiale einer Hörervenfaser eine Funktion von Schallfrequenz und -intensität ist, derart, daß einerseits bei einer bestimmten Schallfrequenz die Aktionspotentialfrequenz mit der Intensität des Schalles wächst und andererseits mit wachsender Schallintensität auch benachbarte Frequenzen zur gleichen Erregung führen

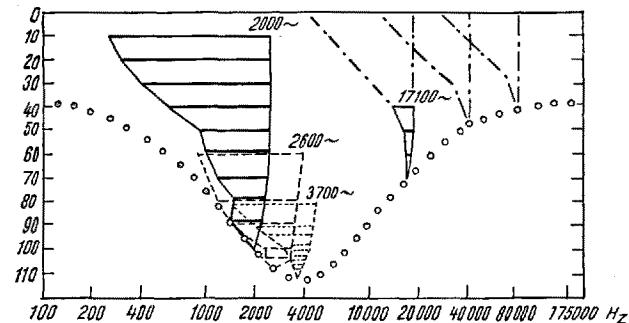


Abb. 2. 4 Einzelfaserpräparate nach GALAMBOS und DAVIS<sup>1</sup>. Vom Verfasser Abzissenmaß von 40 000–175 000 Hz erweitert sowie mutmaßliche Schwellenkurve punktiert und hypothetische Einzelfaserkurven strichpunktiert eingezeichnet. Der weit nach links ausladende Kurventeil letzterer ragt in den Bezirk der 17100 Faser hinein und erregt daher immer diese Faser.

können. Da weiterhin (Abb. 2) die von GALAMBOS und DAVIS gefundenen Kurven im rechten Teil steil ansteigen, aber im linken Teil weit nach niederen Frequenzen ausladen, läßt sich aus den registrierten 4 Einzelfaserpräparaten eine Schwellenkurve extrapoliieren, die im Gebiet der uns interessierenden hohen Frequenzen so verläuft, daß die in ihr enthaltenen Einzelfaserkurven mit ihrem linken Schenkel in den Bereich der höchsten Einzelfaser (17100 Hz) fallen, d. h. immer nur diese Faser erregen können – womit erklärt wäre, daß in dem von uns behandelten Frequenzgebiet immer dieselbe Tonempfindung resultiert. Daß die Fasern selbst den hohen Frequenzen nur durch Alternieren folgen, ist seit den Untersuchungen von DAVIS<sup>2</sup> und Mitarbeitern wohl nicht mehr zu bezweifeln. So klärt sich also das anfangs etwas unwahrscheinlich anmutende Bild der Höremppfindungen im Ultraschallgebiet, da es möglich erscheint die Beobachtungen auf bereits bekannte zurückzuführen und in unsere bisherigen Vorstellungen einzufügen.

#### Summary

Tones between 15 and 200 kcycles are audible when applied by bone-conduction. The resulting sensation is to be observed not over the whole surface of the head and neck, but only over many points, of which early 60 have been investigated in cases of normally hearing persons of both sexes and middle age. The sensation is that of a very high tone and does not change according to frequency. The highest limit of hearing may lie near 200 kcycles. The reasons are discussed why hearing in this "ultrasonic" range seems to be a real one which can be understood by observations of GALAMBOS and DAVIS on single nerve fiber-preparations.

<sup>1</sup> R. GALAMBOS und H. DAVIS, J. Neurophys. 6, 39 (1943).

<sup>2</sup> S. S. STEVENS und H. DAVIS, Hearing (New York 1938), p. 395.