

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Telegraphen- und Telephonverwaltung = Bulletin technique / Administration des télégraphes et des téléphones suisses = Bollettino tecnico / Amministrazione dei telegrafi e dei telefoni svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Telegraphen- und Telephonverwaltung

Band: 21 (1943)

Heft: 6

Artikel: Das Ohr und das Hören, eine Grundlage der Nachrichtentechnik

Autor: Furrer, W.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-873166>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 28.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

TECHNISCHE MITTEILUNGEN

HERAUSGEGEBEN VON DER SCHWEIZ. TELEGRAPHEN- UND TELEPHON-VERWALTUNG

BULLETIN TECHNIQUE

PUBLIÉ PAR L'ADMINISTRATION DES TÉLÉGRAPHES ET DES TÉLÉPHONES SUISSES

BOLLETTINO TECNICO

PUBBLICATO DALL'AMMINISTRAZIONE DEI TELEGRAFI E DEI TELEFONI SVIZZERI



Inhalt — Sommaire — Sommario: An unsere Abonnenten. A nos Abonnés. Ai nostri Abbonati. — Das Ohr und das Hören, eine Grundlage der Nachrichtentechnik. — Ueber die Qualität der telephonischen Uebertragung. — Die Verstärkerstation Disentis. La station de répéteurs de Disentis. — Die Wellenausbreitung im drahtlosen Telephonverkehr über grosse Distanzen. — Heizung der Räume des Landessenders Sottens durch Ausnützung der Verlustwärme in den Senderöhren. Chauffage des locaux de l'émetteur de Sottens par récupération de la chaleur perdue dans les lampes d'émission. — Neuerungen auf dem Gebiete der Nachrichtentechnik für das Jahr 1937. — Verschiedenes. Divers: Eine Doktorpromotion. — Le radio et le public. — Quando si soffocava dal caldo... — Der Film von der Feldpost. — Fachliteratur. Littérature professionnelle: Erzwungene elektrische Schwingungen an rotationssymmetrischen Leitern bei zonaler Anregung. — Guide technique de Genève. — Bildtelegraphie, Entwicklung und gegenwärtiger Stand. — Personalnachrichten. Personnel. Personale.

An unsere Abonnenten.

Um allfälligen Unterbrechungen in der Zustellung der „Technischen Mitteilungen“ vorzubeugen, empfiehlt es sich, Ihr Jahresabonnement rechtzeitig zu erneuern. Sie werden daher gebeten, den Abonnementsbetrag für das nächste Jahr noch vor Jahresschluss bei der Poststelle Ihres Wohnortes einzuzahlen.

A nos Abonnés.

Pour éviter des interruptions éventuelles dans la distribution du „Bulletin Technique“, nous recommandons à nos abonnés de renouveler à temps leur abonnement annuel. Nous les prions donc de vouloir bien verser encore avant la fin de l'année, à l'office postal de leur domicile, le montant de l'abonnement pour 1944.

Ai nostri Abbonati.

Per ovviare a eventuali interruzioni nell'invio del „Bollettino Tecnico“, raccomandiamo ai nostri abbonati di rinnovare per tempo il loro abbonamento annuale. Li preghiamo quindi di versare, ancor prima della fine dell'anno, all'ufficio postale del loro luogo di domicilio, l'importo dell'abbonamento per il 1944.

Das Ohr und das Hören, eine Grundlage der Nachrichtentechnik*.

Von W. Furrer, Bern.

612.85: 621.39

Einleitung.

Viele Zweige der Technik interessieren sich für die Physiologie von Sinnesorganen. Nirgends ist das aber derart ausgeprägt der Fall wie bei der Fernmelde-technik. Die beiden wichtigsten Uebertragungsmittel, Telephon und Radio, übertragen ja ausschliesslich Eindrücke, die für unser Ohr bestimmt sind, so dass die Eigenschaften des menschlichen Ohres die übertragungstechnischen Grundlagen für Telephon- und Radiosysteme bestimmen. Es ist daher kein Zufall, dass sehr viele Fortschritte auf dem Gebiete der physiologischen Akustik den Arbeiten von Fernmelde-technikern zu verdanken sind; es seien hier nur die beiden Namen H. Fletcher und G. v. Békésy er-

wähnt. Auch durch die Entwicklung der elektro-akustischen Messmethoden hat die Technik einen sehr wesentlichen Beitrag an die physiologische For-schung geleistet.

Zwischen Radio und Telephon besteht ein funda-mental-ler Unterschied, der hier nicht ausser acht ge-lassen werden darf. Während ein Radio-Uebertragungssystem so dimensioniert werden muss, dass unser Ohr zwischen Original und Uebertragung nur einen möglichst kleinen Unterschied wahrnehmen kann, muss beim Telephon die Wirtschaftlichkeit im Vordergrund stehen. Dabei darf man sich nicht direkt an die durch das Ohr gegebenen Grenzen halten, son-

* In gekürzter Fassung vorgetragen an der 2. Tagung für elektrische Nachrichtentechnik, Bern, 4. Sept. 1943.

dern muss den Nachrichtenfluss weiter einengen und komprimieren unter Einhaltung der einzigen Bedingung, dass noch eine genügende Verständlichkeit der übertragenen Sprache gewahrt bleibt. Zu den physiologischen Gesichtspunkten gesellen sich infolgedessen noch psychologische Ueberlegungen, die eine Beurteilung und auch eine Berechnung von Verständlichkeiten gestatten. Auf dieses Gebiet soll hier jedoch nicht eingegangen werden.

I. DER BAU DES OHRES.

Der Gehörrapparat zerfällt anatomisch in drei Teile: Aussenohr, Mittelohr, Innenohr. Diese Unterteilung drängt sich auch durch die scharf getrennten physikalisch-physiologischen Funktionen der drei Teile auf.

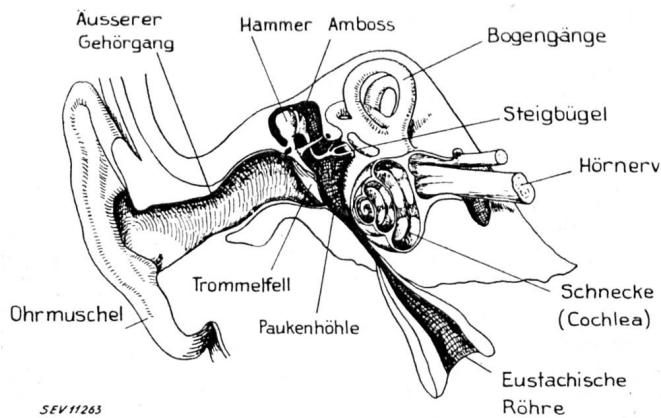


Abb. 1: Schematische Darstellung der Gehörorgane (nach Körner).

Zum *Aussenohr* gehört die Ohrmuschel, sowie der Gehörgang, der in seinem äussern Teil knorpelig, in seinem innern Teil knöchern ist und durch das Trommelfell abgeschlossen wird (Abb. 1.). Die Ohrmuschel ist akustisch durchaus unwichtig, ihr Vorhandensein ist vielleicht entwicklungsgeschichtlich bedingt. Der Gehörgang ist durchschnittlich 3,5 cm lang und hat einen Querschnitt von etwa 0,8 cm². Diese Daten sind für die Konstruktion von Telephonhörern

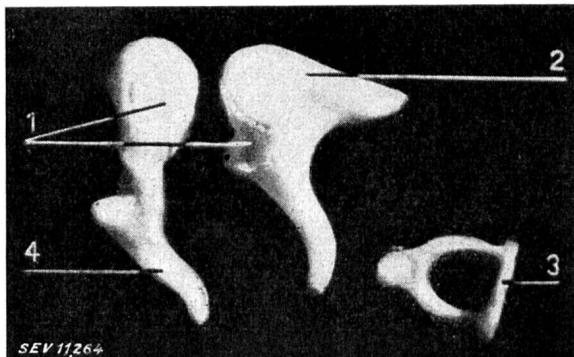


Abb. 2: Die drei Gehörknöchelchen des Mittelohrs: Hammer, Amboss, Steigbügel.

1. Berührungsfläche von Hammer und Amboss.
2. Amboss.
3. Fussplatte des Steigbügels.
4. Hammerstiel, mit Trommelfell verwachsen. (Nach Békésy.)

wesentlich, da der Gehörgang die mechanisch-akustische Belastung der Telephonmembran (Platte) darstellt. Den luftdichten Abschluss des Gehörganges bildet das Trommelfell, das eine weitgehende Ähnlichkeit mit der Konusmembran (Kolben) eines Lautsprechers aufweist. Es hat eine konische, versteifte Form und am Rande eine weiche Einspannung durch eine Falte. Es wird durch einen besondern kleinen Muskel gespannt.

Hinter dem Trommelfell befindet sich das *Mittelohr* mit der Paukenhöhle, in der die drei Gehörknöchelchen Hammer, Amboss und Steigbügel liegen (Abb. 2). Der Hammerstiel ist mit dem Trommelfell verwachsen, die Fussplatte des Steigbügels liegt am Innenohr. Die drei Knöchelchen sind durch ein kompliziertes System von Muskeln und Bändern zusammen verbunden und festgehalten. Die Paukenhöhle steht mit dem Rachen durch die Eustachische Röhre in Verbindung. Normalerweise ist diese Röhre geschlossen, sie öffnet sich nur während des Schluckens; dadurch werden statische Druckdifferenzen auf beiden Seiten des Trommelfelles ausgeglichen.

Das *Innenohr* ist in das starke Felsenbein eingebettet und ist dadurch gegen mechanische Einwirkungen sehr gut geschützt. Zunächst der Paukenhöhle liegt der Vorhof, der mit dem Vestibularorgan und der Schnecke (Cochlea) kommuniziert. Das Vestibularorgan, dessen auffälligste Teile die drei Bogen-

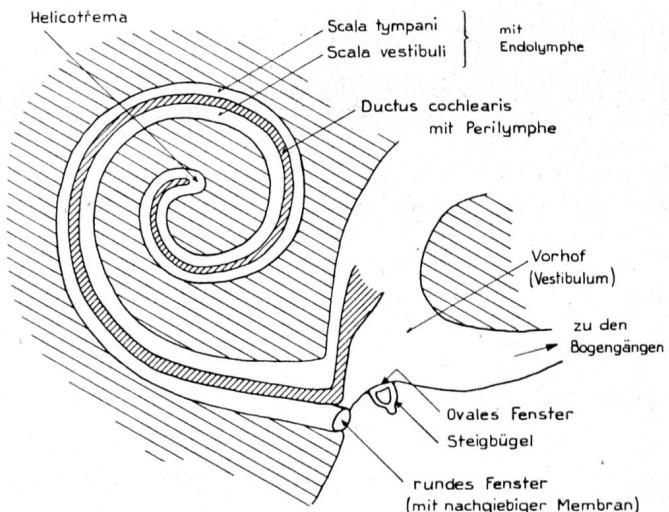


Abb. 3: Schematische Darstellung des Innenohrs (nach Toldt).

gänge sind, die in zueinander senkrecht stehenden Ebenen liegen, vermittelt uns die Lage- und Gleichgewichtsempfindungen, reagiert auf Beschleunigungen und steuert die entsprechenden Reflexe. Es spricht also auf grobe mechanische Reize an, wogegen die Cochlea die energetisch um viele Größenordnungen schwächeren Schallschwingungen empfängt. Die Schnecke hat beim Menschen 2 3/4 Windungen; sie ist durch die Schnekkentrennwand ihrer ganzen Länge nach in zwei Räume unterteilt: in die Scala vestibuli und in die Scala tympani (Abb. 3). Beide Räume sind mit Endolymphe gefüllt und stehen an der Spitze der Schnecke durch eine Öffnung, das Helicotrema, miteinander in Verbindung.

Die Schneekentrennwand ist zum Teil knöchern (Lamina spiralis ossea), zum Teil häutig (Ductus cochlearis) (Abb. 4). Der Ductus cochlearis ist begrenzt durch die Reissnersche Membran und durch die Basilarmembran und ist angefüllt mit Perilymphe, deren Viskosität annähernd 1 beträgt, wogegen die Endolymph 2,9mal zähflüssiger ist. Auf

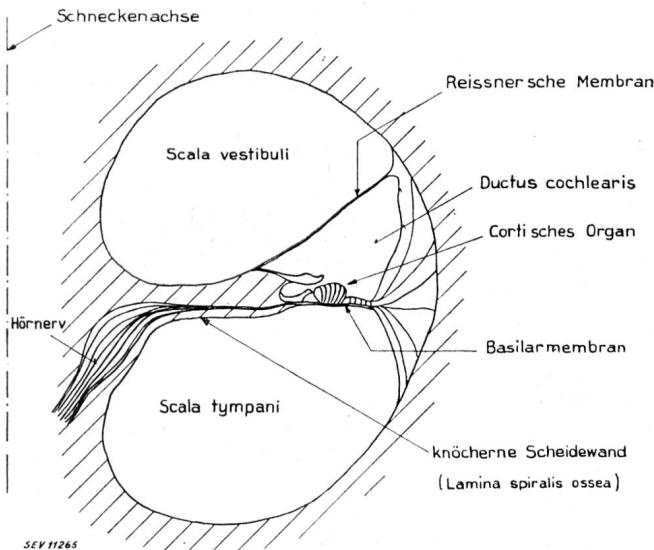


Abb. 4: Schnitt durch die Schnecke (nach Toldt).

der Basilarmembran im Innern des Ductus cochlearis liegt das sog. Cortische Organ, welches das eigentliche Transformationsorgan darstellt, wo physikalische Reize in nervöse Erregungen umgewandelt werden. Hier endigen die einzelnen Fasern des Nervus cochlearis (Hörnerv). Der Bau des Cortischen Organs selbst mit seinen Stützzellen, Sinneszellen, Sinneshäaren usw. ist kompliziert, und sein Mechanismus ist noch keineswegs erschöpfend erforscht. Die Physik und die Physiologie dieses Organes bilden ein weites Gebiet, auf dessen nähere Behandlung aber hier nicht eingegangen werden kann. Der Nervus cochlearis vereinigt sich ausserhalb der Schnecke mit dem Nervus vestibularis zum sog. 8. Gehirnnerv.

Die Verbindung vom Mittelohr zum Innenohr geschieht über das ovale Fenster, in das die Fussplatte des Steigbügels hineinpasst. Das ovale Fenster führt zum Vorhof und weiter zur Scala vestibuli. Der Ausgang der Scala tympani gegen die Paukenhöhle wird durch das runde Fenster gebildet, das durch eine sehr weiche, nachgiebige Membran verschlossen ist (Abbildung 3).

II. DER HÖRVORGANG.

Aussenohr. In den Gehörgang eindringende Schallwellen regen das abschliessende Trommelfell zu erzwungenen Schwingungen an. Auf die Rückseite des Trommelfells gelangt bei geschlossener Eustachischer Röhre keine Schallenergie, so dass das Trommelfell durch den Schalldruck angetrieben wird und das Ohr als Druckempfänger arbeitet.

Der Wirkungsgrad dieser Anordnung hängt nun in erster Linie davon ab, wie gross die Impedanz des abschliessenden Trommelfelles ist. Die akustische Im-

pedanz ist definiert durch das Verhältnis von Schalldruck zu Schallschnelle; für eine ebene Welle beträgt sie in Luft 42 ak. Ohm (C.G.S.-Einheiten). Die Messung der Trommelfellimpedanz ergibt für Frequenzen von 600 bis etwa 5000 Hz Werte, die nur sehr wenig über diesen 42 ak. Ohm liegen, so dass in diesem Frequenzbereich das Trommelfell als idealer Schallempfänger arbeitet (Abb. 5). Die in den Gehörgang eintretende Schallenergie wird also nahezu verlustlos vom Trommelfell aufgenommen, und nur ein geringer Bruchteil wird reflektiert.

Man kann den Wirkungsgrad des Trommelfellabschlusses auch als Schluckgrad oder Absorptionskoeffizient ausdrücken, wobei sich ergibt, dass der Schluckgrad im erwähnten Frequenzbereich gegen 1 tendiert. Die Eigenfrequenz des Trommelfells kann direkt gemessen werden; sie liegt in der Gegend von 1000 Hz.

Mittelohr. Die Schnecke, in die die Schallenergie schliesslich übertragen werden muss, ist mit Lymphflüssigkeit gefüllt. Eine Flüssigkeit ist aber sehr viel „schallhärter“ als Luft, d. h. sie hat eine viel höhere akustische Impedanz. So hat Wasser 144 000 ak. Ohm. Um möglichst viel Schallenergie ins Innenohr zu bringen, muss also die kleine Trommelfellimpedanz auf die hohe Innenohr impedanz hinauftransformiert

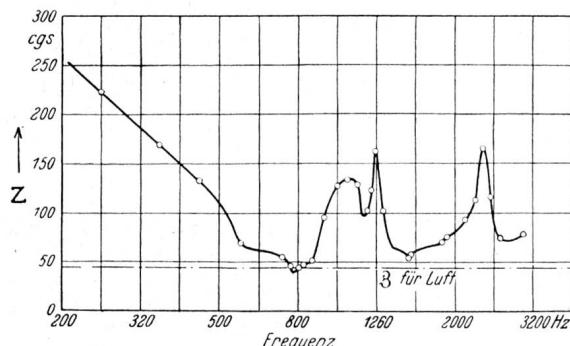


Abb. 5: Scheinwiderstand des Trommelfells (nach Tröger).

werden. Diese Aufgabe übernehmen die Gehörknöchelchen des Mittelohres.

Die Fläche der Bodenplatte des Steigbügels ist mit ca. 3 mm² etwa 20mal kleiner als die schwingende Fläche des Trommelfelles (äquivalente Kolbenmembran); ferner reduzieren die Gehörknöchelchen die übertragene Schwingungsamplitude durch Hebelwirkung etwa um den Faktor 1,3, so dass die totale Drucktransformation den Wert 25—30 erreicht. Die Wurzel aus dem Impedanzverhältnis Luft/Wasser beträgt 58, woraus hervorgeht, dass die Impedanzpassung dem Idealzustand recht nahe kommt. Dabei ist allerdings nicht sicher, ob sich in der Flüssigkeit des Innenohres wirklich Schallwellen fortpflanzen, die Flüssigkeit also komprimiert wird, oder ob sich die Flüssigkeitssäule mehr als Ganzes einfach verschiebt.

Damit ist nun aber die Aufgabe des Mittelohres noch nicht erschöpft. Die geschilderte Impedanzanpassung könnte durch einen wesentlich einfacheren Mechanismus erreicht werden, als ihn das Mittelohr darstellt. Békésy konnte zeigen, dass mit zunehmender Schwingungsamplitude des Trommelfells die Am-

plitude des Steigbügels zunächst proportional zunimmt, bei einem gewissen Schalldruck sich dann aber seine Schwingungsform plötzlich ändert, und zwar so, dass der Druck auf die Innenohrflüssigkeit nicht mehr weiter zunimmt. Dies wird dadurch erreicht, dass sich die Gehörknöchelchen in einer Art labilen Gleichgewichts befinden, derart, dass bei sehr grossen Amplituden ein plötzliches Umkippen in eine andere Schwingungsform erfolgt.

Innenohr. Durch die Bewegung der Steigbügelfussplatte im ovalen Fenster wird die Schallenergie auf die Flüssigkeit der Schnecke und zwar der Scala vestibuli übertragen. Die dadurch entstehende Flüssigkeitsströmung kann sich durch das Helicotrema über die Scala tympani bis zum runden Fenster fortpflanzen. Es entstehen längs des Ductus cochlearis Druckschwankungen, die Basilarmembran wird bewegt, und in dem auf ihr liegenden Cortischen Organ werden die Nervenenden gereizt. Diese leiten die empfangenen Reize zum Gehörzentrum des Gehirns, wo die Schallempfindung entsteht.

Bei diesen Vorgängen tauchen nun sehr viele schwer zu lösende Fragen auf. Grundlegend wichtig ist offenbar die Schwingungsform der Basilarmembran. Die sog. *Telephontheorie* nimmt an, dass die Basilarmembran ähnlich wie die Membran eines Mikrofons oder Telefons längs ihrer ganzen Oberfläche phasengleich schwingt; ähnlich wie bei einem Mikrofon würden dann im Cortischen Organ Nervenströme entstehen, deren Frequenz und Intensität dem Schalldruck proportional wären. Die ganze Auswertung der Schallreize würde also erst zentral im Gehirn erfolgen.

Die *Schallbildtheorie* vertritt die Auffassung, dass auf der Basilarmembran stehende Schwingungsbilder entstehen, die für jede Frequenz eine andere Form besitzen, aus der das Gehirn die Tonhöhe bestimmt. Die *Einortstheorie*, die auf Helmholtz zurückgeht, sagt aus, dass durch jede Frequenz nur eine eng begrenzte Stelle der Basilarmembran angeregt wird, so dass also in der Schnecke eine mechanische Analyse des Schalles stattfindet. Diese beiden Theorien nehmen also eine periphere Auswertung der Schallreize an.

Es steht heute mit Sicherheit fest, dass die Einortstheorie den tatsächlichen Verhältnissen am nächsten kommt. Als Beweis dafür lassen sich u. a. folgende Beobachtungen anführen:

Bei einem Klang, der aus mehreren Tönen zusammengesetzt ist, spielt die Phasenlage der einzelnen Komponenten für den Höreindruck keine Rolle. Jeder Ton regt die entsprechende Stelle der Basilarmembran an; das Zusammenwirken dieser Reize ergibt dann einen bestimmten Klangeindruck, wobei die Phasenlage keinen Einfluss haben kann.

Wenn das Gehör durch einen Dauerton einer bestimmten Frequenz ermüdet wird, so tritt diese Ermüdung, die sich in einer Abnahme der Ohrempfindlichkeit äussert, nur für diese Frequenz ein. Für einen andern Ton, der eine andere Stelle der Basilarmembran reizt, ist die Ermüdung nicht vorhanden.

Ferner ist auffällig, dass schon beim Neugeborenen die Schnecke ihre endgültige Grösse aufweist, was dafür spricht, dass eben ihre mechanischen Abmessungen für den Hörvorgang entscheidend sind.

Es steht also fest, dass in der Schnecke die Schwingungen des Trommelfells analysiert werden, d. h. jede Schwingung wird nach Fourier in einfache Sinusschwingungen zerlegt. Um zu verstehen, wie die Schnecke das tun kann, müssen wir nun ihren Bau und ihre Abmessungen etwas näher ansehen (Abb. 6). Dabei sprechen wir nur noch von der Basilarmembran und vernachlässigen den Umstand, dass der häutige Teil der Schnekkentrennwand durch den Ductus cochlearis gebildet wird; Beobachtungen haben je-

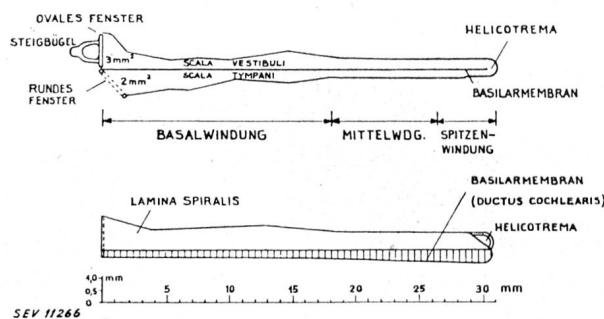


Abb. 6: Schematische Darstellung der abgewickelten Schnecke (nach Fletcher).

doch ergeben, dass die sehr dünne Reissnersche Membran immer gleichphasig mit der Basilarmembran schwingt, so dass es vom physikalischen Standpunkt aus als zulässig erscheint, in erster Annäherung nur die Basilarmembran zu betrachten.

Die Basilarmembran ist quergesärt und zeigt in der Querrichtung eine viel grössere Festigkeit als in der Längsrichtung. Ferner nimmt ihre Breite vom ovalen Fenster bis zum Helicotrema von weniger als 0,1 mm auf etwa 0,5 mm, also um mehr als 1:5 zu. Diese typische Form veranlasste Helmholtz zu seiner Resonanztheorie, bei der er die Fasern der Basilarmembran als Resonatoren betrachtete. Es ist theoretisch denkbar, dass diese Fasern für den ganzen Hörbereich Resonanzen aufweisen können. Die Variation in der Breite genügt dafür allerdings bei weitem nicht, sondern es müssen noch wesentliche Unterschiede in den Faserspannungen angenommen werden. Infolge der Unzugänglichkeit und Kleinheit des Organs konnte man diese Grösse bis jetzt aber nicht mit Sicherheit messen.

Wenn diese Theorie richtig ist, so müssen hohe Töne die Basilarmembran da erregen, wo sie schmal ist, nämlich in der Nähe des ovalen Fensters, und tiefe Töne in der Nähe des Helicotremas. Es lässt sich einwandfrei nachweisen, dass dies zutrifft. (Tierexperiment, Untersuchung gehörgeschädigter Personen nach deren Tod, Ermüdungs- und Verdeckungserscheinungen usw.)

Im Prinzip kann also heute die durch Helmholtz begründete Resonanz- oder Einortstheorie als sicher gelten. Trotzdem ist man noch recht weit davon entfernt, Klarheit über die genaueren physikalischen Vorgänge zu besitzen, die sich in der Schnecke abspielen. Sicher ist, dass die Identifizierung der Basilarmembran mit einem Zungenfrequenzmesser der Wirklichkeit nicht entspricht; die Fasern der Basilarmembran schwingen nicht in der von Helmholtz angenommenen Weise.

Eine neuere, zuerst durch Fletcher vertretene Auffassung berücksichtigt auch die mechanischen Eigenschaften der Flüssigkeit im Innenohr. Das schwingungsfähige System wird dabei gebildet durch die Masse einer schwingenden Flüssigkeitssäule und durch die Volumelastizität des Ductus cochlearis. Dieser schwingt dabei für einen reinen Ton nur an einer eng begrenzten Stelle. Mit dieser Theorie lassen sich besonders anschaulich die Verdeckungseffekte erklären.

Ausserordentlich eingehende Untersuchungen an Modellen und auch an Präparaten stammen von Békésy. Nach diesem Forscher entstehen auf der Basilar-membran fortschreitende stark gedämpfte Wellen-züge, wobei auf jeder Seite ein kleiner Wirbel in der Perilymphe entsteht, der sich bei einer Änderung der Frequenz längs der Membran verschiebt. Der Ort

der Weiterleitung von Reizen in den Nerven abspielen, sind noch weitgehend unbekannt. Dies gilt nicht speziell nur für die Hörnerven, sondern allgemein für alle Nerven. Wenn ein Nerv an irgendeiner Stelle gereizt wird, so pflanzt sich dieser Reiz nach Art einer Wanderwelle fort, und zwar mit Fortpflanzungsgeschwindigkeiten von maximal 60—80 m/s. Schon diese verhältnismässig kleine Fortpflanzungsgeschwindigkeit lässt erkennen, dass es sich dabei nicht um rein elektrische Vorgänge handeln kann. Man muss sich die Erregungsleitung im Nerven vielmehr als chemischen Vorgang vorstellen, der den Nervenbahnen entlang läuft; parallel damit gehen dann elektrische Erscheinungen, die durch Ionenkonzentrationsänderungen u. ä. entstehen und die man messen kann; dies sind die sog. *Aktionsströme*, die man jedoch nur als sekundäre Erscheinung und nicht als primären Vorgang auffassen darf.

Typisch für den Vorgang der Nervenleitung ist die Eigenschaft, dass der Nerv nach jeder Erregungsleitung für eine gewisse Zeitspanne nicht mehr imstande ist, einen neuen Reiz weiterzuleiten. Diese Zeitspanne wird *Refraktärzeit* genannt; sie liegt in der Größenordnung von 1 ms. Während dieser Zeit wird der chemische Vorgang, den der erste Reiz ausgelöst hat, wieder rückgängig gemacht und erst nach Ablauf dieser Zeit ist der Nerv für die Aufnahme eines zweiten Reizes empfänglich. Die Physiologen sprechen hier von einem „Zündschnursystem“. Eine Zündschnur kann kein zweitesmal benutzt werden, ohne dass vorher die durch das Abbrennen veränderte Pulverseele wieder ersetzt worden wäre.

Der Nerv weist noch eine weitere Aehnlichkeit mit einer Zündschnur auf: Es ist für das Abbrennen der Zündschnur vollständig belanglos, ob wir sie mit einer noch glimmenden Zündkohle zünden oder mit einem sehr heissen Lichtbogen; der „Reiz“ muss lediglich über einem bestimmten Schwellwert liegen, damit das Pulver zu brennen anfängt. Aehnlich ist das Verhalten des Nerven: Die Art des Reizes ist neben-sächlich, er kann mechanischer, elektrischer, thermischer, chemischer usw. Natur sein; sobald er über dem Schwellwert liegt, wird er aufgenommen und weitergeleitet und zwar immer mit der gleichen Intensität, unabhängig von seiner Stärke. Der Nerv arbeitet also nach dem Prinzip „alles oder nichts“. Infolge der geringen Fortpflanzungsgeschwindigkeit darf man diese Vorgänge nicht quasistationär betrachten, sondern man muss sich eine Erregungswelle vorstellen, hinter der eine refraktäre Welle herläuft.

Die Funktion der Nervenleitung ist daher keine kontinuierliche, sondern es ist pro Sekunde eine maximale Anzahl von Erregungswellen möglich. Diese Anzahl ist durch die Refraktärzeit bestimmt.

Da wir schon die Möglichkeit einer elektrischen Reizung der Nerven erwähnt haben, ist es angebracht, darüber noch das Wesentlichste zu sagen, um die bekannten Wirkungen von elektrischen Spannungen auf den menschlichen Körper in unser Schema einordnen zu können.

Ein Gleichstrom erzeugt nur im Moment des Einschaltens einen Reiz; beim Ausschalten ist der provozierte Reiz kleiner, und bei Dauerstrom ist er überhaupt Null. Ferner spielt auch die Dauer der Einwirkung des ansteigenden Stromes eine Rolle und

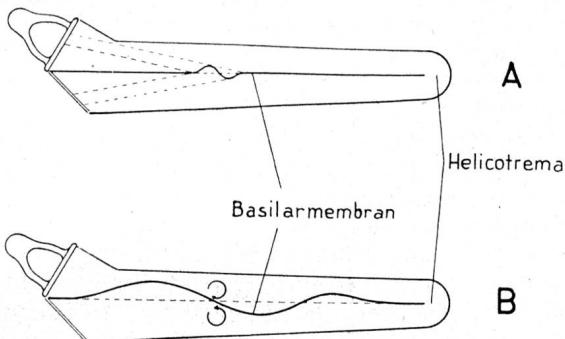


Abb. 7: Physik der Schnecke.

A. Nach Fletcher.

B. Nach Békésy.

dieser Wirbel ist also durch die Tonhöhe gegeben und die Wirbel würden auch die Reizung der Hörnerven besorgen. Diese Theorie basiert also auf den hydro-dynamischen Eigenschaften des Innenohrs; entsprechende Rechnungen wurden durch Ranke durchgeführt (Gleichrichter-Resonanztheorie) (Abb. 7).

Es ist auch noch unklar, wie gross das Dämpfungs-dekrement der schwingungsfähigen Systeme des Innenohrs ist. Zahlreiche Versuche lassen vermuten, dass es in der Nähe des kritischen Wertes liegen muss. Es scheint wahrscheinlich, dass ein tiefer Ton eine breitere Zone der Basilar-membran in Schwingungen versetzt als ein hoher. In dieser Hinsicht ist die hydrodynamische Gleichrichter-Resonanztheorie besonders interessant, da sie die Analyse ohne Resonanz erklären und damit ein in der Technik bisher unbekanntes Prinzip der Klangzerlegung darstellen würde.

Für das allgemeine Verständnis des Hörvorganges und der Höreigenschaften ist die genaue Kenntnis der sich im Innenohr abspielenden physikalischen Vorgänge nicht sehr wesentlich. Es genügt daher, wenn man weiß, dass die durch die Steigbügelfussplatte auf die Perilymphe der Scala vestibuli übertragene Schallenergie die Basilar-membran zu Schwingungen anregt, und zwar so, dass für jede Tonhöhe nur eine bestimmte Zone des Cortischen Organs erregt wird.

Eine weitere wichtige Frage ist nun die, wie die Hörnerven die empfangenen Reize ins Gehirn weiterleiten. Die Vorgänge, die sich bei der Bildung und

zwar so, dass der Reiz angenähert dem Produkt $I\sqrt{t}$ proportional ist. (I = ansteigender Strom, t = Zeit.) Daraus leiten sich die folgenden Wirkungen ab:

Beim Berühren einer Gleichstromquelle wird ein einziger Nervenreiz ausgelöst, der eine einmalige Muskelkontraktion zur Folge hat. Durch den stationär fliessenden Gleichstrom werden jedoch keine weiteren Nervenreize mehr erzeugt, sondern nur noch Gewebs-schädigungen durch Elektrolyse und Wärme. Ein 50periodiger Wechselstrom dagegen erzeugt vor allem eine dauernde Muskelkontraktion, infolge ständiger Nervenreizung. Bei hochfrequenten Wechselströmen wird dann der Faktor t so klein, dass das Produkt $I\sqrt{t}$ auch für sehr grosse Ströme noch unter dem Schwellenwert liegt und daher überhaupt keine Nervenerregung mehr erfolgt. Lediglich die Wärme-wirkung macht sich noch bemerkbar, so dass hoch-frequente Ströme für Diathermie und Elektrochirurgie (planmässige lokalisierte Gewebszerstörung) Anwendung finden können. Dieselben Gesetze gelten im Prinzip auch für die Hörnervenen. Besondere Bedeu-tung hat dabei die Refraktärzeit, die die Uebertragung von höhern Frequenzen als etwa 1000 Hz verun-möglicht. Dass wir aber Töne bis gegen 20 000 Hz hören können, verdanken wir der Analyse im Innen-ohr.

1930 gelang es den Amerikanern Wever und Bray erstmals, elektrische Spannungen an Hörnervenen zu messen. Sie fanden, dass die Frequenzen der abgenom-menen Spannungen genau den Schallfrequenzen ent-sprachen, und zwar bis zu den höchsten Tönen. In einem berühmt gewordenen Versuch gelang es sogar, die an den freigelegten Hörnervenen einer Katze auftretenden Spannungen zu verstärken und einem Lautsprecher zuzuführen, so dass das Versuchstier als lebendes Mikrophon funktionierte; dabei wurden Sprache und Musik einwandfrei wiedergegeben. Dieses Ergebnis schien zunächst eindeutig für eine zentrale Hörtheorie im Sinne der „Telephon“-Theorie zu sprechen. Weitere Versuche ergaben jedoch bald, dass man es mit zwei grundsätzlich verschiedenen elektrischen Phäno-menen zu tun hatte. Einmal treten die erwähnten Spannungsdifferenzen zwischen der Schnecke und irgendeiner indifferenten Stelle des Körpers auf; da-bi wird die eine Elektrode gewöhnlich an das runde Fenster gelegt, die andere an den Hals, den Arm usw. (Cochleaeffekt). Daneben lassen sich aber noch die eigentlichen Nervenaktionsströme nachweisen, die den physiologischen Regeln gehorchen und keinerlei Aehnlichkeit mit dem zeitlichen Verlauf des Schall-druckes zeigen. In der Umgebung der Schnecke über-lagern sich diese beiden Effekte; es zeigte sich auch, dass die im Zentrum des Nervus cochlearis verlaufende kleine Arterie, welche Teile der Cochlea mit Blut versorgt, für die Weiterleitung der Cochleaspaltungen verantwortlich war, so dass diese noch in der Nähe des Gehirns nachgewiesen werden konnten. Nach dem Durchtrennen dieser Arterie ist der Nachweis des Cochleaeffektes auf die Schnecke selbst beschränkt, so dass daraus auf die rein physikalische Natur der Cochleaspaltungen geschlossen werden kann.

Der Cochleaeffekt zeigt auch eine sehr grosse Re-sistenz gegenüber Betäubungsmitteln, mangelnder Blutzufuhr und sogar den Tod des Individuums. Im Gegensatz dazu hören die eigentlichen Nervenaktions-

ströme mit dem Tode sofort auf. Es gelingt jedoch, durch Anästhesierung des Cortischen Organs den Cochleaeffekt zum Verschwinden zu bringen.

Die in der Schnecke auftretenden Spannungsdiffe-rencen entstehen also im Cortischen Organ; der genauere physikalische Vorgang ist noch unbekannt. Diese Spannungsdifferenzen tragen wahrscheinlich dazu bei, die Hörnervenen zu reizen, d. h. die Aktions-ströme auszulösen. Der Beweis dafür fehlt allerdings noch, doch muss angenommen werden, dass dem Cochleaeffekt irgendeine physiologische Funktion zukommt und er nicht nur zufällig entsteht. Man kann auch zeigen, dass beim Auftreffen tiefer Töne auf das Ohr die Spannungen in der Nähe des Helico-tremas am grössten sind, bei höhern Tönen aber beim runden Fenster, so dass der Cochleaeffekt, der anfänglich mit der Einortstheorie nicht im Einklang schien, diese in schöner Weise stützt.

Die genauere Untersuchung der Aktionsströme im Hörnervenen, besonders durch H. Davis, hat ergeben, dass eine Reizwelle nur dann entsteht, wenn die Basilarmembran sich von der Scala tympani nach der Scala vestibuli hin bewegt, d. h. wenn das Trommelfell von innen nach aussen schwingt. Die andere Phase der Schwingung erzeugt keinen Aktions-strom. Es liegen also dieselben Verhältnisse vor wie bei der Reizung eines Nerven mit Gleichstrom, wobei auch nur beim Einschalten, d. h. Ansteigen des Stromes, eine Reizwelle erzeugt wird, nicht aber beim Ausschalten. Je grösser die Amplitude der Schwingung ist, desto mehr Nervenfasern müssen er-regt werden, da ja eine einzelne Faser nur ein ganz bestimmtes Reizquant übertragen kann (Alles-oder-Nichts-Prinzip!). Ferner ist die Refraktärzeit von Faser zu Faser Schwankungen unterworfen, ebenso die Reizschwelle, die auch noch durch Ermüdungs-erscheinungen beeinflusst wird.

Für tiefe Töne, d. h. unter etwa 1000 Hz, ist es ohne weiteres klar, dass die Erregungswellen den

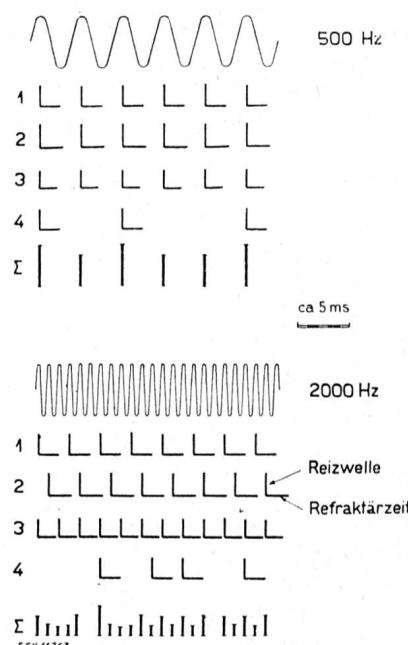


Abb. 8: Erregung von vier Nervenfasern durch reine Töne der Frequenzen 500 Hz und 2000 Hz (schematisch) (nach Davis).

gleichen zeitlichen Verlauf wie die Schallwellen zeigen werden. Die Frage aber, ob das Gehirn diese zeitliche Charakteristik auch noch irgendwie verwendet, ist noch ungelöst. Bei hohen Frequenzen kann dies wahrscheinlich nicht mehr der Fall sein, da der zeitliche Verlauf der Reizwellen infolge der verhältnismässig langen Refraktärzeit weitgehend verwischt und von andern Faktoren, wie z. B. der Lautstärke, beeinflusst wird (Abb. 8). Bei tiefern Tönen wäre dies physiologisch möglich. Es zeigt sich nämlich, dass die Frequenzen von 20 Hz bis zu etwas über 100 Hz annähernd dieselbe Stelle der Basilarmembran in der Nähe des Helicotrema erregen (Abb. 9).

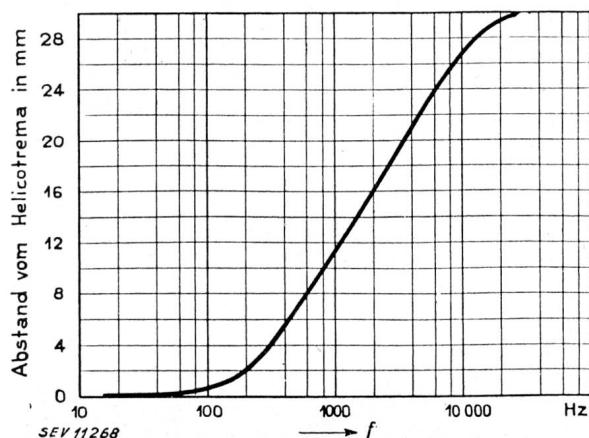


Abb. 9: Lage des Erregungsmaximums auf der Basilarmembran in Funktion der Frequenz (nach Fletcher).

Trotzdem können wir in diesem Bereich die Tonhöhen noch einwandfrei unterscheiden. Diese Tatsache lässt also vermuten, dass unter Umständen der zeitlichen Charakteristik der Nervenimpulse auch eine Bedeutung zukommen kann, eine Annahme, die um so wahrscheinlicher ist, als auch noch zwei andere Effekte, Richtungshören und Residuum, die später behandelt werden, vorläufig nur auf diese Weise erklärt werden können. Das würde bedeuten, dass die Einortstheorie nicht ohne Einschränkung gültig ist.

Der Cochleaeffekt ist umkehrbar, d. h. es ist auch möglich, durch Anlegen elektrischer Spannungen Höreindrücke zu erteilen. Dazu wird die eine Elektrode in den mit einer Kochsalzlösung gefüllten Gehörgang eingeführt, die andere beispielsweise an den Arm gelegt. Dabei zeigt es sich, dass man nur dann unverzerrte Höreindrücke erhält, wenn die Tonfrequenzspannung einer Gleichspannung überlagert wird. Man muss daraus folgern, dass das Ohr eine quadratische Charakteristik, ähnlich einem Kondensatormikrophon, aufweist, und zwar muss dieser quadratische Effekt im Mittelohr entstehen, da Personen mit fehlendem Mittelohr Tonfrequenzspannungen direkt, also ohne überlagerte Gleichspannung, hören können. Die einfachste Vorstellung besteht darin, dass das Trommelfell und die gegenüberliegende Wand des Mittelohres die beiden Beläge eines Kondensators bilden, so dass beim Anlegen von elektrischen Spannungen das Trommelfell durch elektrostatische Kräfte bewegt wird und so ein Höreindruck entsteht. Bei fehlendem Mittelohr muss der Höreindruck im Innenohr entstehen, wahrscheinlich durch direkte Reizung der Hörnerven, wobei der quadra-

tische Effekt natürlich wegfällt. Dabei sind aber die Höreindrücke meist sehr undeutlich.

Zusammenfassend können wir nun die prinzipielle Wirkungsweise des Ohres wie folgt beschreiben:

Der Schalldruck versetzt das Trommelfell in erzwungene Schwingungen, welche durch die Gehörknöchelchen des Mittelohres auf die Schneckenflüssigkeit übertragen werden. Dadurch wird die Schneckentrennwand (Ductus cochlearis) in Schwingungen versetzt, und zwar so, dass für jede Tonhöhe eine bestimmte Zone des Cortischen Organs gereizt wird. Ein tiefer Ton reizt eine verhältnismässig breite Zone in der Nähe des Helicotrema, ein hoher Ton eine schmale Zone in der Nähe des ovalen Fensters. Durch die mechanische Reizung der Zellen des Cortischen Organs werden tonfrequente Spannungen erzeugt, welche wahrscheinlich die Reizung der Gehörnerven besorgen. Die entstehenden Nervenreize sind den physiologischen Gesetzen unterworfen, so dass sie nur bei tiefen Tönen mit dem Schalldruck synchron laufen können; dabei fällt auf jede ganze Schwingung ein Nervenimpuls. Die sekundliche Anzahl der Nervenpulse ist daher im allgemeinen für das Erkennen der Tonhöhe belanglos. Diese ist vielmehr durch die Lage der bewegten Zone der Schneckentrennwand bestimmt. Die empfundene Lautstärke hängt ausschliesslich von der Anzahl der erregten Nervenfasern ab, nicht von der sekundlichen Anzahl von Impulsen in den Nervenfasern. Dies steht im Gegensatz zur Physiologie der andern Sinnesorgane, bei denen die Intensität des Reizes die sekundliche Anzahl der Nervenpulse bestimmt.

III. DIE EIGENSCHAFTEN DES OHRES.

Bei der Diskussion der Eigenschaften des Ohres muss zunächst unterschieden werden zwischen *stationären* und *nichtstationären* Schallereignissen. Ein Uebertragungssystem wird ja in den weitaus meisten Fällen nur durch sein Verhalten gegenüber stationären Tönen und Klängen charakterisiert, und zwar deshalb, weil Messungen im eingeschwungenen Zustand sehr einfach sind. Dabei darf man aber nie vergessen, dass ein stationärer Zustand theoretisch erst nach unendlich langer Zeit eintritt, so dass dieser Fall eigentlich überhaupt nicht vorkommt. Glücklicherweise ist der Verlauf der Mehrzahl der praktisch vorkommenden Schallereignisse so, dass für sie mit guter Annäherung die Eigenschaften des Uebertragungssystems im stationären Zustand gelten. Für die Uebertragung von Schlaginstrumenten oder auch nur des richtigen Einsatzes gewisser Musikinstrumente usw. sind aber die Einschwingvorgänge gerade so wichtig wie die stationäre Charakteristik, was sich durch die Eigenschaften des Ohres sehr deutlich belegen lässt.

Bei den stationären Schallereignissen muss ferner unterschieden werden zwischen einzelnen reinen Tönen und Tongemischen. Ein Tongemisch, dessen Teiltöne harmonisch liegen, wird als Klang bezeichnet.

A. Stationäre Schalle.

1. Einzeltöne.

Die frühesten Untersuchungen der Eigenschaften des Ohres erstreckten sich auf seine Empfindlichkeit für stationäre, reine Töne verschiedener Frequenzen.

Der Mechanismus der Nervenleitung lässt ohne weiteres erwarten, dass das Ohr, wie jedes andere Sinnesorgan, eine bestimmte Reizschwelle aufweisen muss, wo der Sinneseindruck plötzlich beginnt, nämlich dann, wenn der Reiz so gross wird, dass gerade die erste Nervenfaser erregt wird. Diese Reizschwelle ist stark frequenzabhängig; sie liegt hauptsächlich für die tiefen Töne bedeutend höher als für die mittleren und hohen. Darüber liegen sehr ausgedehnte Untersuchungen auf statistischer Basis vor, so dass man sich auf eine „Normal-Reizschwelle“ einigen konnte, die international anerkannt ist.

Wird die Intensität des Schalles gesteigert, so macht sich eine obere Grenze bemerkbar, wo die reine Schallempfindung in eine Schmerzempfindung übergeht, nämlich da, wo der Steigbügel in die er-

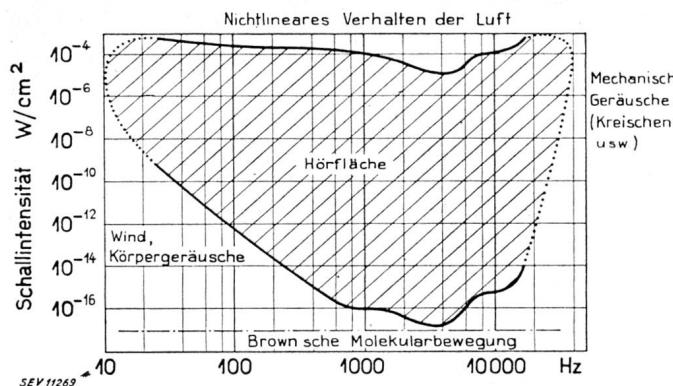


Abb. 10: Die Hörfäche und ihre natürlichen Begrenzungen.

wähnte andere Schwingungsform umkippt; man spricht dann von der Schmerz- oder Fühlenschwelle. Diese beiden Grenzkurven schliessen die sog. „Hörfäche“ ein (Abb. 10). Die Ordinate der Kurven stellt dabei den Schalldruck einer ebenen forschreitenden, von vorne kommenden Welle dar, wie er ohne das Vorhandensein des Kopfes wäre. Die bei den hohen Frequenzen auftretenden Beugungerscheinungen sind also mitgemessen.

Interessant ist nun vor allem die Frage, wie sich die minimale Schallenergie, auf die das Ohr gerade noch anspricht, zu den Schallenergien unserer Umwelt verhält. Bei gewöhnlicher Temperatur ist jedes Gasmolekül in dauernder, intensiver Bewegung, ein Effekt, den man die Brownsche Molekularbewegung nennt. Die dadurch bewirkten ständigen kleinen Druckschwankungen, die ja auch ein Schalldruck sind, können leicht berechnet werden, und es zeigt sich, dass die Ohrreizschwelle in der gleichen Grössenordnung liegt. Wäre also das Ohr empfindlicher, so müssten wir dauernd ein Störgeräusch hören.

Die Abnahme der Empfindlichkeit gegen die tiefen Töne kann man physiologisch so deuten, dass sonst Windgeräusche und auch Körpergeräusche von Blutkreislauf, Verdauung usw. herührend, dauernd gehört würden. Die Begrenzung gegen die obigen Frequenzen ist nützlich, um die übermässige Einwirkung aller auf mechanische Weise erzeugten Geräusche, die vor allem hohe Frequenzen enthalten, von uns fernzuhalten. Die Fühlenschwelle liegt ungefähr da, wo die rein elastische Wellenbewegung der Luft aufhört.

Die Grösse der Schwingungsamplitude des Trommelfells an der Reizschwelle vermittelt einen Begriff von der ungeheuren Empfindlichkeit des Ohres (Abb. 11).

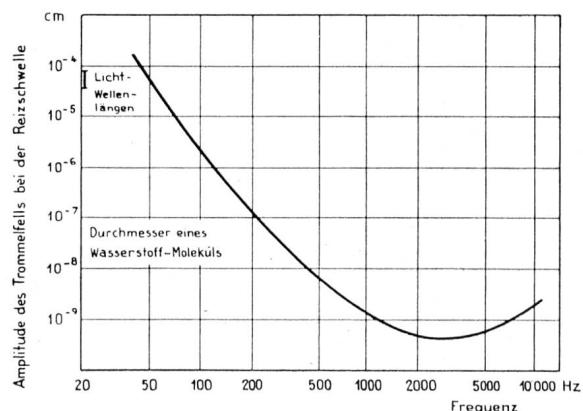


Abb. 11: Die Schwingungsamplitude des Trommelfells bei der Reizschwelle (nach Wilska).

Wie der Abfall der Empfindlichkeit für die tiefen Frequenzen entsteht, ist noch nicht klar. Einen Beitrag dazu leistet die zunehmende Trommelfellimpedanz. Das Mittelohr arbeitet praktisch frequenzunabhängig, so dass eine weitere Ursache im Innenohr liegen muss. Neueste Untersuchungen von Békésy deuten darauf hin, dass dieser Effekt erst im Transformationsorgan entsteht. Die physiologischen Eigenschaften der Nerven machen es ferner verständlich, dass die Schallempfindungen gequantelt sein müssen, d. h. dass es eine bestimmte, endliche Reizerhöhung braucht, um ein Ansteigen der Lautstärke zu empfinden, ebenso eine bestimmte Frequenzänderung, um eine Tonhöheänderung hören zu können.

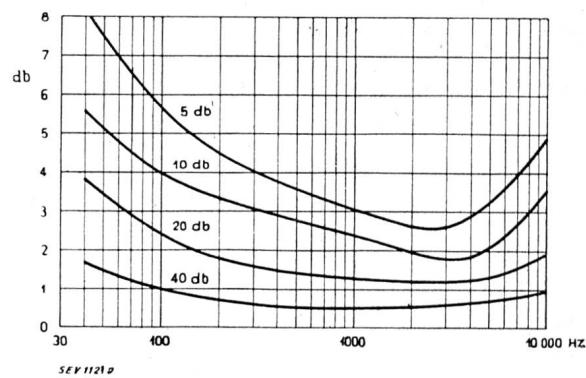


Abb. 12: Gerade noch hörbare Intensitätsänderungen in db in Funktion der Frequenz für verschiedene Intensitäten (0 db = 10^{-16} W/cm^2) (nach Fletcher).

In der Abb. 12 sind die gerade erkennbaren Intensitätsänderungen in Funktion der Frequenz mit verschiedenen Intensitäten als Parameter (bezogen auf 10^{-16} W/cm^2) dargestellt. In der Gegend von 1000 Hz beträgt die kleinste noch hörbare Änderung für Intensitäten über 40 db etwa 0,5 db, während bei der sehr kleinen Intensität von 5 db die kleinste merkliche Änderung schon 3 db beträgt. Bei 50 Hz sind diese Werte noch erheblich grösser, nämlich 1,5,

bzw. 7,5 db. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass der Frequenzgang eines Uebertragungssystems nicht sehr kritisch ist, da lineare Verzerrungen in der Größenordnung von 1 db noch nicht hörbar sind.

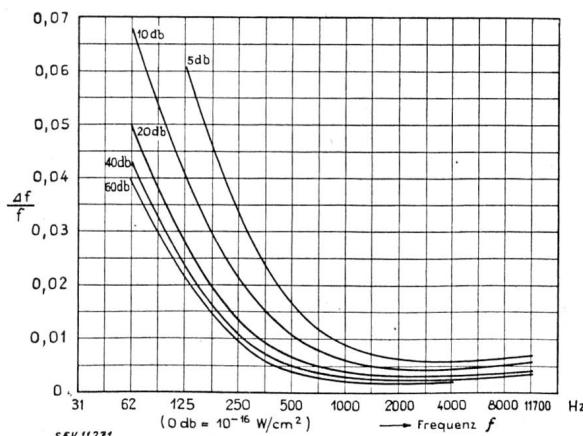


Abb. 13: Gerade noch hörbare Frequenzänderungen in Funktion der Frequenz für verschiedene Intensitäten ($0 \text{ db} = 10^{-16} \text{ W/cm}^2$) (nach Shower und Biddulph).

Die Abb. 13 zeigt die gerade noch merklichen Frequenzänderungen, wieder in Funktion der Frequenz und mit der Intensität als Parameter. Es geht daraus hervor, dass oberhalb 500 Hz bei grösseren Intensitäten Frequenzänderungen von 0,2 bis 0,3% schon hörbar sind, während bei den tiefen Frequenzen die Empfindlichkeit für Frequenzänderungen stark abnimmt. Als Vergleich sei erwähnt, dass das Intervall zwischen zwei ganzen musikalischen Tönen etwa 12% beträgt.

An Hand der beiden Kurvenscharen hat Fletcher ausgerechnet, wieviele verschiedene Töne das Ohr überhaupt unterscheiden kann. Es ergibt sich die erstaunliche Zahl von etwa 540 000.

Für den Zusammenhang zwischen Reizstärke und Empfindungsstärke gilt das allgemeine physiologische Gesetz, das alle Sinnesorgane mehr oder weniger befolgen, dass die gerade merkliche Änderung der Empfindungsstärke in einem konstanten Verhältnis zu dem bereits vorhandenen Reiz steht. Dies ist das sog. *Weber-Fechnersche Gesetz*, das sich wie folgt formulieren lässt:

$$dE = \text{const. } \frac{dR}{R} \quad E = \text{Empfindung} \quad R = \text{Reiz}$$

integriert

$$\text{ergibt sich: } E = \text{const. } \log R$$

Der Umstand, dass die Empfindung proportional dem *Logarithmus* des Reizes ist, hat auch zu einem logarithmischen Mass geführt. Der Reiz ist durch das Schallfeld gegeben; er wird also in akustischen Einheiten gemessen, und zwar entweder als Schalldruck in μb oder als Schallintensität in W/cm^2 . Die Empfindung, also der Höreindruck, wird als *Lautstärke* bezeichnet und in einem logarithmischen Mass gemessen, dessen Einheit seit 1937 international das „*Phon*“ ist.

Die Einheit der Lautstärke wird nun folgendermassen definiert:

1. Die Lautstärke eines Schalles wird durch *Hörvergleich* mit einem Normalschall festgestellt. Sie lässt sich also nicht durch eine direkte Messung bestimmen, sondern das Ohr wird zu der Feststellung benutzt, ob zwei Empfindungen gleich seien.

2. Als *Normalschall* dient eine ebene forschreitende Schallwelle von der Frequenz 1000 Hz, die von vorn auf den Kopf des Beobachters auftrifft. Die Schallintensität des Normalschalles ist veränderlich.

3. Zur Bestimmung der Lautstärke werden abwechselnd der Normalschall und der zu messende Schall abgehört. Es wird dabei festgestellt, auf welche Intensität der Normalschall eingeregt werden muss, damit er, beurteilt von einer grösseren Anzahl normal hörender Beobachter, ebenso laut erscheint wie der zu messende Schall.

4. Die Schallintensität des als gleich laut festgestellten Normalschalles wird auf eine *Bezugsintensität* von 10^{-16} W/cm^2 bezogen. (Der entsprechende Schalldruck beträgt rund $2 \cdot 10^{-4} \mu\text{b}$.)

5. Für die Skala der Lautstärke werden die gewöhnlichen Briggschen Logarithmen verwendet. Wenn I die Schallintensität des als gleich laut festgestellten Normalschalles ist und I_0 die Bezugsintensität, so beträgt die Lautstärke L des zu messenden Schalles:

$$L = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \text{ Phon}$$

Die Lautstärke beträgt also 0 Phon, wenn die Intensität des gleichlauten Normalschalles = $I_0 = 10^{-16} \text{ W/cm}^2$ ist. Dieser Wert entspricht annähernd der mittleren Hörschwelle. Auf diese Weise werden nun die zu den verschiedenen Intensitäten bei den verschiedenen Frequenzen gehörenden Lautstärken gemessen und die innerhalb der Hörfäche liegenden Punkte gleicher Lautstärken durch Kurven ver-

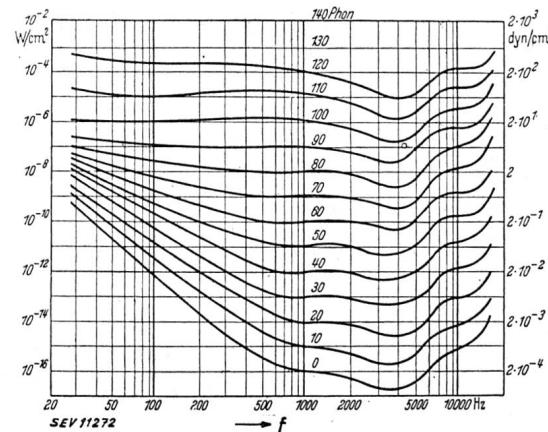


Abb. 14: Die Kurven gleicher Lautstärke (nach Fletcher und Munson).

bunden (Abb. 14). Aus dieser Kurvenschar lässt sich also für jeden physikalischen Reiz, der durch seine Intensität und seine Frequenz gegeben ist, die zugehörige Empfindung in Phon ablesen.

Eine andere ebenso praktische Darstellungsweise benutzt als Parameter nicht die Lautstärke, sondern die Frequenz (Abb. 15). Hier sind besonders deutlich die in Wirklichkeit vorkommenden Abweichungen vom Weber-Fechnerschen Gesetz zu erkennen. Der

Phon-Maßstab gestattet, alle vorkommenden Schalle, vom leisesten, gerade noch hörbaren Geräusch, bis zum schmerzhaften Hören, im Bereich zwischen 0 und 130 Phon unterzubringen. Dabei kann immer mit ganzen Zahlen operiert werden, da der kleinste hörbare Intensitätsunterschied ja ungefähr 1 db beträgt.

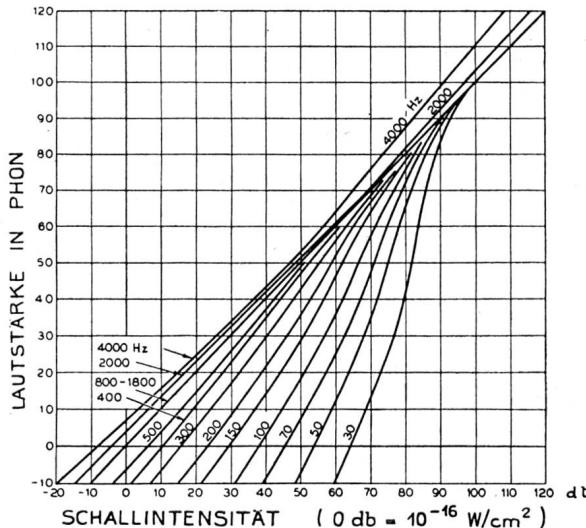


Abb. 15: Lautstärke in Funktion der Intensität mit der Frequenz als Parameter (nach Fletcher und Munson).

Die in Phon gemessenen Lautstärken einiger bekannter Geräusche illustrieren das Wesen dieses Maßstabes am deutlichsten:

Vollständige Ruhe	0 Phon
Ticken einer Uhr am Ohr, leises	
Flüstern	10—20 „
Ruhige Wohngegend bei Tage . .	30—40 „
Umgangssprache, ruhiges Personen-	
auto	50—60 „
Im Bahnwagen, kleinere Werkzeug-	
maschine	70—80 „
Mechanischer Websaal, vorbei-	
fahrender Zug	90—100 „
Flugzeugmotor, Presslufthammer .	110—130 „

Es zeigt sich, dass der Phon-Maßstab für viele Zwecke unzureichend ist. Einmal wäre die Grundlegung eines logarithmischen Maßstabes nur gerechtfertigt, wenn das Weber-Fechtersche Gesetz wirklich für alle Lautstärken erfüllt wäre, was nicht der Fall ist; dann bietet der logarithmische Maßstab Schwierigkeiten für Leute, die darin keine Übung haben. Ferner ist er auch ungeeignet für eine einfache Berechnung von Lautstärken.

Daher wurde von Fletcher noch eine weitere Größe vorgeschlagen, die man im Gegensatz zur Lautstärke *Lautheit* nennt und die sich rasch eingeführt hat. Im Gegensatz zum Phon-Maßstab ist der Lautheitsmaßstab ein „wahrer“ Maßstab, da er so aufgebaut ist, dass einer subjektiv als Verdoppelung empfundenen Zunahme der Schallempfindung auch eine Verdopplung der Lautheit entspricht. Sie wird in „Lautheits-Einheiten“ gemessen, die so entstehen, dass der Reizschwellen-Lautstärke von 0 Phon die Lautheit 1 zugeordnet wird; für die Schmerzschwelle ergeben

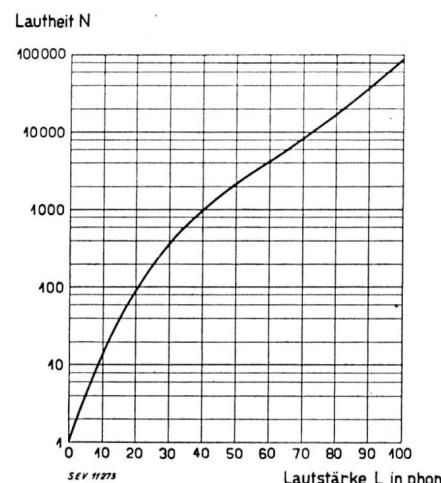


Abb. 16: Lautheit in Funktion der Lautstärke (nach Fletcher).

sich dann 10^6 Lautheitseinheiten; die Beziehung gilt für alle Frequenzen (Abb. 16). Diese grossen Zahlen sind vielleicht etwas unbequem, da das Ohr ja nur eine viel kleinere Zahl von verschiedenen Lautheiten überhaupt unterscheiden kann.

Da der Lautheitsmaßstab ein „wahrer“ Maßstab ist, lässt er sich direkt mit dem Hörprozess in Verbindung bringen, indem die Zahl der Lautheitseinheiten offenbar proportional der Zahl der erregten

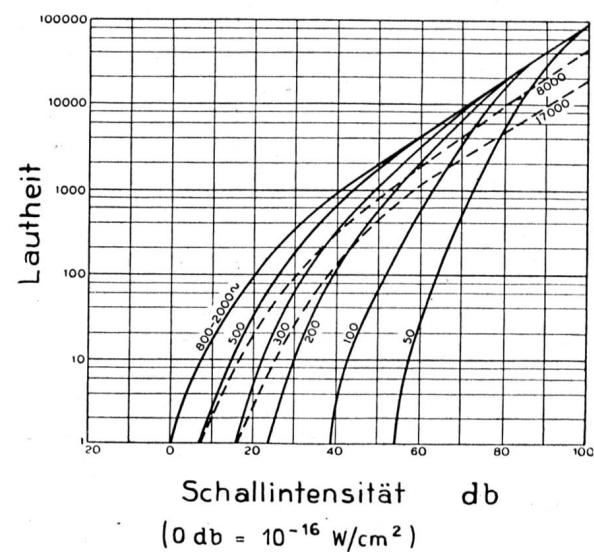


Abb. 17: Lautheit in Funktion der Intensität (nach Fletcher).

Nervenfasern sein muss. Der Begriff der Lautheit eignet sich daher besonders für die Berechnung der Empfindung eines zusammengesetzten Reizes, wie später ausgeführt wird.

Es lässt sich nun ohne weiteres auch noch eine direkte Beziehung zwischen Reiz und Lautheit aufstellen (Abb. 17). Dabei tritt natürlich die Frequenz als Parameter auf. Es wird besonders deutlich, wie die Reizschwelle für die tiefen Töne ansteigt. So braucht es für 50 Hz gegenüber 1000 Hz einen um 53 db grösseren Reiz, was einer Vergrösserung der Schallenergie um einen Faktor 200 000 entspricht,

um die Reizschwelle zu erreichen. Ferner ist auffällig, wie rasch dann die 50-Hz-Kurve ansteigt, um bei etwa 100 000 Lautheitseinheiten die 1000-Hz-Kurve zu erreichen. Das heisst also, dass tiefe Töne bei Reizen, deren Stärke relativ nur wenig über der Hörschwelle liegen, schon einen grossen Teil der Basilarmembran stimulieren, im Gegensatz zu hohen Frequenzen, welche bei kleinen Reizstärken nur einen sehr schmalen Bereich der Basilarmembran anregen.

Diese grosse Inanspruchnahme der Basilarmembran durch die tiefen Töne erklärt sich durch die Bildung von harmonisch liegenden *Obertönen* im Ohr selbst.

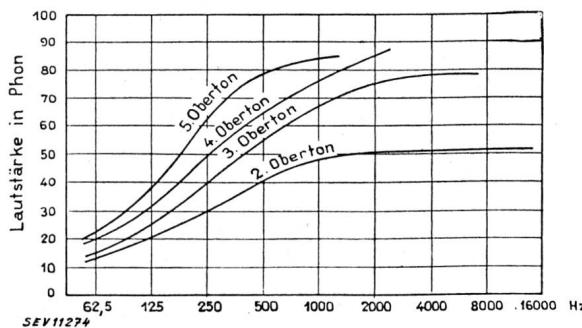


Abb. 18: Schwellenintensität für subjektive Obertöne (nach Fletcher).

Es zeigt sich nämlich, dass wenn das Ohr durch einen reinen, sinusförmigen Ton erregt wird, von einer bestimmten Lautstärke an Obertöne gehört werden. Die Stärke dieser Obertöne lässt sich durch einen „Suchton“ annähernd bestimmen, der mit den einzelnen Obertönen zusammen Schwebungen erzeugt, wenn die Frequenz des Suchtones mit derjenigen des Obertones nahezu übereinstimmt. Diese Schwebungen

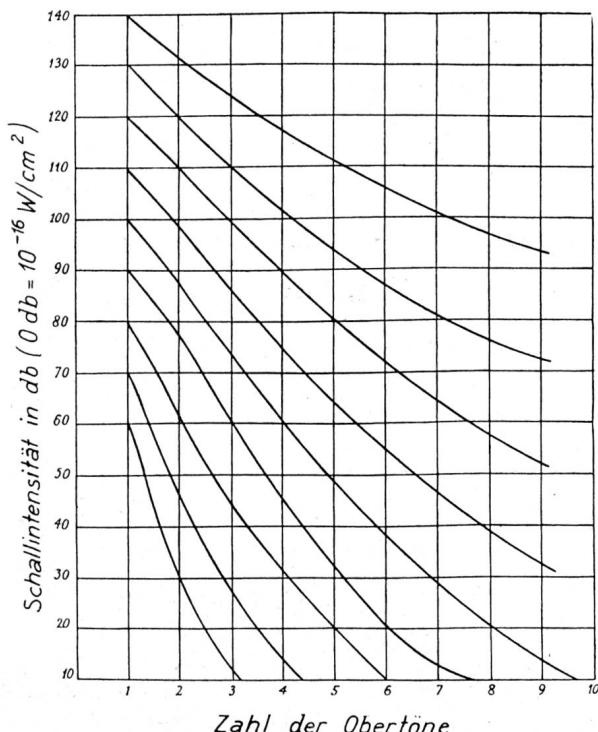


Abb. 19: Subjektive Obertöne in Funktion der Intensität (nach Fletcher).

sind dann am besten hörbar, wenn die Lautstärken des Suchtones und des Obertones gleich gross sind, so dass dann die Frequenz und die Stärke des Suchtones gleich denjenigen des Obertones sind und so ein Mass für diesen bilden. Auf diese Weise wurden die Lautstärken, bei denen diese subjektiven Obertöne einsetzen, bestimmt (Abb. 18). Ebenso sind die relativen Reizstärken bekannt (Abb. 19).

Die Entstehung dieser subjektiven Obertöne hat man anfänglich im Mittelohr gesucht, indem man ein nichtlineares Verhalten der Gehörknöchelchen vermutete. Neuere Untersuchungen ergaben aber mit ziemlicher Sicherheit, dass das Mittelohr noch vollständig linear arbeitet, so dass diese Obertöne im Innenohr gebildet werden müssen. Zur Durchführung dieser Untersuchungen bildet der Cochleaeffekt das geeignetste Mittel, da diese Spannungen den genau gleichen Effekt zeigen, wie er subjektiv schon lange bekannt war.

Ein weiterer eigenartiger Effekt beim Hören grosser Lautheiten ist die *Frequenzverschiebung*. Mittlere und tiefe Töne verschieben sich mit wachsender Lautheit nach unten, hohe Töne nach oben (Abb. 20 und 21). Bei tiefen Frequenzen kann die Verschiebung bis zu einem ganzen Ton gehen. Solche Verschiebungen findet man bei allen schwingungsfähigen Systemen, wenn sie mit so grossen Amplituden schwingen, dass die Rückstellkraft nicht mehr proportional der Auslenkung ist. Bei einer Stimmgabel nimmt dabei die Rückstellkraft weniger als proportional zu, die Eigenfrequenz steigt also, wogegen bei

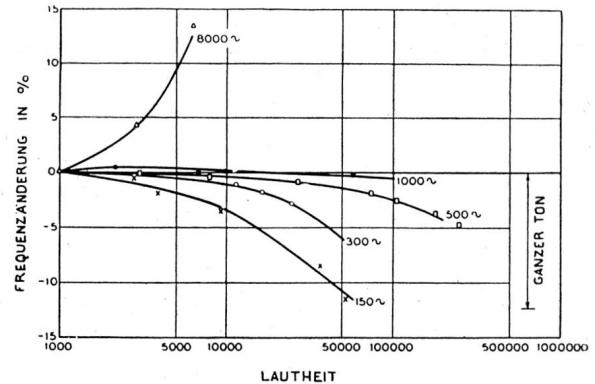


Abb. 20: Subjektive Frequenzverschiebungen in Funktion der Lautheit (nach Fletcher).

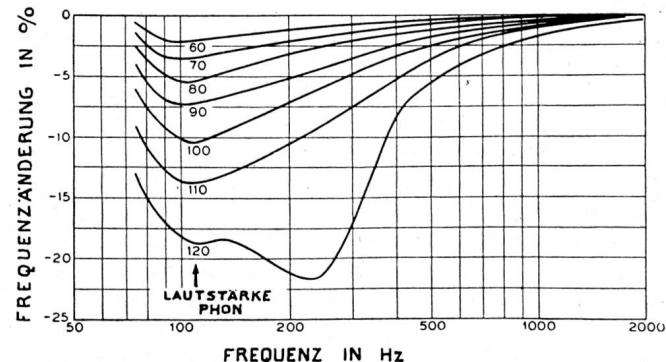


Abb. 21: Subjektive Frequenzverschiebungen in Funktion der Lautstärke (nach Show).

einer schwingenden Saite das Gegenteil der Fall ist. Die Ohrresonatoren für tiefe Frequenzen zeigen also das Verhalten von Saiten, diejenigen für hohe Frequenzen können mit Stimmgabeln verglichen werden. Diese Frequenzverschiebungen wirken sich dann aus, wenn beispielsweise ein Konzert über ein Uebertragungssystem übertragen und mit einer wesentlich kleineren Lautstärke wiedergegeben wird.

2. Tongemische.

Reine, d. h. sinusförmige Töne, kommen in der Sprache und in der Musik höchst selten vor. Praktisch hat man es fast ausschliesslich mit *Klängen* zu tun, d. h. harmonischen Tongemischen, die neben der Grundfrequenz noch eine ganze Reihe von harmonisch liegenden Obertönen aufweisen, deren Stärke die *Klangfarbe* bestimmt. Neben dem Grundton f_1 sind die Obertöne $f_2 = 2 f_1$, $f_3 = 3 f_1$, $f_4 = 4 f_1$ usw. vorhanden.

Die Frage, wie das Ohr auf diese zusammengesetzten Klänge reagiert, wurde zuerst von Ohm (1843) untersucht, der das berühmte „Ohmsche Gesetz der Akustik“ fand, das später von Helmholtz folgendermassen formuliert wurde: „Das menschliche Ohr empfindet nur eine pendelartige Schwingung der Luft als einfachen Ton, jede andere periodische Luftbewegung zerlegt es in eine Reihe von pendelartigen Schwingungen und empfindet die diesen entsprechende Reihe von Tönen“. Schon Ohm hat also klar erkannt, dass das Ohr wie ein Fourier-Analysator arbeitet.

Wie wir bereits gesehen haben, gilt das Ohmsche Gesetz nur für kleine Lautstärken. Bei grösseren Lautstärken empfindet das Ohr auch eine pendelartige Schwingung der Luft nicht mehr als reinen Ton, infolge des Auftretens der im Innenohr entstehenden Obertöne.

Beim Auftreffen eines Tongemisches auf das Ohr haben die nichtlinearen Eigenschaften des Ohres subjektiv die Bildung von sog. Kombinationstönen zur Folge, wobei zwischen Differenztönen und Summationstönen unterschieden werden kann. Die Frequenz der Kombinationstöne f_k ist bestimmt durch

$$f_k = m.f_1 \pm n.f_2 \quad (m, n, \text{ganze Zahlen})$$

wobei f_1 und f_2 die Frequenz der Primärtöne bedeuten. Besonders ausgeprägt ist gewöhnlich der erste Differenzton $f_1 - f_2$ und weniger stark der erste Summationston $f_1 + f_2$. Bei einem Klang, der also nur aus harmonisch liegenden Teilkomponenten besteht, fallen die Kombinationstöne immer mit bereits vorhandenen Primärkomponenten zusammen und sind daher ohne Bedeutung.

Verdeckungseffekt.

Die resultierende Lautheit mehrerer Töne kann einfach berechnet werden, indem ihre Lautheiten (nicht Lautstärken!) addiert werden. Dies geht daraus hervor, dass die Zahl der Lautheitseinheiten proportional der Zahl der erregten Nervenimpulse ist. Voraussetzung dabei ist, dass die Töne genügend weit auseinanderliegen (mehr als 500 Hz). Bei nahe beieinanderliegenden Tönen zeigt sich nämlich der sog. *Verdeckungseffekt*. Das Zustandekommen dieses sehr wichtigen Effektes ist durch die Eigenschaften der Schnecke und besonders der Nerven erklärlich. Wenn

die Basilarmembran auf einer bestimmten Breite, die von der Lautstärke abhängt, durch einen Ton erregt wird, wird ein zweiter, schwächerer Ton, dessen Frequenz in der Nähe des ersten Tones liegt, nicht gehört werden können, da die betreffenden Nervenfasern bereits durch den ersten, stärkeren Ton in Anspruch genommen sind. Der zweite Ton wird also durch den ersten Ton „verdeckt“. Da, wie wir gesehen haben, ein tiefer Ton auf der Basilarmembran mehr Platz braucht als ein hoher Ton gleicher Lautstärke, so ist zu erwarten, dass hauptsächlich tiefe Töne die höhern, aber weniger hohe Töne die tiefen verdecken. Dies ist auch tatsächlich der Fall. Das Mass für die Verdeckung ist der Verdeckungsgrad; er wird in db ausgedrückt und gibt an, um wieviele db die Intensität des verdeckten Tones erhöht werden muss, damit er gerade gehört werden kann. Der Verdeckungsgrad entspricht also der Erhöhung der Reizschwelle durch den verdeckenden Ton.

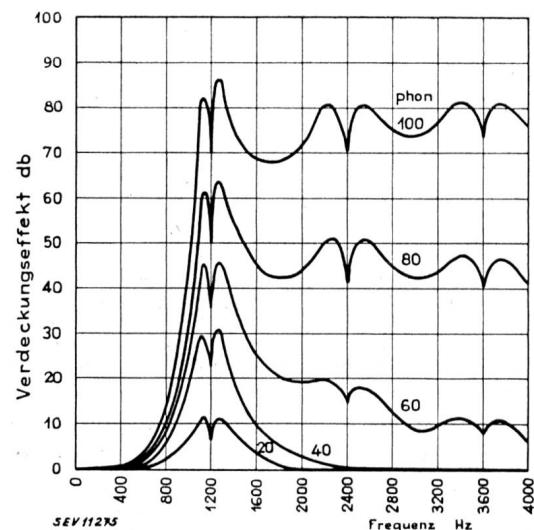


Abb. 22: Verdeckungseffekt; verdeckender Ton: 1200 Hz, Lautstärke 20—100 Phon (nach Fletcher).

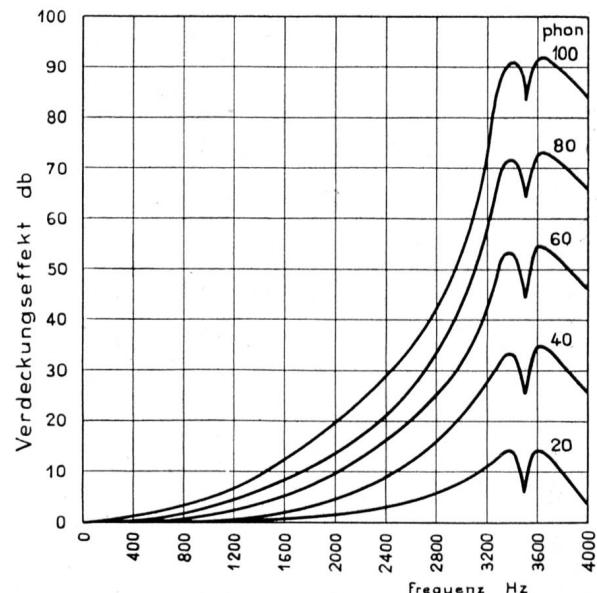


Abb. 23: Verdeckungseffekt; verdeckender Ton: 3500 Hz, Lautstärke 20—100 Phon (nach Fletcher).

Die Abb. 22 und 23 zeigen, dass der Verdeckungseffekt abnimmt, wenn die Frequenzen der beiden Töne sehr nahe beieinanderliegen. Dies ist auf das Auftreten von *Schwebungen* zurückzuführen, die davon herrühren, dass das Ohr eine endliche Analysierschärfe besitzt. Aus der allgemeinen Wellenlehre ist ja bekannt, dass die Frequenz einer Schwingung um so genauer bestimmt werden kann, je mehr Zeit dazu zur Verfügung steht oder umgekehrt, dass die Analyse um so ungenauer wird, je schneller der Analysator arbeitet. Da das Ohr auch kurz dauernde Töne analysieren kann, wie wir anschliessend sehen werden, muss es also eine endliche Analysierschärfe aufweisen, die bewirkt, dass sehr nahe beieinanderliegende Töne nicht mehr getrennt werden können und als Schwebungen gehört werden.

Der Verdeckungseffekt ermöglicht auch das mühelose Abgleichen von Tonfrequenz-Messbrücken mit dem Ohr. In den meisten Fällen sind neben dem Grundton, bei dem die Brücke abzulegen ist, noch Obertöne vorhanden, für die die Brücke nicht im Gleichgewicht ist. Da sie jedoch höher sind als der Grundton, verdecken sie diesen nicht und stören daher auch nicht, obschon sie viel stärker sein können als der Grundton selbst.

Wenn die resultierende Lautheit von Klängen oder Geräuschen ausgerechnet werden muss, die aus mehreren Tönen bestehen, so sind die dabei auftretenden Verdeckungseffekte zu berücksichtigen. Wenn die Frequenzabstände zwischen den einzelnen Komponenten nirgends kleiner als 500 Hz sind, treten keine Verdeckungseffekte auf, so dass die einzelnen Lautheiten, wie bereits bemerkt, ohne weiteres addiert werden können. Bei kleinen Frequenzabständen ist die rechnerische Berücksichtigung des Verdeckungseffektes jedoch möglich. Die Abb. 24 zeigt als Beispiel die resultierende Lautheit von 10 gleichlauten Einzeltönen mit verschiedenen Frequenzabständen.

Auch der Verdeckungseffekt von Geräuschen, die nicht aus einzelnen Frequenzen bestehen, sondern kontinuierliche Spektren aufweisen, kann gerechnet werden. Ein Beispiel stellt die Abb. 25 dar, die den Verdeckungseffekt für ein Geräusch mit gleichmässiger Energieverteilung zeigt. Diese Werte werden

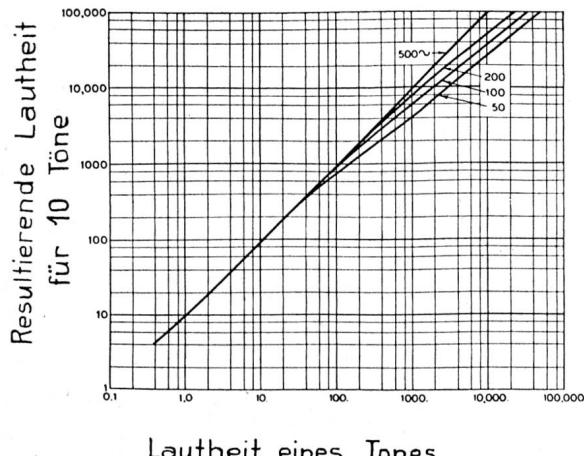


Abb. 24: Resultierende Lautheit von 10 gleichlauten Einzeltönen mit verschiedenen Frequenzabständen (50, 100, 200, 500 Hz) in Funktion der Lautheit eines Tones (nach Fletcher).

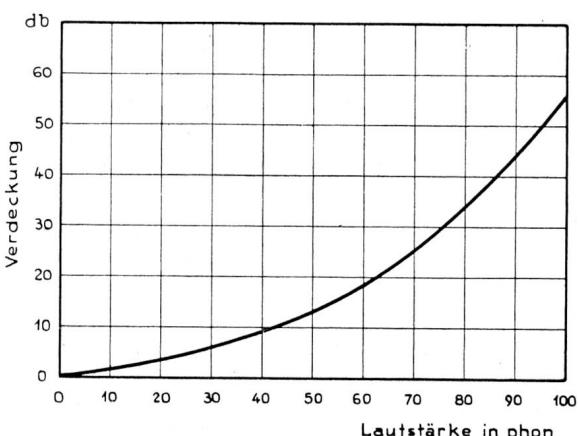


Abb. 25: Verdeckungseffekt eines Geräusches mit gleichmässiger Energieverteilung (Rauschen) (nach Fletcher).

benutzt, um den Einfluss einer lärmigen Umgebung beim Telephonieren abzuschätzen.

Das Residuum.

Ein geübtes Ohr ist imstande, einen aus verschiedenen Komponenten bestehenden Klang in seine Teiltöne zu zerlegen. Im allgemeinen empfindet man jedoch nur eine einzige Tonhöhe, nämlich diejenige des Grundtons. Es ist nun bemerkenswert, dass sich die Tonhöheempfindung nicht ändert, wenn die Lautstärke des Grundtons kleiner als die der Obertöne ist, ja sogar wenn der Grundton überhaupt fehlt. Besonders deutlich ist dies auch bei einer gewöhnlichen

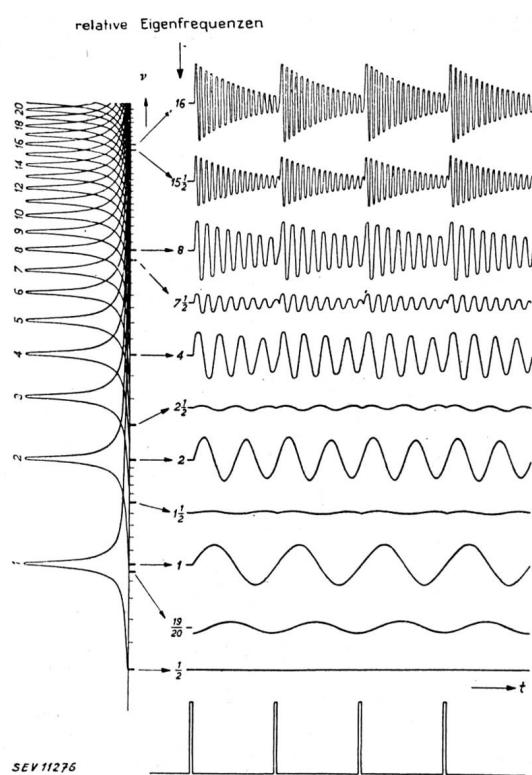


Abb. 26: Die Wirkung periodischer Impulse (obertonreiches Spektrum) auf die Resonanzkurven des Innenohrs. Durch die Überlappung der Kurven erscheint bei den höheren Obertönen die Frequenz des Grundtones wieder. Dieser Effekt ist das sog. Residuum (nach Schouten).

Telephonverbindung, bei der Frequenzen unter 300 Hz oft nicht mehr übertragen werden, ohne dass die Stimmhöhe eines Sprechers dadurch merklich verändert wird. Dabei liegen alle Grundtöne der männlichen Stimme im nichtübertragenen Frequenzbereich unter 300 Hz. Dieser Effekt kann durch die subjektiven Obertöne erklärt werden, da der Grundton ja gleich dem ersten Differenzton des zweiten und dritten Obertones usw. ist. Man kann jedoch zeigen, dass sich der Effekt dadurch nicht erschöpfend erklären lässt; so kann man beispielsweise ausser dem Grundton auch noch mehrere niedrige Obertöne abschneiden, ohne dass die empfundene Tonhöhe ändert. Schouten zeigte nun, dass bei den höhern Harmonischen, wo sich die Resonanzkurven der Basilarmembran stark überlappen, wieder die Frequenz des Grundtons zum Vorschein kommen muss (Abb. 26). Er nennt diese im Ohr gebildete Komponente „Residuum“.

Die Annahme von Schouten setzt nun voraus, dass das Gehörzentrum des Gehirns die ihm auf diese Weise vermittelte zeitliche Charakteristik verwertet, d. h. hören kann. Das Residuum wird ja in einem Gebiet der Basilarmembran gebildet, das normalerweise nur für den Empfang der höhern Obertöne bestimmt ist, so dass dort ein Höreindruck des tiefern Grundtones nur dann entstehen kann, wenn das Gehirn nicht nur die Zahl der erregten Nervenreize, die ein Mass für die Lautheit der Obertöne sind, sondern auch deren zeitliches Eintreffen registrieren kann. Die früher erwähnte Annahme Fletchers, dass auch für Töne unter etwa 100 Hz die zeitliche Charakteristik massgebend sein müsse, erfährt dadurch eine Stützung. Vom nervenphysiologischen Standpunkt aus erscheint dies möglich, wie bereits dargestellt wurde.

B. Nichtstationäre Schalle.

Das Ohr zeigt sowohl beim Einschalten als auch beim Ausschalten eines Tones eine gewisse Trägheit. Nach dem Einschalten eines Tones dauert es etwa 0,2 s bis die volle Lautstärke empfunden wird (Abbildung 27). Unmittelbar darauf beginnt sich bereits die Ermüdung bemerkbar zu machen, welche sich in einem allmählichen Absinken der Lautstärke äussert. Auch nach dem Ausschalten eines Reizes hört die Empfindung nicht plötzlich auf, sondern klingt in etwa 0,3 bis 0,5 s auf Null ab (Abb. 28). Dabei ist diese Ausklingzeit noch von der Dauer und der Stärke der vorausgegangenen Erregung abhängig. Die Aus-

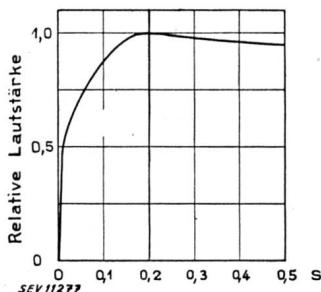


Abb. 27: Zunahme der Lautstärke eines Tones nach dem Einschalten (nach Békésy).

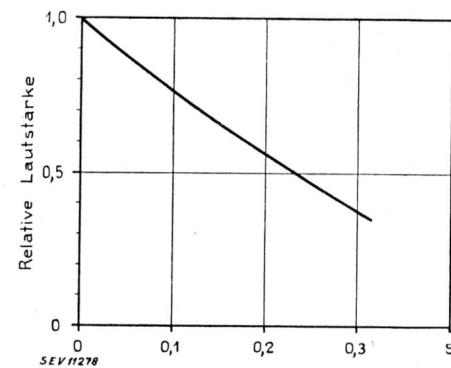


Abb. 28: Abnahme der Lautstärke eines Tones nach dem Ausschalten (nach Steudel).

wertung dieser Einschwingvorgänge ergibt für das Ohr eine Zeitkonstante von ungefähr 50 ms, ein Wert, der für die Konstruktion von objektiven Geräuschmessern (Phonmetern) wertvoll ist.

Besonders interessant ist nun das Verhalten des Ohres gegenüber sehr kurzzeitigen Schallereignissen, wie Knacken und Knallen. Steudel hat für einmalige Knacke gefunden, dass für die dabei empfundene Lautstärke diejenige Zeitspanne von 0,3 ms Dauer massgebend ist, während der die grösste mittlere Druckänderung auftritt. Meist sind dies gerade die ersten 0,3 ms des Knackes oder Knalles, so dass der ganze übrige zeitliche Verlauf für die empfundene Lautstärke völlig belanglos ist (Abb. 29). Dies ermöglicht die Berechnung der Lautstärke für einen Knack oder Knall, dessen zeitlicher Verlauf bekannt ist. Bei wiederholten Knacken steigt die Lautstärke dann weiter an, und zwar bis um etwa 10 Phon bei 50 Knacken pro s, von wo an sie konstant bleibt.

Bürk, Kotowski und Lichte fanden später, dass sich die Lautstärke von Knacken auch mit Hilfe des

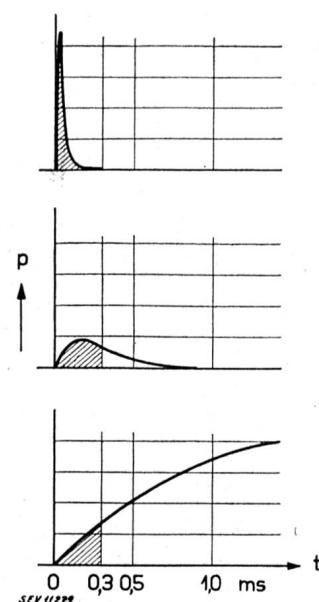


Abb. 29: Schalldruckverlauf von drei Einzelknacken der gleichen Lautstärke 165 Phon. Nur die ersten 0,3 ms (schraffierte Flächen) sind für die empfundene Lautstärke massgebend, der spätere Verlauf ist belanglos (nach Steudel).

Fourier-Integrals analytisch berechnen lasse. Ferner haben sie die minimale Dauer von Tönen bestimmt, die nötig ist, damit die Tonhöhe gerade noch erkannt werden kann (Abb. 30). Sie konnten nachweisen, dass diese Zeit so lang sein muss, bis dass in der Nachbarschaft des Tones ($\pm 2\%$) ein zur Tonerkennung genügender Anteil der Gesamtenergie ($\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{10}$) konzentriert ist. Die zur Tonerkennung erforderlichen minimalen Zeitdauern sind also eigentlich nicht durch die Eigenschaften des Ohres gegeben, sondern durch die allgemeinen Gesetze der Schwingungslehre.

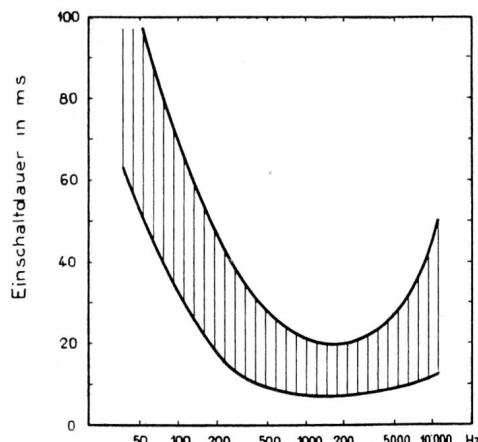


Abb. 30: Zur Erkennung der Tonhöhe notwendige Einschaltzeiten von Tönen (nach Bürk, Kotowski, Lichte).

gungslehre. Ein unendlich kurzer Impuls eines Tones ist in seiner Frequenz unbestimmt, da das Spektrum dieses Impulses alle Frequenzen mit gleicher Intensität enthält. Wenn der Impuls länger wird, so wird sein Spektrum immer schmäler und ein immer grösserer Anteil der Gesamtenergie wird in der Nähe der Frequenz des geschalteten Tones konzentriert. Wenn der Ton unendlich lange dauert, so enthält sein Spektrum nur eine einzige Frequenz. Streng genommen ist es also nur bei einem unendlich lang dauernden Ton überhaupt physikalisch möglich, seine Frequenz genau anzugeben.

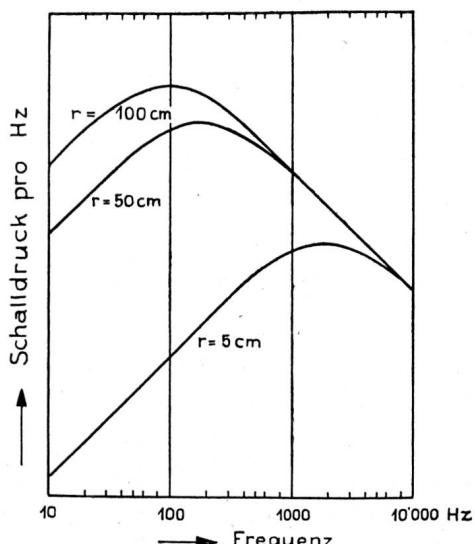


Abb. 31: Schallspektren von idealen Knallen (nach Weber).

Ein *Knall* kann am einfachsten analytisch erfasst werden, indem man eine Kugel (Radius r) mit einem bestimmten Ueberdruck annimmt, die plötzlich sich selbst überlassen wird, ähnlich einem Kinderballon, der platzt. Der entstehende Druckausgleichsvorgang kann dann gerechnet werden. Das Schallspektrum dieses Vorganges zeigt die Abb. 31; es geht daraus hervor, dass sich das Spektrum mit zunehmendem Kugelradius nach tiefen Frequenzen verschiebt. Das Maximum liegt bei der Frequenz, bei der die Wellenlänge gleich dem 3,5fachen Kugelradius ist.

Bei einer wirklichen Explosion (Detonation einer Bombe, Mündungsknall einer Kanone usw.) breiten sich die Explosionsgase in der Nähe des Herdes zunächst mit sehr grossen Geschwindigkeiten (Grössenordnung 10^4 m/s) aus, wobei ausserordentlich hohe Drucke und Temperaturen auftreten, die Zerstörungen zur Folge haben. Mit zunehmender Entfernung nimmt der Druck rasch ab, bis er einen Wert erreicht, wie er für die Gültigkeit der Schallgesetze (lineares Verhalten der Luft) noch zulässig ist; diesen Druck bestimmte Weber zu etwa $150\,000\,\mu\text{b}$ (ca. 0,15 at). Die Entfernung vom Explosionsherd, bei der dieser Druck erreicht wird, entspricht dann dem Radius r der erwähnten hypothetischen Kugel, so dass dieser durch die Energie der Explosion bestimmt ist. Bei der Detonation einer schweren Fliegerbombe tritt in 50 m Entfernung noch ein Druck von 3 at auf; daraus bestimmt sich der Kugelradius r zu 1000 m und die Frequenz, bei der das Maximum der Energie liegt, zu etwa 0,1 Hz. Im Gegensatz dazu beträgt r für den Mündungsknall einer Pistole etwa 10 cm, so dass das Energiemaximum nun bei 1000 Hz liegt. Diese Beziehungen sind besonders wichtig für Gehörschädigung durch Knalle. Ein energiereicher Knall (Beispiel: Fliegerbombe) wird hauptsächlich das Mittelohr schädigen, indem durch die grossen Amplituden das Trommelfell reissen und die Gehörknöchelchen beschädigt werden können. Ein energieärmerer Knall (Beispiel: Mündungsknall, Kopfwelle eines mit Ueberschallgeschwindigkeit fliegenden Geschosses oder auch Peitschenknall, der durch Ueberschallgeschwindigkeit des Endes der Peitschenschnur entsteht) hat sein Energiemaximum bei hohen Frequenzen. Diese werden vom Mittelohr noch gut übertragen; die im Innenohr entstehenden Flüssigkeitswirbel, die Békésy beobachtet hat, schädigen jedoch das Cortische Organ und können sogar zu einer Zerstörung des ganzen Ductus cochlearis führen. Verletzungen dieser Art sind typisch für Kanoniere von Panzer- und Fliegerabwehrgeschützen, die sich durch eine hohe Anfangsgeschwindigkeit und entsprechend starken Mündungsknall auszeichnen.

Der Einfluss der Phasenlage.

Die Wirkungsweise des Innenohres als Analysator bringt es mit sich, dass bei stationären zusammengesetzten Klängen oder Geräuschen die gegenseitige Phasenlage der einzelnen Komponenten belanglos ist. Es lässt sich sehr leicht experimentell zeigen, dass die Phasen der Obertöne eines Klanges beliebig verschoben werden können, ohne dass das Ohr etwas hört. Das Ohr spricht also nicht auf das Oszillogramm eines Schallereignisses an, sondern auf das Teiltonspektrum,

das keine Angaben über die Phase der Teiltöne enthält (Abb. 32).

Einzig bei sehr grossen Lautstärken ist ein geringer Einfluss der Phase nachweisbar. Diese Unabhängigkeit von der Phasenlage verleiht dazu, dem Phasengang von elektrischen Uebertragungssystemen ebenfalls keine Aufmerksamkeit zu schenken. Dies ist so lange am Platze, als nur stationäre Vorgänge betrachtet werden. Bei sehr vielen Schallereignissen ist es aber gerade der nichtstationäre Anteil (Ein- und Ausschwingvorgänge), der für den Schalleindruck

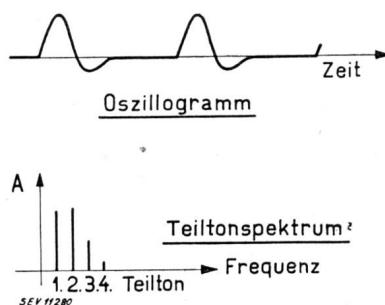


Abb. 32: Verschiedene Darstellungsweisen eines Schwingungsvorganges oder eines Schallereignisses: Das Oszillogramm und das Teiltonspektrum; dieses sagt nichts aus über die Phasenlage der Teiltöne.

entscheidend ist. Ganz besonders gilt dies für die Uebertragung der Schlaginstrumente (Pauke, Trommel, Schlagzeug usw.) sowie allgemein für impulsähnliche Geräusche (Schüsse usw.). Nach Steudel ist, wie bereits erwähnt, die Lautstärke solcher Vorgänge durch die Schalldruckänderung in den ersten 0,3 ms bestimmt, so dass es darauf ankommt, während dieser sehr kurzen Zeitspanne das ganze Spektrum zu übertragen, das den Ausgleichsvorgang enthält. Dies ist besonders schwierig für die tiefen Frequenzen, wo schon kleine Phasendrehungen des Uebertragungssystems grosse Laufzeitunterschiede ergeben.

Wenn wir ein ganzes Uebertragungssystem betrachten, so zeigt sich, dass die linearen und nicht-linearen Verzerrungen meist durch die elektroakustischen Wandler, das Mikrophon und den Lautsprecher, bzw. Telephon, gegeben sind, wogegen die Verstärker und Leitungen, sowie eventuell Radiosender und -empfänger verhältnismässig leicht verzerrungsfrei gebaut werden können. Für den Phasengang liegen aber die Verhältnisse gerade umgekehrt; das Mikrophon (besonders das Kondensatormikrophon) und der Lautsprecher haben meist sehr geringe Phasenverzerrungen, im Gegensatz zu den Leitungen und Verstärkern, die einen starken Phasengang, namentlich bei den tiefen Frequenzen, aufweisen. Dies erklärt die Tatsache, dass impulsartige Geräusche oft so schlecht wiedergegeben werden.

C. Das zweiohrige Hören.

Das Zusammenwirken der beiden Ohren ermöglicht es, die Richtung einer eintreffenden Schallwelle festzustellen. Nur durch Schallquellen, die in der Symmetrieebene durch den Kopf liegen, werden an beiden Ohren genau die gleichen Reize erzeugt. Wird die Schallquelle seitlich verschoben, so trifft die Schall-

welle an beiden Ohren nicht mehr mit der gleichen Intensität und nicht mehr zur gleichen Zeit ein. Diese Intensitäts- und Zeitunterschiede werden nun beim zweiohrigen Hören für die Lokalisierung der Schallquellen ausgenutzt.

Die Zeitdifferenz ergibt sich sofort aus dem Wegunterschied der beiden Ohren; sie beträgt etwa 0,1 ms für eine Abweichung von 10° von der Symmetrieebene und etwa 0,8 ms für eine solche von 90°. Infolge der nur wenige cm betragenden Länge des Hörnerven erreicht eine Reizwelle das Gehirn in einer unter 1 ms liegenden Zeit, trotz der kleinen Nervenfortpflanzungsgeschwindigkeit. Es erscheint also durchaus möglich, dass Zeitdifferenzen in der Grössenordnung von 0,1 ms vom Gehirn festgestellt werden können.

Der entstehende Intensitätsunterschied zwischen beiden Ohren bei seitlich liegender Schallquelle entsteht durch die vom Kopfe bewirkten Beugungerscheinungen und ist daher frequenzabhängig. Unter 300 Hz ist er sehr klein; für die wichtigsten Frequenzen der Sprache im mittleren und oberen Frequenzbereich beträgt er im Mittel etwa 7 db bei Abweichungen der Schallquelle von 60—90°. Daraus geht hervor, dass tiefe Töne nur durch die Zeitdifferenzen lokalisiert werden können. Bei einem stationären Schall kann man jedoch nicht mehr von Zeitdifferenzen, sondern nur noch von Phasenunterschieden sprechen, so dass es für die Lokalisierung eines tiefen, stationären Tones nötig ist, dass durch die beiden Ohren eine Phasendifferenz registriert werden kann. Diese Möglichkeit ist aber nur dann gegeben, wenn das Gehirn auch auf die zeitliche Charakteristik der Nervenimpulse reagiert, wie dies Fletcher und Schouten für tiefe Frequenzen voraussetzen. Tatsächlich ist die Lokalisierung eines stationären Tones oder Klanges tiefer Frequenz recht schwierig, im Gegensatz zu einem nichtstationären Geräusch. Ein Beispiel dafür bildet das Hören einer Luftsichtsirene: Solange sie gleichmässig läuft (Endalarm), ist die Feststellung der Richtung des Schalles unsicher; sobald sie aber abgeschaltet wird und ausläuft, wird die Richtungsempfindung sofort ganz scharf. Im ersten Fall stehen für ihre Lokalisierung hauptsächlich Phasendifferenzen zur Verfügung, im zweiten Fall jedoch Zeitdifferenzen. Kirchenglocken sind immer gut lokalisierbar, da ihr Klang nichtstationär ist.

Das Entstehen des Richtungseindruckes nach der Seite, also in einer waagrechten Ebene, ist auf diese Weise recht gut erklärbar. Weniger klar ist es jedoch, wie man „oben und unten“, sowie „vorn“ und „hinten“ feststellen kann. Sehr wahrscheinlich können wir diese Richtungen unterscheiden, indem wir den Kopf etwas schräg halten oder ihn unwillkürlich leicht hin- und herbewegen, womit im wesentlichen wieder die Verhältnisse für waagrechte Richtungen hergestellt werden.

D. Die Knochenleitung.

Durch direkte Anregung der Schädelknochen zu tonfrequenten Schwingungen werden ebenfalls Schallempfindungen ausgelöst; dieser Effekt wird als Knochenleitung bezeichnet, da hierbei die gewöhnliche Luftleitung über das Trommelfell und das Mittelohr wegfällt. Die Möglichkeit, auch ohne Mittelohr hören zu können, ist für Leute, deren Mittelohr

durch Krankheit oder Verletzung zerstört oder beschädigt ist, sehr wertvoll. Durch das Knochenhören entstehen vollkommen normale Tonempfindungen, wie Messungen der Hörfläche und auch Verständlichkeitsmessungen gezeigt haben (Watson).

Selbstverständlich ist die absolute Empfindlichkeit bei der Knochenleitung wesentlich geringer als bei der Luftleitung. Für einen Knochenhörer mit einem Stempel von $0,665 \text{ cm}^2$, der mit 370 g auf die Stirne gedrückt wird, beträgt die gerade hörbare, effektive Amplitude (Reizschwelle) 10^{-8} cm bei 1000 Hz und 10^{-5} cm bei 100 Hz (Watson). Békésy hat die entsprechenden Kräfte gemessen, welche in der Größenordnung von 1 dyn bei 1000 Hz und 10^3 dyn bei 100 Hz liegen.

Durch die Knochenleitung wird die Basilarmembran in analoger Weise erregt, wie dies bei der Luftleitung der Fall ist. Dies lässt sich dadurch beweisen, dass man dem Ohr gleichzeitig den gleichen Ton über Knochenleitung und über Luftleitung zuführen kann und es dann gelingt, durch richtiges Einstellen von Amplitude und Phase eine vollständige Kompensation zu erreichen, so dass das Ohr trotz des Vorhandenseins von Luft- und Knochenschwingungen nichts hört (Békésy).

Die gleichartige Erregung der Basilarmembran sowohl durch den Steigbügel als auch durch Knochenleitung ist nicht ganz leicht verständlich. Sie beruht offenbar auf dem asymmetrischen Bau der beiden Schneckenhälften, da die Scala vestibuli durch das Mittelohr belastet ist und sich zudem hier auch noch der ganze Vestibularapparat mit seiner verhältnismässig beträchtlichen Flüssigkeitsmenge anschliesst. Auf diese Weise müssen dann bei einer Kompression des ganzen Felsenbeins in der Cochlea Strömungen der Lymphflüssigkeit auftreten, die offenbar analog

verlaufen wie bei einer Anregung durch die Fussplatte des Steigbügels. Auf diese Weise lässt sich auch erklären, dass bei einem entzündeten Mittelohr der Knochenleitungston lauter wird; durch die Entzündung leidet die Beweglichkeit der Gehörknöchelchen, und die erwähnte Asymmetrie wird vergrössert. Dieser Effekt tritt auch bei einem künstlichen Verschluss des Gehörkanals auf. Er ist wertvoll für die Diagnose von Ohrkrankheiten, da auf diese Weise leicht entschieden werden kann, ob es sich um eine Mittelohr- oder eine Innenohrschwerhörigkeit handelt.

In diesem Kriege werden durch die neuen Waffen mit grossen Anfangsgeschwindigkeiten und durch den gesteigerten Materialeinsatz überhaupt mehr Ohrverletzungen auftreten als je zuvor. Da das Ohr für unser emotionelles Erleben das wichtigste Sinnesorgan ist, werden diese vielen Ohrverletzungen zu einem traurigen sozialen Nachkriegsproblem werden. Die elektro-akustische Industrie kann durch Schaffung von guten Hörapparaten für Knochenleitung dazu beitragen, einem Teil dieser Unglücklichen wissentlich zu helfen.

Summarisches Literaturverzeichnis.

H. v. Helmholtz: „Die Lehre von den Tonempfindungen“, Braunschweig 1877.
 H. Fletcher: „Speech and Hearing“, New York 1929. Journ. Acoust. Soc. America 1930, 1937, 1938.
 G. v. Békésy: Phys. Zeitschrift 1928, 1929, 1930.
 — Akust. Zeitschr. 1936—1943.
 — El. Nachr. Techn. 1935.
 H. Davis: Journ. Acoust. Soc. America 1935.
 O. Ranke: Ergeb. Physiol. 1935.
 J. F. Schouten: Philips Techn. R. 1940.
 U. Steudel: Hochfreq.techn. u. El. Ak. 1933.
 N. A. Watson: Journ. Acoust. Soc. America 1937, 1938.
 Bürk, Kotowski, Lichte: El. Nachr. Techn. 1935.

Ueber die Qualität der telephonischen Uebertragung*.

Von Dr. H. Keller, Bern.

621.395.1

Bei der telephonischen Uebertragung kommt zu dem rein akustischen Vorgang der sprachlichen Verständigung ein elektroakustisches Verbindungsglied. Die Telephonanlage übernimmt vom schallübertragenden Medium der Luft am einen Ort einen Teil der Schallenergie des sprechenden Partners, verwandelt sie in elektrische Energie und gibt sie an einem weit entfernten Orte wiederum als Schall ab, direkt vor dem Ohr des zweiten Teilnehmers. Die Qualität der telephonischen Uebertragung wäre offenbar dann vollkommen, wenn der Hörende in jedem Fall den Eindruck hätte, der Sprechende stehe direkt vor ihm. Mit dieser lapidaren Erklärung ist aber das ganze Problem der Qualität aufgeworfen, und ich will versuchen, Ihnen in der kurzen mir zur Verfügung stehenden Zeit die hauptsächlichsten Qualitätseigenschaften näher vorzulegen.

Da Zischlaute des menschlichen Stimmorgans Frequenzen bis über 12 000 Hz enthalten und die untersten Frequenzen der Männerstimme bis zu

80 Hz hinunterreichen, erscheint es von vornherein aussichtslos, höchster Qualität nachzustreben. Diesen Frequenzumfang vermittelt gerade noch die Rundsprachübertragung auf besten Musikleitungen.

Für die telephonische Uebertragung darf man sich auf das Hauptsprachgebiet von 200 bis etwa 2800 Hz beschränken, und man darf auch für die gesamte zwischen Mund und Ohr eingeschaltete Fernsprech-anlage eine hundertfache Schalldruckverminderung zulassen, ohne Gefahr zu laufen, die Uebermittlung von Sprache unzulässig zu beeinträchtigen. Das Verhältnis von 100:1 für den Schalldruck oder für die Spannung entspricht in Dämpfung ausgedrückt 4,6 Neper. Dies ist der höchstzulässige Dämpfungs-wert für das gesamte Telephonsystem samt der Einsprache und dem Abhören und wird als Maximalwert der zulässigen Bezugsdämpfung bezeichnet. Unter dem Telephonsystem versteht man dabei die gesamte Fernverbindung, bestehend aus Teilnehmerstation, Teilnehmerleitung, Ortszentrale, Bezirks-

* Dieser Vortrag wurde gehalten an der 2. Tagung für elektrische Nachrichtentechnik in Bern (4. Sept. 1943).