

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 34 (1943)

Heft: 22

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

Autor: Furrer, W.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1057761>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 24.12.2024

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:
Secrétariat de l'Association Suisse des Electriciens
Zurich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:
Zurich, Stauffacherquai 36 ♦ Téléphone 5 17 42
Chèques postaux VIII 8481

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXXIV^e Année

N^o 22

Mercredi, 3 Novembre 1943

Das Ohr und das Hören, eine Grundlage der Nachrichtentechnik

Vortrag, gehalten an der 2. Tagung für elektrische Nachrichtentechnik am 4. September 1943 in Bern,
von W. Furrer, Bern¹⁾

534.75
612.85

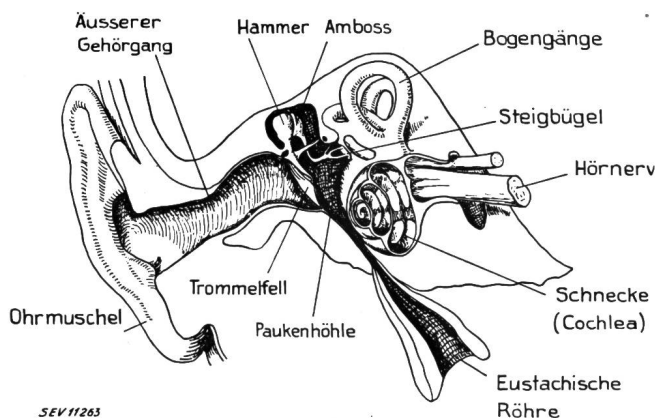
Der Bau und die Wirkungsweise des Ohres werden beschrieben. Behandelt werden die Eigenschaften des Ohres bei stationären Einzeltönen, bei mehreren gleichzeitig hörbaren stationären Tönen (Verdeckungseffekt, Residuum u. a.) und bei nicht stationären Schallereignissen.

Constitution et fonctionnement de l'oreille. Etude des propriétés de l'oreille pour des sons individuels stationnaires, pour plusieurs sons stationnaires audibles simultanément (effet couvrant, résidus, etc.) et pour des phénomènes sonores non-stationnaires.

Es gibt viele Zweige der Technik, die sich für die Physiologie von Sinnesorganen interessieren. Nirgends ist das aber so ausgeprägt der Fall, wie bei der elektrischen Fernmeldetechnik, und zwar ganz besonders bei Telefon und Radio. Diese beiden Uebertragungsmittel übertragen ja ausschliesslich Eindrücke, die für unser Ohr bestimmt sind, so dass durch die Eigenschaften des menschlichen Ohres auch die Übertragungstechnischen Grundlagen für Radiokanäle und Telephoniesysteme gegeben sind. Es muss allerdings noch beigefügt werden, dass beim Telefon zu den physiologischen Ueberlegungen noch wirtschaftliche Faktoren kommen, die sich dadurch ausdrücken, dass beim Telefon die Grenzen bedeutend enger gezogen werden müssen, als sie durch das Ohr an sich bedingt wären, so dass nur noch die Verständlichkeit des gesproche-

ten noch psychologische Ueberlegungen kommen, die aber hier nicht berührt werden können.

Damit wir die Eigenschaften des Ohres besser verstehen, müssen wir uns zunächst kurz mit dem Bau, der Anatomie des Ohres befassen. Die Organe des Gehörapparates zerfallen in drei Teile, die vollständig verschiedene Funktionen haben: Aussenohr, Mittelohr und Innenohr (Fig. 1).



SEV 11263

Fig. 1.

Schematisierte Darstellung der Gehörorgane (nach Körner)

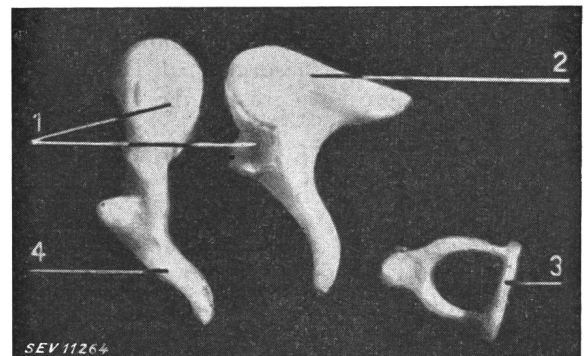


Fig. 2.

Die 3 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.)

nen Wortes als Qualitätskriterium bleibt. Die Verständlichkeit ist aber eine Funktion unseres Intellektes, so dass zu den physiologischen Gesichtspunk-

Das *Aussenohr* besteht aus der Ohrmuschel und dem Gehörgang. Der Gehörgang ist für den Fernmeldetechniker interessant, weil er die akustisch-mechanische Belastung eines Telephonhörers darstellt. Der Gehörgang ist an seinem Ende luftdicht abgeschlossen durch das *Trommelfell*, hinter welchem das Mittelohr liegt, das die Paukenhöhle mit den drei Gehörknöchelchen: Hammer, Amboss und Steigbügel, umfasst (Fig. 2). Das *Mittelohr* kommuniziert durch die Eustachische Röhre mit dem Rachen. Sie ist normalerweise verschlossen und öffnet sich nur während des Schluckens; dadurch können statische Druckdifferenzen auf beiden Seiten des Trommelfelles ausgeglichen werden. Das *Innen-*

¹⁾ Eine ausführliche Behandlung dieses Themas erscheint in den Techn. Mitt. Schweiz. Telegr.- und Teleph.-Verw. 1943, Nr. 6.

ohr, der wichtigste Teil des Ohres, besteht im wesentlichen aus der mit Lymphe gefüllten sogenannten Schnecke (Cochlea).

Die Aufgabe der 3 Gehörknöchelchen besteht hauptsächlich darin, die Schwingungen des Trommelfelles auf die Lympheflüssigkeit des Innenohrs zu

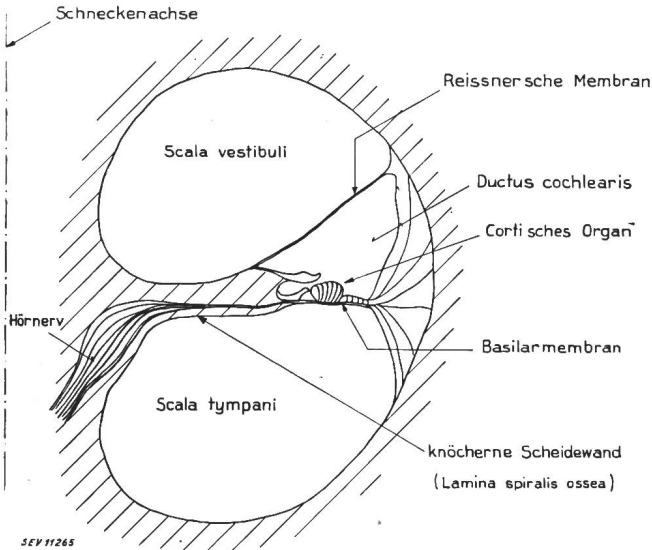


Fig. 3. Schnitt durch die Schnecke (nach Toldt)

übertragen. Da Luft ein schallweiches Medium mit einer kleinen akustischen Impedanz ist, eine Flüssigkeit aber eine viel höhere Impedanz aufweist, so ist eine Impedanz-Transformation nötig, die durch diese drei Knöchelchen besorgt wird. Die Knöchelchen sind sehr klein; das grösste, der Hammer mit seinem Stiel, ist nur etwa 1 cm lang.

Fig. 3 zeigt einen Schnitt durch eine Schneckenwindung. Die ganze Schnecke umfasst $2\frac{3}{4}$ Windungen, welche ihrer ganzen Länge nach durch die Schnecken-Trennwand in zwei Kanäle unterteilt sind, in die scala vestibuli und die scala tympani. Die Trennwand besteht zum Teil aus einem knöchernen, zum Teil aus einem häutigen Teil.

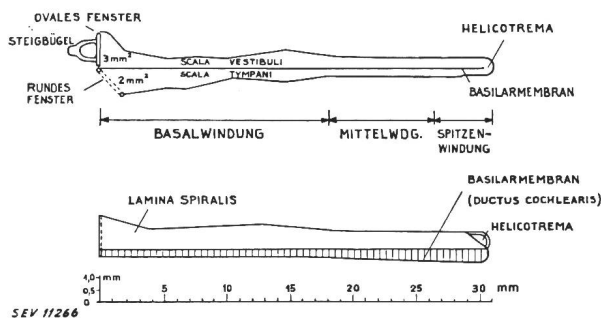


Fig. 4. Schematische Darstellung der abgewickelten Schnecke (nach Fletcher)

Wichtig für den Hörvorgang ist der häutige Teil mit der Basilar-membran, auf der das Cortische Organ liegt. Dieses Organ ist das eigentliche Transformationsorgan, das die physikalischen Reize in physiologische Erregungen umsetzt. Fig. 4

zeigt schematisch die abgewickelte Schnecke. Man erkennt den Steigbügel, der die scala vestibuli abschliesst und das runde Fenster, das wieder gegen die Paukenhöhle führt. Die Verbindung zwischen scala vestibuli und scala tympani wird über das Helicotrema hergestellt. Wenn Schallenergie auf das Trommelfell fällt, passiert folgendes: das Trommelfell wird zu erzwungenen Schwingungen angeregt; diese Schwingungen werden über die drei Gehörknöchelchen auf die Fussplatte des Steigbügels übertragen und es entstehen in der Schnecke Flüssigkeitsströmungen, die sich über das Helicotrema ausgleichen können und die die Basilar-membran bewegen, so dass das Cortische Organ gereizt wird. Dort entstehen Nervenreize, die ins Gehirn weitergeleitet werden, wo schliesslich der Höreindruck zustande kommt. Mit dem genaueren Verlauf dieses Prozesses befassen sich verschiedene Hörtheorien, auf die jedoch hier nicht näher eingegangen werden kann.

Wichtig ist vor allem die sogenannte «Einorts-Theorie», die auf Helmholtz zurückgeht. Sie behauptet, dass jede Frequenz nur eine ganz bestimmte Stelle der Basilar-membran erregt, und zwar so, dass tiefe Frequenzen die Basilar-membran in der Nähe des Helicotrema erregen, hohe Frequenzen dagegen in der Nähe des Steigbügels wirksam sind. In Fig. 4 sind einige Abmessungen der Schnecke eingetragen, die die Kleinheit dieses Organs erkennen lassen. Die grösste Länge der Basilar-membran beträgt nur etwa 3 cm, die grösste Breite 1 mm. Es handelt sich also um ausserordentlich kleine Gebilde, was verständlich macht, weshalb die genaue Erforschung der physikalischen Vorgänge in der Schnecke so schwierig ist. Wir können den Frequenzgang der Schnecke direkt aufzeichnen, das heisst, wir können angeben, welche Stellen der Basilar-membran die einzelnen Frequenzen erregen.

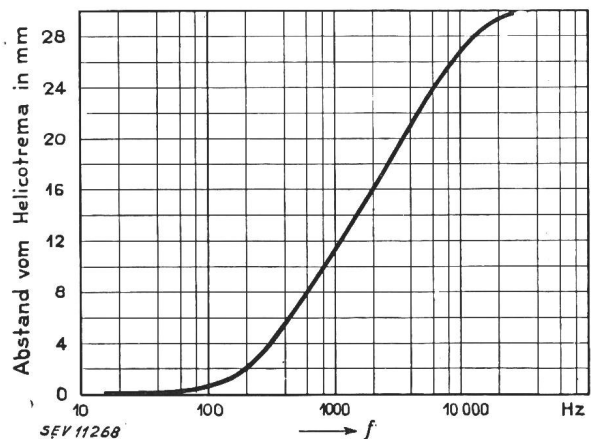


Fig. 5. Lage des Erregungsmaximums auf der Basilar-membran in Funktion der Frequenz (nach Fletcher)

(Fig. 5). Diese Beziehung lässt sich mit Tierversuchen nachprüfen, indem man durch einen sehr lauten Ton die Cochlea eines Tieres, beispielsweise eines Meerschweinchens oder einer Katze — die beide ähnliche Gehörgänge besitzen wie der Mensch

— schädigt und nachher histologisch untersucht, an welcher Stelle die Schnecke beschädigt wurde. Auch ein gestorbener Mensch, der an einem bekannten Gehördefekt gelitten hatte, bildet ein wertvolles Objekt für einen Ohrenforscher. Bemerkenswert ist, dass die Lage des Erregungsmaximums auf

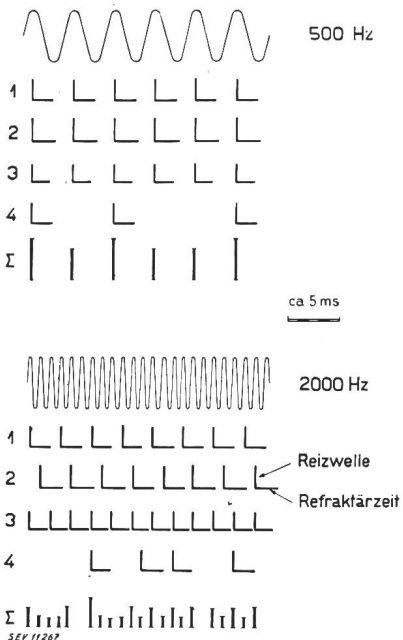


Fig. 6.
Erregung von 4 Nervenfasern durch reine Töne der Frequenzen 500 Hz und 2000 Hz (schematisch) (nach Davis)

der Basilarmembran unterhalb 100 Hz keine Ortsveränderung mehr zeigt, sondern dass alle tieferen Töne die Basilarmembran immer an derselben Stelle in der Nähe des Helicotremas zu erregen scheinen. Das steht offenbar im Widerspruch zu unsern Erfahrungen, da man ja unter 100 Hz noch sehr gut verschiedene Tonhöhen feststellen kann. Hiefür kann die Einorts-Theorie also keine befriedigende Erklärung bieten.

Damit kommen wir zu dem Problem der Nervenleitung. Wir haben gesehen, wie das Cortische Organ physikalisch erregt wurde, und wir müssen uns nun fragen, wie die Nervenleitung vor sich geht. Ein Nerv ist ein sehr kompliziertes Gebilde. Es ist nicht etwa so, dass ein Nerv eine Art von elektrischer Leitung wäre, auf der die sogenannten Nerven- und Aktionsströme fortgeleitet werden. Vielmehr ist die Fortpflanzung eines Reizes durch einen Nerven primär ein chemischer Vorgang, der im einzelnen noch nicht erforscht ist; die Aktionsströme selber sind nur sekundäre elektrische Erscheinungen. Man kann einen Nerven am besten mit einer Zündschnur vergleichen: wenn die Zündschnur gereizt, d. h. angezündet wird, dann pflanzt sich der Reiz fort; die Pulverseele brennt ab, und wenn sie einmal abgebrannt ist, kann die Zündschnur erst wieder verwendet werden, nachdem die Seele wieder ersetzt worden ist. Etwas ähnliches passiert im Nerven. Wenn ein Reiz dem Nerven entlanggelaufen ist, dann dauert es eine gewisse Zeit, bis der Nerv imstande ist, einen neuen Reiz aufzunehmen. In dieser Zeit, die man *Refraktärzeit* nennt, wird der chemische Vorgang wieder rückgängig gemacht. Die Refraktärzeit ist für die Physiologie des Ohres sehr

wichtig, weil durch sie die höchste Frequenz gegeben ist, die ein Nerv überhaupt weiterleiten kann. Die Refraktärzeit aller Nerven liegt nun in der Größenordnung einer Millisekunde (ms), so dass also keine höheren Frequenzen als etwa 1000 Hz übertragen werden können. Nun können wir aber auch wesentlich höhere Frequenzen als 1000 Hz hören, was aber durch die Einorts-Theorie zwanglos erklärt werden kann. Fig. 6 zeigt diese Verhältnisse schematisch. Die senkrechten Striche bezeichnen die Erregungen, die waagrechten Striche die Refraktärzeit. Man sieht, dass z. B. für eine Frequenz von 500 Hz die Summe der 4 Erregungen auch das zeitliche Bild von 500 Hz zeigt. Bei 2000 Hz ist diese Summe jedoch kein getreues Abbild dieser Frequenz mehr; es können z. B. Erregungen ausfallen; auch ändert sich das Bild mit der Amplitude der Schwingungen. Es ist also nicht anzunehmen, dass die zeitliche Charakteristik der Nervenimpulse irgendwie für die Tonempfindung wesentlich sein kann. Aus diesen Ueberlegungen ergibt sich folgendes: die Frequenz, also die Tonhöhe, die wir hören, ist bestimmt durch den Ort auf der Basilarmembran; die Zahl der Nervenfasern, die an der betreffenden Stelle der Basilarmembran gereizt werden, ist durch die Lautstärke gegeben, aber die Anzahl Nervenimpulse pro Sekunde kann im allgemeinen, wenn die Einorts-Theorie streng gilt, keine Rolle spielen.

Damit kommen wir zu den *Eigenschaften* des *Ohres*. Wenn die Tonhöhe durch den Ort auf der Basilarmembran bestimmt ist, dann funktioniert das Ohr offenbar als Analysator. Das Ohr analysiert jede zusammengesetzte Schwingung und hört direkt die einzelnen Teiltonkomponenten. Das ist schon eine recht alte Erkenntnis, die bereits Ohm im Jahre 1843 in seinem Ohmschen Gesetz der Akustik formuliert hat. Dieses Gesetz sagt, dass das Ohr nur einen rein sinusförmigen Ton als Einzelton hört und jeden komplizierten Klang in seine sinusförmigen Komponenten zerlegt. Das Ohr hört also nicht das Oszillogramm, sondern das Teiltonspektrum einer Schwingung.

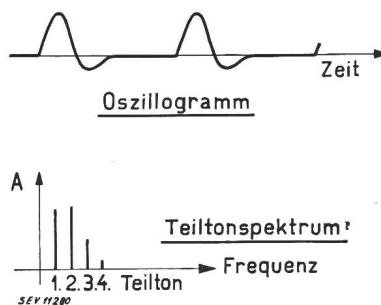
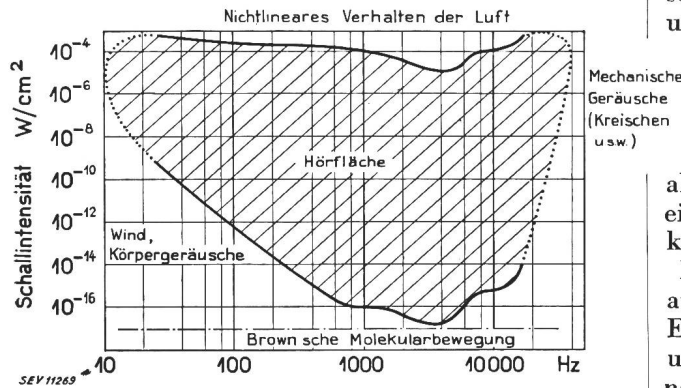


Fig. 7.
Verschiedene Darstellungsweisen eines Schwingungsvorganges oder eines Schallereignisses

Das Oszillogramm und das Teiltonspektrum; dieses sagt nichts aus über die Phasenlage der Teiltöne.

Es gibt zwei grundsätzlich verschiedene Darstellungsweisen eines Schwingungsvorganges. Wir können ihn als Oszillogramm, d. h. direkt als zeitliche Funktion darstellen, oder den Vorgang analysieren und die einzelnen Komponenten darstellen (Fig. 7). Dabei ist zu beachten, dass das Teiltonspektrum, im Gegensatz zum Oszillogramm, die gegenseitige Phasenlage der einzelnen Komponenten

nicht enthält. Daraus kann man schliessen, dass das Ohr für die gegenseitige Phasenlage der Komponenten eines zusammengesetzten Klages nicht empfindlich ist. Dies lässt sich auch ohne weiteres experimentell nachweisen. Dabei ist wichtig, dass das nur für *stationäre Klänge* gilt.



oder Körpergeräusche (Blutkreislauf, Verdauung usw.). Es wäre unangenehm und unnötig, wenn man diese dauernd hören würde. Die Empfindlichkeit des Ohres ist auch bei den hohen Frequenzen begrenzt, um uns gegen mechanisch erzeugte Geräusche, die meist sehr hohe Töne enthalten, zu schützen. Die obere Empfindlichkeitsgrenze liegt ungefähr da, wo die Luft beginnt, sich nicht mehr

Fig. 8. Die Hörfläche und ihre natürlichen Begrenzungen

Wenn wir untersuchen, wie gross die physikalischen Reize sind, die das Ohr gerade noch hört, so erhalten wir die Kurve Fig. 8. Daraus geht beispielsweise hervor, dass wir bei 1000 Hz noch eine Intensität von 10^{-16} W/cm² hören. Bei 100 Hz ist die gerade noch hörbare Intensität 10 000mal höher, nämlich 10^{-12} W/cm². Wenn die Intensität weiter gesteigert wird, kommen wir zu einer Grenze, wo die Hörempfindung in eine Schmerzempfindung übergeht. Es ist interessant, die *Hörfläche*, die durch diese beiden Grenzkurven begrenzt ist, in Beziehung zu den Energieverhältnissen unserer Umwelt zu setzen. Man kann sich fragen: weshalb ist die Empfindlichkeit des Ohres gerade so und warum ist das Ohr beispielsweise nicht noch empfindlicher? Wenn das Ohr nur ungefähr *eine* Grössenordnung empfindlicher wäre, so würden wir die Braunsche Molekularbewegung hören, was sicher sehr unangenehm wäre, da wir dann keine ruhige

als rein elastisches Medium zu verhalten und daher ein Schallereignis nicht mehr unverzerrt übertragen kann.

Neben der absoluten Empfindlichkeit des Ohres ist auch seine *differenzielle Empfindlichkeit*, d. h. die Empfindlichkeit auf Aenderungen der Intensität und der Frequenz wichtig. Fig. 9 zeigt die gerade noch hörbaren Intensitätsänderungen, aufgetragen in Funktion der Frequenz für verschiedene Intensitäten. Es geht daraus hervor, dass bei mittleren Frequenzen und Intensitäten die gerade noch hörbare Aenderung etwa 0,5 db beträgt, bei kleinen Intensitäten und tieferen Frequenzen steigt dieser Wert stark an. Daraus lassen sich nun die Anforderungen an Frequenzgänge von Uebertragungssystemen ableiten. Fig. 10 zeigt das gleiche für Frequenzänderungen: Es geht daraus hervor, dass bei höheren Frequenzen das Ohr für Frequenzänderungen sehr empfindlich ist und bereits Unterschiede von 0,2 % hören kann. Da 12 % das Intervall eines ganzen musikalischen Tones ist, ist eine Aenderung von 1/60 eines Tones bereits hörbar. Das ist wichtig, z. B. für Trägersysteme, bei denen nur *ein* Seitenband übertragen wird und bei denen man am Empfangsort die Trägerfrequenz wieder hinzufügen muss.

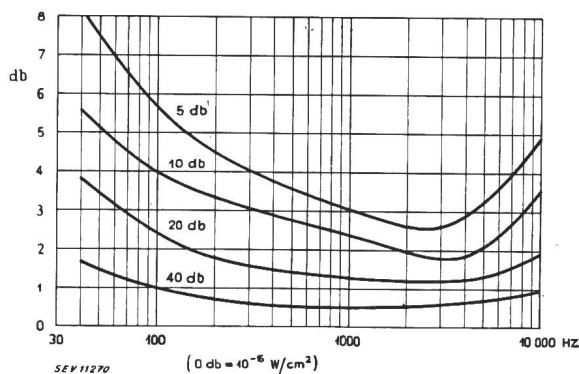


Fig. 9.

Gerade noch hörbare Intensitätsänderungen in db in Funktion der Frequenz für verschiedene Intensitäten (0 db = 10^{-16} W/cm²) (nach Fletcher)

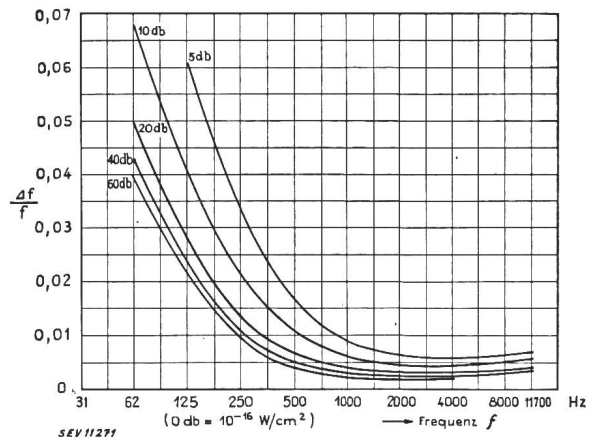


Fig. 10.

Gerade noch hörbare Frequenzänderungen in Funktion der Frequenz für verschiedene Intensitäten (0 db = 10^{-16} W/cm²) (nach Shower und Biddulph)

Stunde mehr im Leben hätten, es sei denn bei der Temperatur des absoluten Nullpunktes! Man kann sich auch fragen, weshalb die Empfindlichkeit gegen die tiefen Frequenzen so stark abnimmt und denkt dabei an tieffrequente Geräusche wie Wind

Definition der Lautstärke: Die Stärke der physiologischen Empfindung wird *Lautstärke* genannt. Da es sich dabei also nicht um eine physikalische Grösse handelt, kann die Lautstärke auch nicht direkt gemessen werden. Man hilft sich nun so,

dass man eine unbekannte Lautstärke L_x mit einem Normalschall der Frequenz 1000 Hz vergleicht, dessen Intensität I beträgt. Diese Intensität I wird so lange verändert, bis der Normalschall als gleich laut empfunden wird wie die unbekannte Lautstärke L_x . Das Ohr dient bei diesem Versuch also nur dazu, um zu entscheiden, wann der Normalschall I gleich laut wie die Lautstärke L_x empfunden wird. Die auf diese Weise gefundene Intensität I des Normalschalles ist dann ein Mass für die Lautstärke L_x , und zwar wird I mit Hilfe einer Bezugsintensität I_0 ausgedrückt.

$$L_x = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \text{ phon}$$

Die Bezugsintensität I_0 ist durch eine internationale Vereinbarung auf 10^{-16} W/cm^2 festgelegt worden; dieser Wert entspricht annähernd der statistisch ermittelten mittleren Reizschwelle bei 1000 Hz. Die so definierte Einheit der Lautstärke wird «phon» genannt.

Wenn nun alle innerhalb der Hörfläche liegenden physikalischen Reize mit diesem Vergleichsverfahren durchgemessen werden, dann erhält man die Kurvenschar Fig. 11. Man kann also aus dieser Kurvenschar für einen bestimmten physikalischen Reiz, der durch seine Intensität und seine Frequenz gegeben ist, die subjektive Empfindung in phon ablesen. Beispielsweise gibt ein Reiz von 10^{-8} W/cm^2 und 200 Hz eine Lautstärke von 78 phon.

Neben dem logarithmischen phon-Maßstab wird nun noch ein anderer Maßstab verwendet. Ein logarithmischer Maßstab ist wohl dem Fernmeldetechniker geläufig; vielen Leuten bietet jedoch das Rechnen damit Schwierigkeiten und führt zu unrichtigen Vorstellungen. Ferner zeigt es sich auch, dass das Weber-Fechnersche Gesetz der logarithmisch abgestuften Empfindung beim Ohr nur sehr

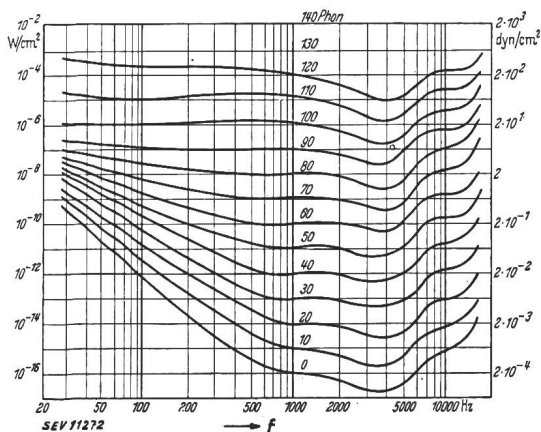


Fig. 11.
Die Kurven gleicher Lautstärke
(nach Fletcher und Munson)

unvollkommen erfüllt ist, so dass z. B. ein bestimmter, in phon ausgedrückter, Lautstärkeunterschied bei grossen Lautstärken subjektiv bedeutend weniger ausmacht, als bei kleineren Lautstärken. Diese Gründe führten zur Schaffung eines weiteren Maß-

stabes, des sogenannten *Lautheits-Maßstabes*. Der Lautheitsmaßstab ist so aufgebaut, dass einer subjektiv als Verdopplung empfundenen Lautheit auch eine Verdoppelung der Anzahl Lautheitseinheiten entspricht, so dass es ein «wahrer» Maßstab ist. Fig. 12 zeigt den für alle Frequenzen gültigen Zu-

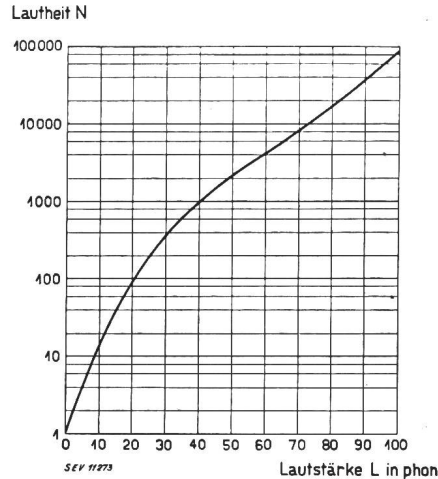


Fig. 12.
Lautheit in
Funktion der
Lautstärke
(nach Fletcher)

sammenhang zwischen der Lautstärke in phon und der Lautheit in Lautheitseinheiten, für die noch kein Name gefunden wurde. Beispielsweise geht daraus hervor, dass eine Lautstärkeerhöhung von 10 auf 20 phon subjektiv als eine Erhöhung von 1 : 7 empfunden wird, wogegen eine Lautstärkeerhöhung von 60 auf 70 phon subjektiv nur als Verdopplung empfunden wird. Im Gegensatz zum phon-Maßstab können die Lautheiten der einzelnen Komponenten eines zusammengesetzten Klanges oder Geräusches ohne weiteres direkt addiert werden, um die resultierende Lautheit zu finden, wobei lediglich noch eventuelle Verdeckungseffekte (s. unten) zu berücksichtigen sind. Als «wahrer» Maßstab steht der Lautheitsmaßstab in einer direkten Beziehung zum Hörvorgang, indem die Anzahl der Lautheitseinheiten direkt proportional der Anzahl der erregten Nervenfasern ist.

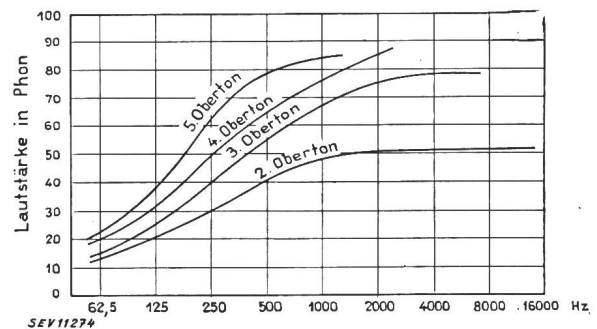


Fig. 13.
Schwellenintensität für subjektive Obertöne
(nach Fletcher)

Eine weitere wichtige Eigenschaft des Ohres ist die Bildung von subjektiven Obertönen. Wenn ein rein sinusförmiger Ton auf das Ohr fällt, werden im Ohr selbst Obertöne gebildet, und zwar von einer bestimmten Schwelle an, wie Fig. 13 zeigt. Bei

grösseren Intensitäten arbeitet das Ohr also nicht mehr linear, so dass das Ohmsche Gesetz der Akustik offenbar nur für kleine Intensitäten gelten kann. Neuere Untersuchungen lassen vermuten, dass das Mittelohr vollständig linear arbeitet und auch die Amplitude der Basilarmembran noch proportional zum Schalldruck ist, so dass also erst das Transformationsorgan nichtlinear arbeiten würde.

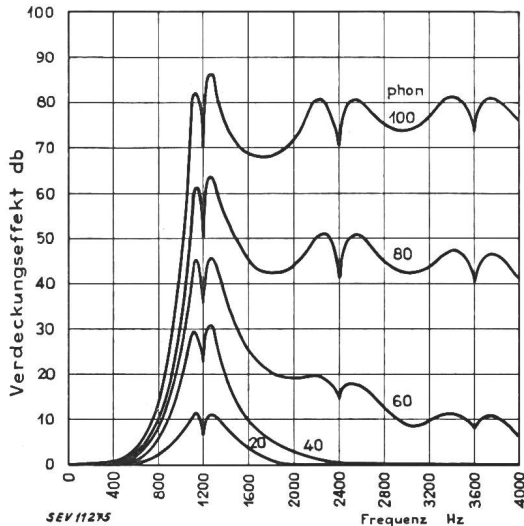


Fig. 14.
Verdeckungseffekt
verdeckender Ton: 1200 Hz; Lautstärke
20...100 phon (nach Fletcher)

Damit wären die wesentlichsten Eigenschaften des Ohres für stationäre Einzeltöne besprochen. Bei mehreren gleichzeitig hörbaren stationären Tönen tritt nun als wichtiger Effekt die *Verdeckung* auf. Ein Beispiel zeigt Fig. 14: Man hört einen Ton von 1200 Hz und einer Lautstärke von z. B. 100 phon. Daneben erklingt ein zweiter Ton, dessen Frequenz veränderlich ist. Wenn der zweite Ton eine Frequenz von weniger als etwa 400 Hz hat, dann ist er neben demjenigen von 1200 Hz sehr gut hörbar. Wenn aber die Frequenz des zweiten Tones steigt und sich der Frequenz von 1200 des ersten Tones nähert, dann wird jener plötzlich, etwa von 1000 Hz an, verdeckt. Man hört ihn nicht mehr, sondern nur noch den verdeckenden 1200-Hz-Ton. Wenn die Frequenz des zweiten Tones in die Nähe von 1200 Hz kommt, werden die bekannten Schwebungen hörbar. Das bedeutet, dass die Analysierschärfe des Ohres endlich ist, was deshalb so sein muss, damit auch kurzdauernde Töne analysiert werden können. Wenn die Frequenz des zweiten Tones weiter steigt, so bleibt er dauernd verdeckt. Als Verdeckungsgrad wird dabei diejenige Intensitätserhöhung (in db) des verdeckten Tones bezeichnet, die nötig ist, damit er gerade wieder hörbar wird. Als Regel gilt also, dass höhere Töne von tiefern Tönen stark verdeckt werden. Das ist z. B. praktisch wichtig beim Abgleichen von Messbrücken, wo Obertöne den auf 0 abzugleichenden Grundton nicht verdecken können.

Ein weiterer, sehr wichtiger Effekt ist das sogenannte *Residuum*. Es ist bekannt, dass man bei einem

Klang, der aus Grundton und einer grösseren Zahl von Obertönen besteht, ohne weiteres die Grundfrequenz und auch noch weitere niedrige Harmonische wegschneiden kann, ohne dass man den Eindruck hat, die Tonhöhe habe sich irgendwie geändert. Das ist z. B. typisch beim Telephonieren; denn dort werden Frequenzen unter 300 Hz aus Gründen der Wirtschaftlichkeit oft nicht übertragen²⁾. Dabei liegen aber sämtliche Grundtöne der menschlichen, und besonders der männlichen Sprache unterhalb 300 Hz; trotzdem erkennen wir beim Telephonieren die Stimme unseres Partners ohne weiteres. Wir haben keineswegs den Eindruck, dieser Partner rede zwei oder drei Oktaven höher. Die nächstliegende Erklärung für diese Tatsache ist die, dass durch die Nichtlinearität des Ohres der Grundton im Ohr wieder gebildet wird. Aus verschiedenen Gründen ist nun diese Annahme unbefriedigend, so dass versucht werden musste, eine andere Erklärung zu finden. Fig. 15 zeigt die Wirkung periodischer Impulse auf einige schematisierte Resonatoren des Innenohrs. Diese Resonatoren sind durch ihre Resonanzkurven dargestellt. Eine Erregung mit periodischen, sehr schmalen Rechteckimpulsen wurde deshalb gewählt, weil diese ein sehr

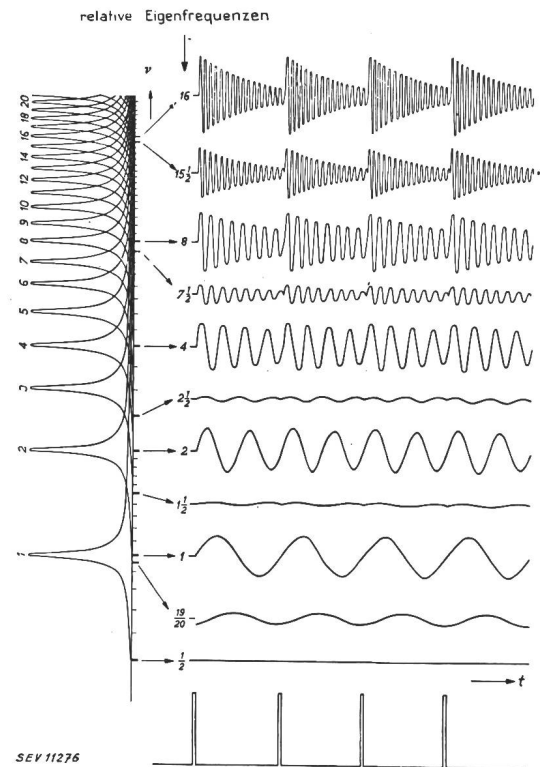


Fig. 15.
Die Wirkung periodischer Impulse (obertonreiches Spektrum) auf die Resonanzkurven des Innenohrs
Durch die Ueberlappung der Kurven erscheint bei den höhern Obertönen die Frequenz des Grundtons wieder. Dieser Effekt ist das sog. *Residuum*.
(Nach Schouten.)

reichhaltiges Obertonspektrum aufweisen. Wenn man die dadurch bewirkte Erregung der Ohrresonatoren graphisch untersucht, so ergibt sich durch

²⁾ Siehe Vortrag des Herrn Dr. Keller, S. 666.

die Ueberlappung der Resonanzkurven bei den höheren Frequenzen, dass dabei die Periodizität des Grundtones wieder auftritt. Es erhebt sich nun die Frage, ob das Ohr diese hören kann, denn dieser Teil der Basilmembran kann ja normalerweise nur hohe Frequenzen empfinden. Man muss daher annehmen, dass das Ohr imstande ist, die zeitliche Charakteristik der Nervenimpulse auch auszu-

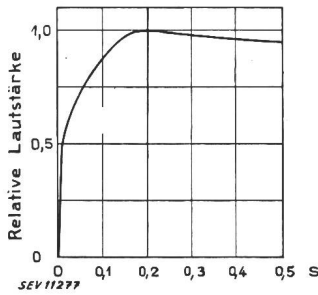


Fig. 16.
Zunahme der Lautstärke eines Tones nach dem Einschalten
(nach Békésy)

werten; physiologisch ist dies nicht ausgeschlossen, da es sich um Frequenzen unter 1000 Hz handelt. In diesem Zusammenhang erinnern wir uns an den Frequenzgang der Cochlea, wo bei den tiefen Frequenzen keine Ortsveränderung vorhanden ist, so dass man auch dort annehmen muss, dass die zeitliche Charakteristik der eintreffenden Nervenimpulse für die Erkennung der Tonhöhe der tiefsten Frequenzen benützt wird.

Eine weitere Ohreigenschaft, die sich nur mit dieser Annahme erklären lässt, ist das Richtingshören eines tiefen, stationären Tones. Dabei muss das Gehirn Phasendifferenzen zwischen beiden Ohren feststellen können, was wiederum nur durch Auswertung der zeitlichen Charakteristik der Nervenimpulse als möglich erscheint. Wir haben es also hier mit einem Einbruch in die Einorts-Theorie zu tun, deren Gültigkeitsbereich offenbar gewisse Grenzen hat. Interessant ist dabei, wie die Unter-

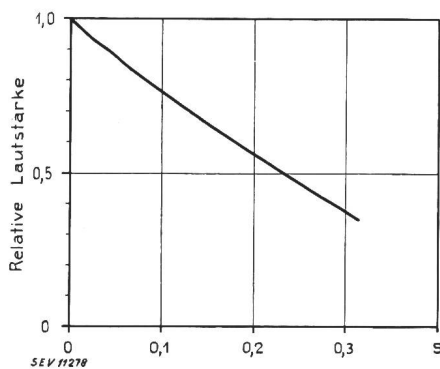


Fig. 17.
Abnahme der Lautstärke eines Tones nach dem Ausschalten
(nach Steudel)

suchung von technisch wichtigen Effekten Material für die physiologische Forschung liefert.

Die Eigenschaften des Ohres gegenüber nicht-stationären Schallereignissen sind ebenfalls sehr wichtig, da es ja streng genommen überhaupt keine stationären Schallereignisse gibt. Fig. 16 zeigt, dass

es beim plötzlichen Einschalten eines Tones mehrere Zehntelssekunden dauert, bis das Ohr die volle Lautstärke empfindet. Aehnlich verhält es sich beim Ausschalten des Tones: es dauert mehrere Zehntelssekunden, bis die Empfindung vollständig verschwunden ist (Fig. 17). Die beiden Kurven, Fig. 16 und 17, werden benützt, um die Zeitkonstante des Ohres auszurechnen, wofür sich ungefähr 50 Millisekunden ergeben. Dieser Wert ist wichtig für den Bau von objektiven Lautstärkemessern, ein Problem, das sehr schwer zu lösen ist, weil die Eigenschaften des Ohres, die das Instrument nachahmen soll, so ausserordentlich kompliziert sind.

Was weiter sehr wichtig ist, ist die Reaktion des Ohres auf kurzdauernde Schallereignisse, also auf Knalle oder Knacke. Es zeigt sich, dass die Lautstärke eines einzelnen Knalles oder Knackes durch den Schalldruckverlauf während der ersten 0,3 ms bestimmt ist. Was nachher passiert, ist für die empfundene Lautstärke vollständig gleichgültig. Die auf Fig. 18 dargestellten drei Knacke weisen

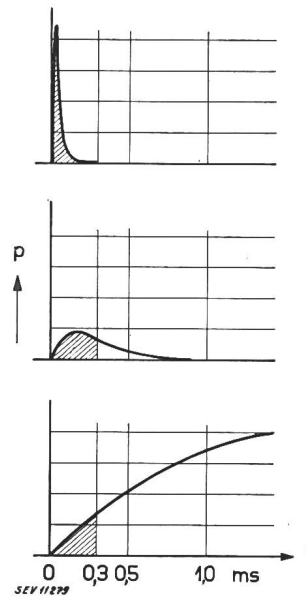


Fig. 18.

Schalldruckverlauf von 3 Einzelknacken der gleichen Lautstärke von 65 phon
Nur die ersten 0,3 ms (schraffierte Flächen) sind für die empfundene Lautstärke massgebend, der spätere Verlauf ist belanglos.
(Nach Steudel.)

einen vollständig verschiedenen Schalldruckverlauf auf, trotzdem werden sie alle gleich laut gehört. Das ist für die Dimensionierung jedes Uebertragungssystems ausserordentlich wichtig, da es bedeutet, dass während der ersten 0,3 ms ein möglichst vollständiges Spektrum des Knalles oder Knackes übertragen werden muss. Dafür ist der Phasengang des Uebertragungssystems massgebend. Wenn ein Uebertragungssystem die Phase dreht, dann bedeutet das bei tiefen Frequenzen schon recht lange Laufzeitdifferenzen, die bedeutend länger als 0,3 ms sein können. Das heisst, dass während der 0,3 ms, die für den Höreindruck entscheidend sind, wichtige Komponenten des Spektrums fehlen. Deshalb werden Knallgeräusche, Schlaginstrumente usw. im Radio oft so schlecht übertragen.

Die Kenntnis der Eigenschaften des Ohres für nicht-stationäre Schallereignisse gestattet noch wesentliche Verbesserungen an den Uebertragungssysteme-

men. Es ist bemerkenswert, dass die linearen und die nichtlinearen Verzerrungen in erster Linie bestimmt sind durch die elektro-akustischen Wandler. Dagegen weisen diese im allgemeinen nur sehr kleine Phasenverzerrungen auf. Im Gegensatz dazu können Leitungen und Verstärker ohne Schwierigkeiten mit vernachlässigbar kleinen linearen und nichtlinearen Verzerrungen gebaut werden, es ist aber schwierig, gute Phasengänge zu erzielen. Hier

liegen noch wesentliche Verbesserungsmöglichkeiten.

Wir stehen also noch keineswegs am Ende einer Entwicklung. Die physiologische Akustik und die Fernmeldetechnik haben noch sehr viele ungelöste Probleme vor sich, und Physiologen und Fernmeldetechniker werden fortfahren, sich auch in Zukunft gegenseitig zu unterstützen und zu helfen im Interesse des allgemeinen Fortschrittes.

Ueber die Qualität der telephonischen Uebertragung

Vortrag, gehalten an der 2. Tagung für elektrische Nachrichtentechnik am 4. September 1943 in Bern,
von H. Keller, Bern

621.395.813

Die natürliche Wiedergabe der menschlichen Stimme erfordert die getreue Wiedergabe eines Frequenzbandes von 80...12000 Hz. Allgemein beschränkt man sich auf die Wiedergabe des Hauptsprachgebietes, das von 200...2800 Hz reicht, und für die gesamte zwischen Mund und Ohr eingeschaltete Fernsprechanlage wird eine 100fache Schalldruckverminderung zugelassen, entsprechend einer Dämpfung von 4,6 Neper. Die Mittel, die den Frequenzgang verbessern und die Verzerrung verringern, bewirken im allgemeinen, namentlich auf den Leitungen, eine erhöhte Dämpfung, und da die Verstärkung im vorhandenen Zweidrahtbetrieb aus physikalischen Gründen begrenzt ist, muss zwischen Dämpfung und Frequenzgang ein wirtschaftlich tragbarer Kompromiss geschlossen werden.

Auf die Qualität der Uebertragung wirken besonders auch die Telephonschädlinge, z. B. Störungen durch Nebensprechen, Raumgeräusche, Mikrophongeräusche, Knack- und Wählgeräusche von Zentralen, Bahnstörungen, Gleichrichtergeräusche und Brummspannungen, Pfeiftöne durch Rückkopplung, Maschinengeräusche und dergleichen. Gegen alle diese Schädlinge wird systematisch und mit Energie angekämpft. Die Güte eines Telephonsystems wird nach der Verständlichkeit und Natürlichkeit der übertragenen Sprache bewertet. Eine Erhöhung der Raum- und Leitungsgeräusche samt Klirrfaktor wirkt praktisch auf die Verständlichkeit wie eine Bandbescheidung.

Zum Schluss wird ein Ueberblick über die Verstärkertechnik gegeben.

Die Versuche, die während des Vortrags vorgeführt wurden, werden kurz skizziert.

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 weit entferntem Ort 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, kurz die hauptsächlichsten Qualitätseigenschaften näher zu betrachten.

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

Une transmission parfaite de la voix humaine exige des fréquences de 80 à 12 000 Hz. Avec les fréquences comprises entre 200 à 2800 Hz, on obtient encore une bonne et intelligible transmission de la voix. Pour l'ensemble d'une installation téléphonique intercalée entre la bouche et l'oreille, on admet une réduction de la pression acoustique de 100 fois la pression à l'entrée du système, soit un affaiblissement de 4,6 népers. Les moyens destinés à améliorer la caractéristique de fréquence et à réduire les déformations augmentent généralement l'affaiblissement, surtout dans les lignes. L'amplification appliquée aux systèmes à deux fils étant limitée pour des raisons d'ordre physique, il y a donc lieu d'adopter un compromis acceptable, au point de vue de l'économie du système, entre l'affaiblissement et la caractéristique de fréquence.

La qualité de la transmission dépend également, dans une large mesure, des parasites téléphoniques, tels que les perturbations par diaphonie, bruits de local, bruits dans le microphone, bruits dus aux manipulations dans les centraux, les perturbations provenant des chemins de fer, le bruit résultant de redresseurs, les bourdonnements, les sifflements par réaction, les bruits de machines, etc. On s'efforce de lutter systématiquement et avec énergie contre tous ces parasites. La qualité d'un système téléphonique s'estime d'après l'intelligibilité et la fidélité de reproduction des sons vocaux. Une augmentation des bruits du local et des lignes, y compris le facteur de vibration, agit pratiquement sur l'intelligibilité comme une limitation de bande.

Le conférencier donne, pour terminer, un aperçu de la technique des amplificateurs.

Les expériences faites durant cette conférence sont brièvement expliquées.

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

Für die telephonische Uebertragung darf man sich auf das Hauptsprachgebiet von 200 bis etwa 2800 Hz beschränken (Fig. 1) und man darf auch für die gesamte zwischen Mund und Ohr eingeschaltete Fernsprechanlage 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 Dämpfungswert für das gesamte Telephonsystem mitsamt der Einsprache und dem Abhören; er wird als Maximalwert der zulässigen Bezugsdämpfung bezeichnet. Unter dem Telephonsystem versteht man dabei die gesamte Fernverbindung, bestehend aus Teilnehmerstation, Teil-