Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 59 (1968)
Heft: 4

Artikel: Neuere Erkenntnisse der Psychoakustik
Autor: Zwickler, E.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057382

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: 22.08.2025

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

BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

Organe commun de l'Association Suisse des Electriciens (ASE)
et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité (UCS)

Ohr und Hören

26. Schweiz. Tagung für elektrische Nachrichtentechnik des SEV und der Vereinigung «Pro Telephon» vom 12. Oktober 1967

Begrüssung und Einführung

Von *W. Furrer,* Bern

061.3 : 534.86

Es ist mir eine grosse Ehre und ein grosses Vergnügen, den Gast der heutigen Tagung, Prof. Dr. *E. Zwicker,* vorzustellen. Sein Thema, «Neuere Erkenntnisse der Psychoakustik», beschlägt die Eigenschaften des menschlichen Ohres, genauer gesagt, den Zusammenhang zwischen dem akustischen Reiz und der Hörempfindung. Es ist bekannt, dass dieser Zusammenhang die wichtigste Grundlage für alle Nachrichtensysteme bildet, die der Übertragung von Hörinformationen dienen, wie z. B. Telephon- und Radiosysteme, Fernseh-Tonkanäle, Aufnahme- und Wiedergabesysteme usw. Man weiss heute genau, wie viele lineare und nichtlineare Verzerrungen für ein bestimmtes System zulässig sind, welcher Geräuschpegel toleriert werden kann, wie gross der Frequenzumfang für eine bestimmte Verständlichkeit sein muss usw.

Weniger bekannt ist die Tatsache, dass die Fortschritte in der Psychoakustik fast ausschliesslich von Physikern und Ingenieuren stammen; von Medizinern und Physiologen sind ausser anatomischen Beschreibungen kaum wesentliche Beiträge bekannt. Die Anfänge dieser Forschungen gehen auf das letzte Jahrhundert zurück, wobei vor allem *Ohm* und *Helmholtz* zu erwähnen sind. Dann wurde es um dieses Thema still bis etwa 1920, nämlich bis die Fortschritte der Elektroakustik neue Möglichkeiten eröffneten. In Amerika war es *Harvey Fletcher,* in Europa *Georg von Békésy,* der vor einiger Zeit mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde: beides waren Fernmeldetechniker. Nach dem Kriege ist zunächst *S. S. Stevens* zu erwähnen, und heute ist es *Eberhard Zwicker,* der, um einen sportlichen Ausdruck zu gebrauchen, die Weltrangliste anführt.

Auch in der Schweiz ist das Thema keineswegs neu; es sei daran erinnert, dass schon an der zweiten Schweiz. Tagung für elektrische Nachrichtentechnik, 1943, der Sprechende über «Ohr und Hören als Grundlage der elektrischen Nachrichtentechnik» vorgetragen hat. Wir dürfen nun sehr gespannt sein, über die in den seither vergangenen 24 Jahren erzielten Fortschritt etwas zu hören.

Adresse des Autors:
Prof. *W. Furrer,* Direktor der Radio Schweiz AG, 3000 Bern 25.

Neuere Erkenntnisse der Psychoakustik

Vortrag, gehalten an der 26. Schweiz. Tagung für elektrische Nachrichtentechnik vom 12. Oktober 1967 in Solothurn,

von *E. Zwicker,* München

061.3:534.86

In der logischen Reihenfolge der Übertragungskette zwischen Schallquelle und Lautsprecher wird zuerst der Raumakustik besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Neue Erkenntnisse in diesem Gebiet erlauben jetzt einen besseren akustischen Kontakt zwischen den Musikern und dem Publikum herzustellen und besonders mit den Mikrophonen gute Schallaufnahmen zu gestalten. Dank der technischen Fortschritte der letzten Jahre konnten die Vorverstärker der Kondensatormikrophone transistorisiert werden. Dazu konnte die Qualität der Tonbandaufzeichnung höher gesteigert werden als unser Hörorgan dies verlangt. Leider besteht immer noch die «ungetreue» Wiedergabe des Lautsprechers, besonders der Einschwingvorgänge; aber auch dort wurden Fortschritte mit elektrostatischen Systemen erzielt.

Dans l'ordre logique de la chaîne de transmission entre la source sonore et le haut-parleur, une importance toute particulière est donnée d'abord à l'acoustique des salles, car de nouvelles connaissances dans ce domaine permettent maintenant d'assurer un meilleur contact acoustique entre les musiciens, le public et surtout les microphones de prise de son. Les progrès réalisés ces dernières années ont permis de transistoriser récemment les préamplificateurs des microphones à condensateur et de porter la qualité du procédé d'enregistrement à bande magnétique à un niveau qui dépasse les exigences de notre organe auditif. Il subsiste hélas «l'infidélité» du haut-parleur essentiellement en ce qui concerne la reproduction des phénomènes transitoires, mais là encore des progrès sont réalisés avec des systèmes électrostatiques.

1. Einführung

Man kann nicht über Psychoakustik reden, ohne auf den Vortrag einzugehen, den Prof. *Furrer* vor 24 Jahren gehalten hat [1] [1]) und ohne zu demonstrieren, was Psychoakustik ist.

Es ist eine Freude, in der zum Vortrag von Prof. *Furrer* gehörenden, viel umfassenderen Veröffentlichung nachzulesen, wieviele Ergebnisse seinerzeit schon bekannt gewesen sind. Natürlich ist in den letzten 25 Jahren eine Vielfalt von einzelnen Forschungsergebnissen hinzugekommen, aber die grundlegenden Effekte sind damals schon erkannt worden. Wesentlich Neues wurde jedoch darin geschaffen, dass übergeordnete, die Zusammenhänge zwischen den Einzelergebnissen klärende Vorstellungen erarbeitet wurden. Beispiele dafür sollen später gegeben werden.

Vorher aber möchte ich noch einen anderen Gesichtspunkt aus dem Vortrag von Prof. *Furrer* neu beleuchten, nämlich die unerlässliche Zusammenarbeit zwischen der Nachrichtentechnik und der Psychoakustik. Treffender als in dem Titel seiner Arbeit «Das Ohr und das Hören, eine Grundlage der Nachrichtentechnik» kann diese Notwendigkeit gar nicht zum Ausdruck gebracht werden. Schon immer waren Nachrichtentechniker an der Erforschung der Eigenschaften unseres Gehörs beteiligt, aber mehr als Grundlagenforscher. Nach der stürmischen Entwicklung der Nachrichtentechnik in den letzten 30 Jahren kann auch die technische Seite dieser Fachrichtung zur Wirkung kommen, und zwar auf Gebieten, die mehr in unsere Gesellschaft hineinragen als die reine Grundlagenforschung. Dabei denke ich z. B. an Randgebiete der Medizin: Die Schaffung von Hörhilfen für Schwerhörige, die Informationsübermittlung akustischer Nachrichten auf die intakten Sinnesorgane von Taubstummen oder die Ausnützung der Eigenschaften des Gehörs zu einer räumlichen Orientierungshilfe für Blinde. Zur Lösung solcher Probleme kann die Nachrichtentechnik sehr viel beitragen. Eine Zusammenarbeit mit der Medizin hätte darüber hinaus den Vorteil, dass sich die Sprachen, die in den beiden Wissenschaften gesprochen werden, nicht noch weiter voneinander entfernen würden.

Wenn gefragt wird, was man unter Psychoakustik versteht, so wären «die Erforschung der Eigenschaften des menschlichen Gehörs» oder «die Klärung des quantitativen Zusammenhanges zwischen akustischen (physikalisch messbaren) Reizen und den Empfindungen unseres Gehörs» Antworten dafür. Wenn aber demonstriert werden soll, was Psychoakustik ist, so nütze ich immer sehr gerne den Umstand aus, dass jeder der Zuhörer das Sinnesorgan Gehör besitzt, und mache akustische Vorführungen bzw. Experimente. Zwei solcher Experimente möchte ich sozusagen zur Einführung sowohl in die Problemstellung als auch in die Messmethode mit den Zuhörern als Beobachtergruppe durchführen. Es sind zwei grundlegende Experimente der Psychoakustik. Die Versuchsdurchführung und das Ergebnis werden eine deutlichere Sprache sprechen als viele Worte, ganz abgesehen davon, dass jedes aktive Miterleben einen viel tieferen Eindruck hinterlässt als das passive Zurkenntnisnehmen von Ergebnissen.

Beim ersten Experiment (Versuch I) geht es um den quantitativen Zusammenhang zwischen der Stärke eines akustischen Reizes, ausgedrückt im Schalldruckpegel, und der dazugehörigen subjektiven Lautstärkeempfindung, die als Lautheit bezeichnet wird. Entsprechend den physikalischen Grössen, die in Zahlen und Einheiten angegeben werden, sind auch für solche Empfindungen, die sich quantitativ und eindeutig messen lassen, Empfindungsgrössen [2] definiert worden, die ebenfalls in Zahlen und Einheiten angegeben werden. Die von uns auszumessende Lautheit [3] ist ein typisches Beispiel dafür. Wenn nun die Lautheit eine solche Empfindung ist, dann kann man sich eine Skala vorstellen, wie sie in Fig. 1 dargestellt ist. Von einer Empfindungsgrenze aus — bei der Lautheit ist dies die Hörschwelle — wächst die Empfindung bei Steigerung des Schalldruckpegels mehr und mehr an. Eine Möglichkeit, den Zusammenhang quantitativ auszumessen, besteht darin, von einem Ausgangswert ausgehend die zur halben Empfindung gehörende Pegeldifferenz zu suchen. Diese Methode wird als Lautheitshalbierung bezeichnet. Alle Anwesenden seien gleichzeitig an dem Versuch beteiligt. Daher wird ein zweiter Wert in 5 verschiedenen

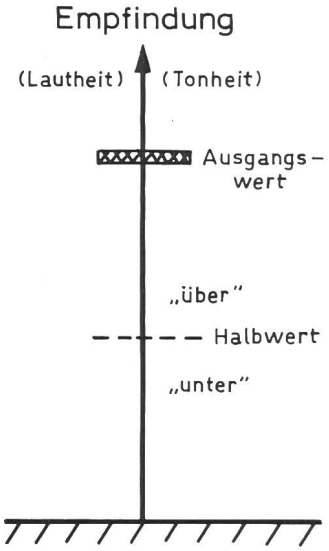

Fig. 1
Versuch über das quantitative Ausmessen der Empfindungsgrössen «Lautheit» und «Tonheit»

diskreten Werten, jeweils auf den immer gleichbleibenden Ausgangswert folgend, dargeboten. Der auf Band aufgezeichnete Schall ist ein Schmalbandrauschen, das keine stehenden Wellen im Raum erzeugt. Die Mittenfrequenz ist 1 kHz. Jedes der 5 Wertepaare wird 3mal dargeboten. Nach der 3. Darbietung bitte ich Sie um eine Aussage darüber, ob die Lautstärke des jeweils zweiten Schalles über oder unter dem Halbwert des Ausgangswertes (jeweils erster Schall) liegt. Um die Auszählung zu vereinfachen, wird die Aussage «Halbwert» nicht zugelassen. Sie müssen sich «über» oder «unter» entscheiden. (Der Versuch wird aufgeführt.)

Das Ergebnis der Lautheitshalbierung zeigte nun auf Grund Ihrer Angaben folgende Werte:

Darbietung		Nr. 1	2	3	4	5
Aussage (%)	«über»	0	98	70	90	2
	«unter»	100	2	30	10	98
Pegeldifferenz (dB)		—20	—3	—10	—6	—15

Die Aussagen sind im Diagramm von Fig. 2 zusammengestellt. Danach ist eine Pegeldifferenz von 15 oder gar 20 dB erheblich zu gross, um einen halben Lautheitseindruck zu erzeugen. Die Pegeldifferenz von 10 dB ist etwas, diejenige von 6 und 3 dB deutlich zu gering, obwohl 6 dB ge-

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

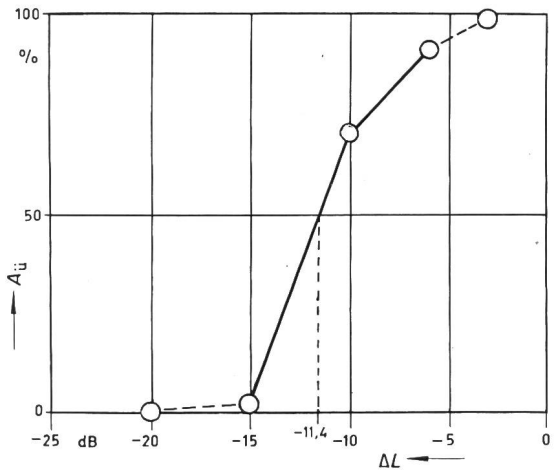

Fig. 2
Ergebnisse aus dem Versuch I zur Bestimmung der halben Lautheit
Die prozentuale Anzahl $A_ü$ der Antworten «über die Hälfte» ist in Abhängigkeit von der Pegelsenkung ΔL gegenüber dem Ausgangswert aufgetragen

rade einer Schalldruckhalbierung, 3 dB einer Schallintensitätshalbierung entsprechen. Hier wird schon deutlich, dass eine Halbierung der physikalischen Grösse noch lange keine Halbierung der Empfindung hervorrufen muss. Bei linearer Interpolation der Messwerte kann Fig. 2 entnommen werden, dass eine Pegeldifferenz von 11,4 dB gerade die halbe Empfindung hervorruft. Dort wäre zu erwarten, dass sich 50 % der Anwesenden für «über der Hälfte» und 50 % für «unter der Hälfte» entscheiden würden.

Diesem ersten Experiment soll gleich ein zweites, erheblich schwierigeres angeschlossen werden (Versuch II). Die Methode und die Darbietungsfolge ist dieselbe, anstatt der Lautheit soll jetzt aber die Tonhöhenempfindung, die sog. Tonheit [4] ausgemessen werden. Wieder ist die Entscheidung «über» oder «unter» der Hälfte zu treffen.

Den Ausgangswert erzeugt ein Schmalbandrauschen von 200 Hz Bandbreite bei hohen Frequenzen. Es hat durchaus eine bestimmte Tonhöhe. Die jeweils zweiten Darbietungen sind Sinustöne. Auch hier werden die Mittenfrequenz des Schmalbandrauschens und die Frequenzen der Sinustöne erst nach der vollständigen Auswertung bekanntgegeben. (Der Versuch wird ausgeführt.)

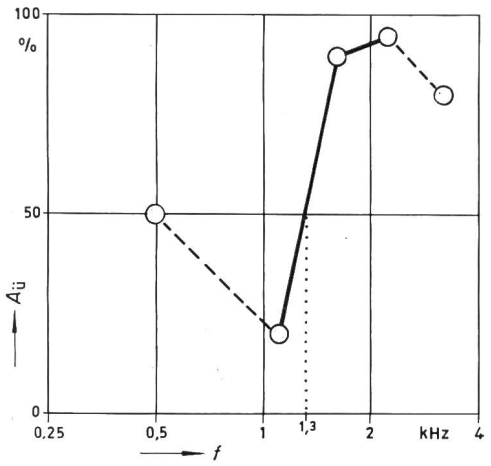

Fig. 3
Ergebnisse aus dem Versuch II zur Bestimmung der halben Tonheit
Der prozentuale Anteil $A_ü$ der Antworten «über die Hälfte» ist in Abhängigkeit von der Frequenz f der jeweils zweiten Darbietung aufgetragen. Der Ausgangswert liegt bei 8 kHz

Das Ergebnis der Tonheitshalbierung zeigt folgende Werte:

Darbietung		Nr. 1	2	3	4	5
Aussage (%)	«über»	50	80	20	90	95
	«unter»	50	20	80	10	5
Frequenz der Töne (Hz)		500	3100	1100	1600	2200

Mittenfrequenz des als Ausgangswert benutzten Schmalbandrauschens: 8000 Hz

Diese Aussagen sind in Fig. 3 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die durchschnittliche Meinung nicht so ausgeprägt ist, wie bei der Lautheitsmessung, dass aber die 50-%-Linie, d. h. der mittlere Halbwert zwischen 1100 Hz und 1600 Hz bei etwa 1300 Hz steil durchschnitten wird. Dies bedeutet, dass die Tonhöhenempfindung, die durch die Frequenz von 8 kHz hervorgerufen wird, dann auf die Hälfte zurückgeht, wenn ein Ton von 1,3 kHz dargeboten wird. Dieses Ergebnis ist nur deswegen überraschender als das Ergebnis der Lautheitshalbierung, weil wir in der abendländischen Musik von der Harmonielehre her gewohnt sind, dass die halbe Tonhöhe zur halben Frequenz gehört. Dies ist jedoch bei reinen Tönen nur bei tiefen Frequenzen bis zu etwa 1 kHz der Fall.

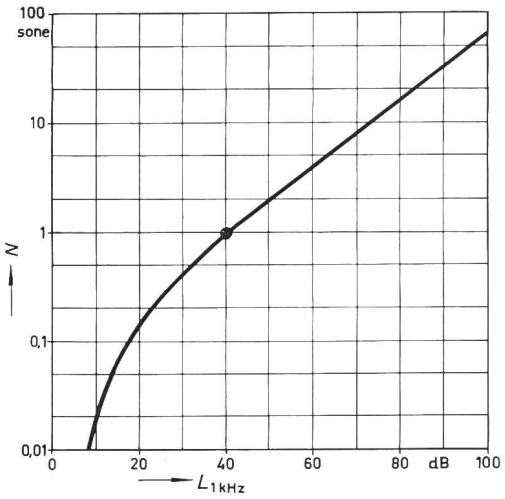

Fig. 4
Die Lautheit N als Funktion des Pegels $L_{1\,kHz}$ eines 1-kHz-Tones

Der Messwert von Darbietung Nr. 1 bei 500 Hz liegt unerwartet hoch. Vermutlich war bei dieser ersten Darbietung noch nicht genügend klar, welche Aussage gemacht werden sollte. Ein «Vorläufer» zur Demonstration ohne quantitative Auswertung musste aus Zeitgründen unterbleiben. Wie ausserdem festgestellt werden musste, liegt das mittlere Alter des Zuhörerkreises bei etwa 55 Jahren. Dies kann bedeuten, dass ein Teil der Anwesenden den Ausgangswert bei 8 kHz nicht oder nur sehr schwach gehört hat. Werden in den Fig. 2 und 3 die ersten beiden Darbietungen nicht zur Auswertung herangezogen, so bleiben die 3 jeweils letzten Darbietungen immer noch sehr aussagekräftig.

In den Fig. 4 und 5 soll nun das Messergebnis des Experimentes mit den Mittelwerten verglichen werden, die in der Literatur angegeben werden, und die unter exakten Versuchsbedingungen ausgemessen wurden.

In Fig. 4 ist der Zusammenhang zwischen dem Schalldruckpegel $L_{1\,kHz}$ eines 1-kHz-Tones und der durch ihn verursachten Lautheit N aufgetragen [2; 3; 4; 5]. Die Lautheit wird in der Einheit sone angegeben, wobei als Fixpunkt dem Pegel $L_{1\,kHz} = 40$ dB die Lautheit $N = 1$ sone zugeordnet

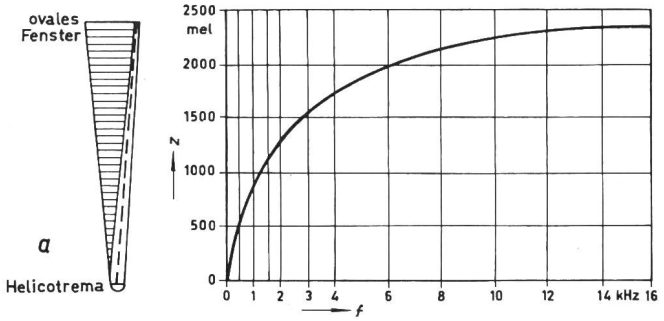

Fig. 5
Die Tonheit z als Funktion der Frequenz f
a das ausgestreckte Innenohr (schematisch)

wird. Die Kurve ist bei Pegeln über 40 dB eine Gerade. Dies bedeutet wegen der doppelt logarithmischen Darstellung, dass die Lautheit und der Schalldruck nach einem Potenzgesetz miteinander zusammenhängen. Darin ist k eine Proportionalitätskonstante und p der Effektivwert des Schalldruckes. Im Bereich mittlerer und grosser Pegel gilt:

$$N = k\,p^{0,6}$$

Bei kleineren Pegeln biegt die Kurve gegen die Hörschwelle hin zur Senkrechten ab. Bei unserer Lautheitshalbierung sind wir von etwa 60 dB ≙ 4 sone ausgegangen. Der Lautheitskurve in Fig. 4 entsprechend müsste der Halbwert, d. h. 2 sone, bei etwa 50 dB, d. h. bei 10 dB Pegeldifferenz zu finden sein. Der erste Versuch hat mit einer Abweichung von 1,4 dB dieses Ergebnis bestätigt; eine Genauigkeit, wie sie bei subjektiven Messungen üblich ist.

Die Lautheit ist eine Empfindung, die mit der Stärke des Reizes anwächst. Solche Empfindungen sind Intensitätsempfindungen. Für sie hat *Stevens* [6] gefunden, dass sie allgemein Potenzgesetzen gehorchen, wenn auch mit von Empfindung zu Empfindung wechselndem Exponenten. Andere Empfindungsarten sind die Positionsempfindungen. Bei ihnen verschiebt eine Änderung des Reizes den Ort der Erregung. Der Ort der Berührung beim Tastsinn ist ein typisches Beispiel dafür, aber auch die Tonheit ist eine Positionsempfindung, weil sich der Ort der Anregung der Sinneszellen des Cortischen Organes im Innenohr bei Veränderung der Frequenz verschiebt.

Die Interpretation der beim Versuch II durchgeführten Tonheitshalbierung mag dies verdeutlichen. In Fig. 5 ist die Tonheit z in der Einheit mel über der Frequenz aufgetragen. Bei tiefen Frequenzen steigt die Tonheit linear [7] mit der Frequenz an. Der Proportionalitätsfaktor ist so gewählt, dass Tonheit und Frequenz dort denselben Zahlenwert besitzen [2]. Für Frequenzen über 500 Hz steigt die Tonheit nur noch um etwas mehr als zwei Oktaven an, während die Frequenz bis 16 000 Hz noch um 5 Oktaven ansteigt. Dieser Effekt ist manchem Klavierspieler dadurch bekannt, dass alle Melodien, die auf der obersten Oktave gespielt werden, melodisch sehr eng klingen.

Das Ergebnis des Versuches II kann man in der Tonheitskurve ablesen. Das 8-kHz- Schmalbandrauschen hat eine Tonheit von etwa 2200 mel zur Folge. Die halbe Tonheit davon ist 1100 mel und die zugehörige Frequenz ist nach Fig. 5 etwa 1400 Hz.

In Fig. 5a ist schematisch das ausgestreckte Innenohr mit der Basilarmembran dargestellt, die vom ovalen Fenster bis zum Helicotrema reicht. Der Ort maximaler Anregung der Sinneszellen wandert bei Veränderung der Frequenz genau so auf der Basilarmembran hin und her, wie es die an der Tonheitskurve transformierte Frequenzskala angibt. Demnach hätten Sie bei unserem Experiment diejenige Frequenz als die halbe Tonheit hervorrufend bezeichnet, die eine Anregung der Sinneszellen an einer Stelle hervorruft, die halb so weit vom Helicotrema entfernt ist, wie die zu 8 kHz gehörende Stelle.

Mit diesen Experimenten ist deutlich geworden, welche Zusammenhänge bei psychoakustischen Messungen untersucht und welche Fragen gestellt werden. Wenn nun von neueren Ergebnissen dieses Fachgebietes gesprochen werden soll, so kann in diesem Rahmen nur ein kleiner Ausschnitt daraus dargestellt werden. Ein zusammenfassender Bericht, insbesondere über die Ergebnisse der Arbeitsgruppe, die sich in Stuttgart an der Hochschule mit solchen Fragen beschäftigt hat, ist kürzlich veröffentlicht worden [2]. Aus diesem grossen Gebiet der Psychoakustik sei der Bereich der Selektivität, die mit der Mithörschwelle bzw. der Erregung beschrieben werden kann, herausgegriffen. An diesem Beispiel sollen Anwendungen in Funktionsmodellen erläutert, auf dynamische Vorgänge hingewiesen und auf neu entdeckte, aber noch ungeklärte Effekte aufmerksam gemacht werden.

2. Mithörschwelle und der Erregungspegel

Die Ruhehörschwelle gibt die Grenze der Wahrnehmbarkeit von Sinustönen in völliger Ruhe an. Sie ist als unterste Kurve in Fig. 6 als Pegel L_T des Testtones in Abhängigkeit von seiner Frequenz f_T dargestellt. Wird nun ein Störschall dauernd eingeschaltet, so wird anstatt der Ruhehörschwelle eine Mithörschwelle gemessen. Der Testton wird dann neben dem Störschall, der ja immer hörbar bleibt, mitgehört. Wird als Störschall ein Sinuston benutzt, so wird die Messung der Mithörschwelle durch auftretende Schwebungen und Differenztöne recht schwierig [1]. Mit Hilfe eines Schmalbandrauschens als Störschall kann diese Schwierigkeit im wesentlichen umgangen werden. Dieses Rauschen verdeckt in bestimmten Frequenzbereichen den Testton, und zwar auch noch dort, wo physikalisch keine Rauschanteile mehr vorhanden sind. Dieses gilt insbesondere nach hohen Frequenzen.

Zur Verdeutlichung soll eine akustische Vorführung dienen. In ihr wird ein frequenzgruppenbreites Störgeräusch mit einem Pegel L_G von etwa 60 dB dauernd dargeboten.

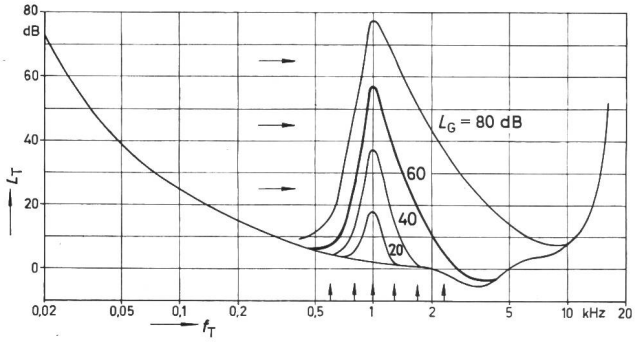

Fig. 6
Mithörschwelle L_T von Sinustönen
verdeckt durch frequenzgruppenbreites Schmalbandrauschen mit dem Pegel L_G und der Mittenfrequenz 1 kHz als Funktion der Frequenz f_T des Testtones

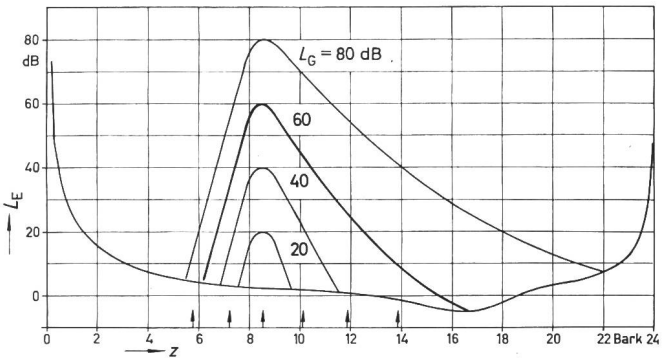

Fig. 7
Erregungspegel L_E von frequenzgruppenbreitem Schmalbandrauschen mit dem Pegel L_G und der Mittenfrequenz 1 kHz als Funktion der Tonheit z

In intermittierender Folge werden die Testtöne mit den Frequenzen 0,6; 0,8; 1; 1,3; 1,7 und 2,3 kHz bei Pegeln von 65 dB, dann bei 45 dB und schliesslich bei 25 dB jeweils 3mal 1 s lang hinzugefügt. Die Töne sind in Fig. 6 als Schnittpunkte der Pfeilrichtungen charakterisiert. Während beim Testtonpegel von 65 dB alle Töne hörbar bleiben, ist bei L_T = 45 dB der 1-kHz-Testton bereits unhörbar, bei L_T = 25 dB nur noch der 0,6-kHz-Ton und der 2,3-kHz-Ton deutlich, der 1,7-kHz-Ton gerade noch hörbar. Die in Fig. 6 angegebenen Mithörschwellen sind Mittelwerte über viele Beobachter, die unter den Bedingungen des ebenen Schallfeldes entstanden sind.

Trotz des Störgeräusches kann das Gehör in weiten Grenzen «normal» hören, ein deutliches Zeichen dafür, dass in ihm eine Frequenzselektion stattfindet, wie bei der Tonheitsmessung schon festgestellt wurde. Das schmalbandige Störgeräusch regt die Sinneszellen auf der Basilarmembran nur in einem engen Bereich an. Testschalle mit wesentlich abweichenden Frequenzen fallen in ein nicht angeregtes Gebiet und werden «unverdeckt» wahrgenommen. Der Verlauf der Mithörschwelle gibt Aufschluss über die Steilheit dieser Selektivität, so jedenfalls lautet die Vorstellung, auf Grund derer die Erregung abgeleitet wurde [8]. Es zeigt sich nämlich, dass der Verlauf der Mithörschwelle dann von der Frequenzlage des Störschalles unabhängig wird, wenn als Abszisse nicht die Frequenz f, sondern die Tonheit z benutzt wird. In Fig. 7 ist dies für die in Fig. 6 angegebenen Kurven durchgeführt; dabei ist als Einheit der Tonart das Bark gewählt worden. Es gilt der Zusammenhang 100 mel = 1 Bark. Die Kurven in Fig. 7 sind ausserdem parallel soweit nach oben verschoben, dass die Kurve mit dem Pegel L_G des Störrauschens (Parameter) gerade denjenigen Ordinatenwert erreicht, der dieselbe Zahl trägt. Diese Verschiebung bedeutet nichts anderes als eine Anwendung des bei fast allen Sinnesorganen vorhandenen Gesetzes, dass eine Reizvergrösserung dann wahrgenommen wird, wenn der relative Zuwachs einen bestimmten Wert überschreitet. Da dies an jeder Stelle der Basilarmembran gilt, d. h. bei allen Tonheiten, kann die Erregung aus der Schallintensität des Testtones für die Mithörschwelle, die ja den gerade wahrnehmbaren Zuwachs darstellt, gewonnen werden. Im Pegelmass bedeutet die Multiplikation mit einem Faktor nichts anderes als eine Verschiebung der ganzen Kurve nach oben oder unten. So entsteht aus der Mithörschwelle der Verlauf des Erregungspegels L_E über der Tonheit L, wie er in Fig. 7 dargestellt ist. Werden Störgeräusche bei anderen Mittenfrequenzen gewählt, so entstehen die entsprechenden Kurven durch Verschiebung der dargestellten nach links oder rechts, ihre Form bleibt erhalten. Nach dieser Vorstellung würde dies bedeuten, dass die Breite des Bereiches, in dem die Sinneszellen auf der Basilarmembran angeregt werden, und auch die beiden in sich verschiedenen Flankensteilheiten gleich bleiben, wenn sich die Eingangsfrequenz ändert [9]. Lediglich der Ort des Maximums verschiebt sich bei hohen Frequenzen in die Nähe des ovalen Fensters und bei tiefen Frequenzen in die Nähe des Helicotremas.

Die Mithörschwellen und entsprechend die Erregungspegel zeigen noch einen weiteren Effekt. Der Testschallpegel L_T bzw. der Erregungspegel L_E nehmen bei Steigerung des Störschallpegels um ΔL_G nur an der unteren Flanke und im Maximum um gerade diesen Zuwachs zu. An der oberen Flanke ist dies nicht der Fall. Dort steigt der Erregungspegel rascher an als der Störschallpegel. Das Gehör arbeitet dort nicht linear.

Die Auslenkung der Basilarmembran, die von v. *Békésy* direkt gemessen wurde [10] und auch aus dem hydromechanischen System des Innenohres berechnet werden kann [11], zeigt einen wesentlich breiteren Verlauf als der gerade beschriebenen Erregung entsprechen würde. Es sind daher Überlegungen angestellt worden, ob die Auslenkung der Basilarmembran nicht doch ein Mass für die Anregung der

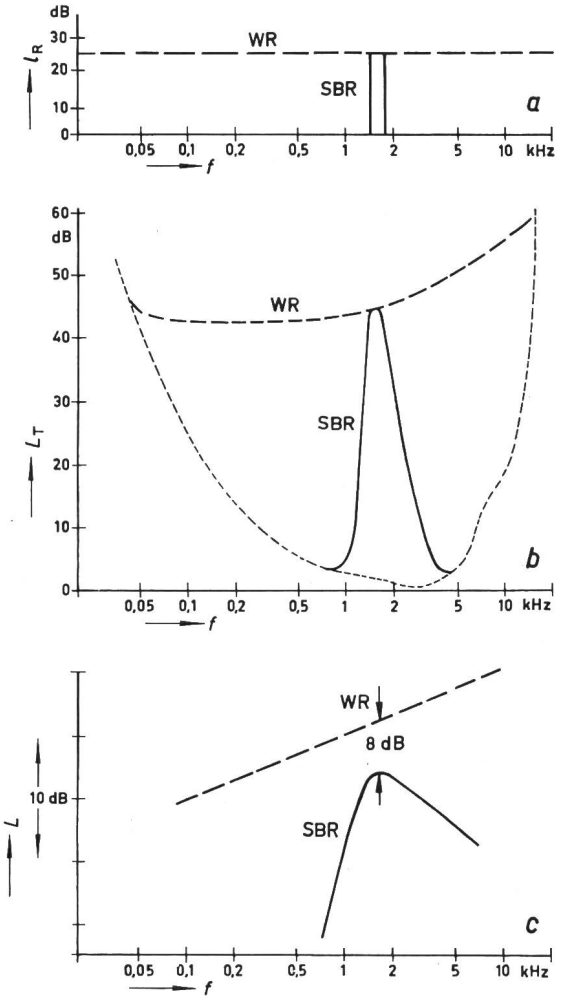

Fig. 8
Gegenüberstellung von weissem Rauschen (WR) und frequenzgruppenbreitem Schmalbandrauschen (SBR) als Funktion der Frequenz f
a Schallintensitätsdichtepegel I_R; *b* Mithörschwelle L_T; *c* Pegel L der Auslenkung der Basilarmembran

Sinneszellen darstellen würde und die grössere Selektionsschärfe, wie sie in der Mithörschwelle gemessen wird, erst durch nachfolgende Beeinflussung im Nervensystem, durch sog. laterale Inhibition zustande komme. Zur Beantwortung dieser wichtigen Frage soll die Beschreibung und Diskussion eines Versuches eingefügt werden, der eng mit dem bereits Besprochenen zusammenhängt.

Weisses Rauschen ist dadurch charakterisiert, dass die Schallintensitätsdichte bei allen hörbaren Frequenzen dieselbe ist. In Fig. 8a ist der Dichtepegel l_R als Funktion der Frequenz für weisses Rauschen (WR) und für eine frequenzgruppenbreites Schmalbandrauschen (SBR) aufgetragen. Die zu diesen beiden Geräuschen gehörenden Mithörschwellen sind in Fig. 8b als Testtonpegel L_T über der Frequenz aufgezeichnet. Die Mithörschwelle des Schmalbandrauschens reicht gerade noch bis zu der Mithörschwelle, die weisses Rauschen verursacht. Wird die Breite des Schmalbandrauschens unter die Frequenzgruppenbreite verringert, so wird die Spitze der zugehörigen Mithörschwelle abgesenkt und die Mithörschwelle von WR nicht mehr erreicht. Bei Verbreiterung des Bandrauschens über die Frequenzgruppenbreite hinaus schmiegt sich die Mithörschwelle in einem grösseren Bereich an diejenige von weissem Rauschen an. Dies bedeutet aber, dass das Gehör eine ähnliche Selektionsschärfe haben muss wie das frequenzgruppenbreite Filter, welches das Schmalbandrauschen aus dem weissen Rauschen ausgeblendet hat. Hier zeigt sich der direkte Zusammenhang zwischen der Frequenzgruppe und der Erregung. Während die Erregung die ganze Selektionskurve mit den zugehörigen Flanken zu beschreiben sucht, gibt die Frequenzgruppe mit ihrer Breite lediglich den Abstand der Frequenzen mit 3 dB Dämpfung, also den Durchlassbereich, an.

Werden dieselben beiden Geräusche auf ein Modell der Basilarmembran gegeben, so werden den Auslenkungen entsprechende Werte gemessen, wie sie in Fig. 8c (zum Vergleich ebenfalls im Pegelmass L über der Frequenz) aufgetragen sind. Die Selektion (bei SBR) ist sowohl an der oberen als auch an der unteren Flanke wesentlich schwächer. Besonders auffällig ist jedoch der Abstand der beiden Kurven (WR und SBR) im Maximum. Diese Differenz von 8 dB lässt sich schwer erklären und nur ein sehr spezielles und mit Schwierigkeiten stabil zu haltendes System der lateralen Inhibition könnte aus den in Fig. 8c dargestellten Verhältnissen, die in Fig. 8b dargestellte Mithörschwelle bilden. Es ist daher viel eher zu vermuten, dass nicht die Auslenkung der Basilarmembran, sondern die Erregung als Mass für die Anregung der Sinneszellen angesehen werden muss [12; 13].

3. Anwendungen der Erregung

Wie die Vorstellung von der Erregung in vielen Gebieten der Psychoakustik Anwendung gefunden hat, soll am Beispiel der Berechnung der Lautheit von beliebigen Schallen und an der Bestimmung der gerade wahrnehmbaren Amplituden- und Frequenzänderungen gezeigt werden.

Wie die Lautheit eines 100 Hz breiten Schmalbandrauschens bei 1000 Hz Mittenfrequenz zustande kommt, wird in Fig. 9 dargestellt. Die Schallintensitätsdichte des Rauschens ist 10^{-10} W/cm²Hz (Fig. 9a). Seine Gesamtintensität beträgt 10^{-8} W/cm², sein Gesamtpegel also 80 dB. Die Mithörschwelle, die dieses Rauschen verursacht, ist in Fig. 9b dargestellt. Sie erreicht nicht ganz den 80 dB-Ordinatenwert,

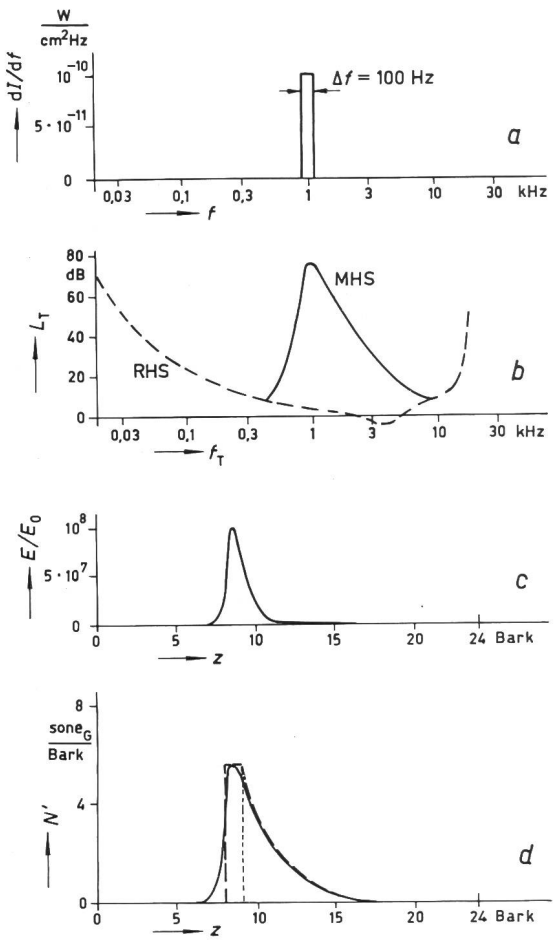

Fig. 9
Zur Entstehung der Lautheit eines Schmalbandrauschens
a Intensitätsdichte dI/df als Funktion der Frequenz f; *b* Mithörschwelle L_T als Funktion der Frequenz f; *c* Erregungsfaktor E/E_0 als Funktion der Tonheit z; *d* spezifische Lautheit N' als Funktion der Tonheit z. Die Fläche unter der ausgezogenen Kurve entspricht der Lautheit. Die gestrichelte Kurve umrandet eine äquivalente Fläche, wie sie im Berechnungsverfahren benutzt wird

wie das Fig. 6 zeigt. Die darunter aufgezeichnete Erregung — diesmal im linearen Maßstab — ist als bezogener Wert E/E_0 über der Tonheit z aufgetragen. Die Lautheit entsteht nun nicht nur aus dem Maximum dieser Erregung, vielmehr muss der ganze Erregungsverlauf auf den Verlauf einer Lautheitsdichte über der Tonheit abgebildet werden. Dies geschieht ebenfalls über ein Potenzgesetz, jedoch mit etwas kleineren Exponenten als bei der Lautheitskurve in Fig. 4. Die Lautheitsdichte wird als spezifische Lautheit N' bezeichnet und sone_G/Bark über der Tonheit z dargestellt [8]. Das Integral

$$N_G = \int_0^{24\,\text{Bark}} N' \, dz$$

stellt die Gesamtlautheit auch eines beliebigen Schalles dar. Der Index G macht deutlich, dass es sich um eine berechnete und nicht um eine subjektiv gemessene Lautheit handelt.

Die Lautheit von beliebigen Schallen kann nach dieser Vorstellung berechnet werden. Zur Vereinfachung des Verfahrens sind Schablonen entworfen worden, die auf einer zweckmässigen Näherung des Kurvenverlaufs in Fig. 9d beruhen. Anstelle der ausgezogenen Kurve für die spezifische Lautheit wird die gestrichelte Näherung mit senkrechtem Anstieg, horizontalem Verlauf innerhalb der Breite von 1 Bark und der gestrichelten oberen Flanke so gewählt, dass

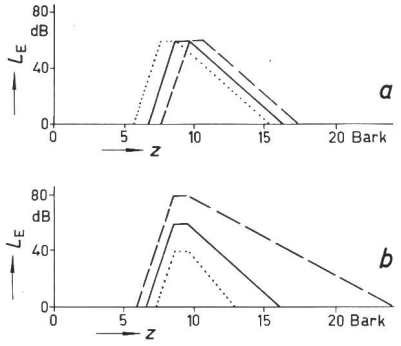

Fig. 10
Verschiebung des Erregungspegeldiagrammes [L_E=F(z)] von Sinustönen (schematisch) bei Veränderung der Frequenz (*a*) und bei Veränderung der Amplitude (*b*)
Bezeichnungen siehe Fig. 7 und im Text

die umrandete Fläche konstant bleibt. Beim graphischen Verfahren zur Berechnung der Lautheit, das von gemessenen Frequenzgruppenpegeln des Schalles ausgeht [8], werden mehrfach belegte Flächen nur einfach gezählt. Für technische Anwendungen wurde das Verfahren auf Terzpegel als Eingangswerte erweitert. In dieser Art hat es Eingang bei den internationalen Normen [14] gefunden. Ein Gerät, das die Funktionen selbständig und mit elektronischen Mitteln automatisch ausführt, ist inzwischen aufgebaut worden [15]. Es kann als ein Funktionsmodell bezeichnet werden, in dem die Eigenschaften des menschlichen Gehörs insbesondere die Empfindung der Lautheit betreffend nachgebildet sind. Solch ein Gerät ist zugleich der genaueste Lautstärkemesser, oder besser gesagt Lautheitsmesser, der bisher bekannt wurde.

Ein zweites Beispiel für die Anwendung der Vorstellung der Erregung zeigt Fig. 10. Dort ist schematisch die Veränderung des Erregungspegel-Tonheitsdiagrammes eines 1000 Hz-Tones aufgetragen, wenn (Fig. 10a) seine Frequenz nach tieferen (punktiert) oder höheren (gestrichelt) Werten verschoben wird. In Fig. 10b ist dasselbe für Erniedrigung (punktiert) oder Erhöhung (gestrichelt) seiner Amplitude aufgetragen. Veränderungen der Frequenz oder der Amplitude rufen also auch Erregungspegeländerungen hervor. Diese werden dann wahrnehmbar, wenn sich der Erregungspegel an irgendeiner Stelle um mehr als 1 dB ändert. Dieses Schwellenkriterium $\Delta L_E \geqq 1$ dB ist aus der gerade wahrnehmbaren relativen Intensitätsänderung von

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{1}{4}$$

abgeleitet, indem für die Schallintensität I die Erregung E eingesetzt und damit das Kriterium erweitert wird [2; 16; 17]. Die relative Änderung der Erregung um 25 % entspricht einem Erregungspegelzuwachs von 1 dB.

Bei Frequenzänderungen tritt die stärkste Erregungspegeländerung an der unteren, sehr steilen Flanke auf. Aus der Flankensteilheit s von etwa 27 dB/Bark kann mit Hilfe des Schwellenkriteriums $\Delta L_s \geqq 1$ dB und der Frequenz-Tonheitstransformation direkt der Absolutwert und die Abhängigkeit der eben wahrnehmbaren Frequenzänderungen von der Frequenz f_0 bestimmt werden. Da 1 Bark gerade der Breite der Frequenzgruppe Δf_G entspricht, kann die Berechnung der gerade wahrnehmbaren Frequenzänderung Δf_{ges} (nicht zu verwechseln mit dem Frequenzhub Δf; $\Delta f_{ges} = 2\Delta f$) wie folgt durchgeführt werden:

$$\Delta f_{ges} = \frac{\Delta L_s}{s} = \frac{1\ \text{dB} \cdot \text{Bark}}{27\ \text{dB}} = \frac{1}{27}\,\Delta f_G\,(f_0)$$

Weil die Breite der Frequenzgruppe von der Mittenfrequenz f_0 abhängt, muss auch die gerade wahrnehmbare Frequenzänderung in derselben Weise von der jeweiligen Frequenz abhängen, wie dies auch tatsächlich gemessen wird. Bei tiefen Frequenzen ist die Frequenzgruppe 100 Hz breit Dort ergibt sich $\Delta f_{ges} = 3{,}7$ Hz. Bei $f_0 = 5$ kHz ist $\Delta f_G = 1$ kHz und dementsprechend $\Delta f_{ges} = 37$ Hz.

Bei Amplitudenänderungen ist die stärkste Erregungspegeländerung nicht an der unteren Flanke, die sich ja parallel nach oben und unten verschiebt, sondern wegen der nichtlinearen Auffächerung an der oberen Flanke zu suchen. So tritt in Fig. 10b bei einer Pegelsteigerung des 1000-Hz-Tones um 20 dB von 60 dB nach 80 dB eine Erregungspegeländerung bei 16 Bark um fast 50 dB auf. Dort ändert sich der Erregungspegel 2,5fach stärker als an der unteren Flanke oder im Maximum. Die Steilheit der oberen Flanke ist pegelabhängig. Deswegen ist auch die eben wahrnehmbare Amplitudenänderung von Sinustönen pegelabhängig. Für breitbandiges Rauschen dagegen, bei dem keine Flankenerregungen entstehen können, darf diese Pegelabhängigkeit nicht auftreten. Tatsächlich wird für weisses Rauschen auch keine Pegelabhängigkeit der eben wahrnehmbaren Amplitudenänderung gemessen.

Die eben wahrnehmbaren Amplituden- und Frequenzänderungen können mit Hilfe der Vorstellung der Erregung zusammen mit dem Schwellenkriterium vollständig beschrieben werden. Ein weiterer Beweis dafür, dass mindestens für Schalle, bei denen die Dynamik des Gehörs eine untergeordnete Rolle spielt, d. h. solche mit einer Dauer $\geqq 200$ ms, im Erregungs-Tonheits-Diagramm eine sehr wichtige und sinnvolle Zwischengrösse darstellt. Eine Ausweitung dieser Vorstellung hat zu einem einfachen Funktionsschema des Gehörs geführt, in dem einem Blockdiagramm entsprechend die funktionalen Zusammenhänge dargestellt werden. Auf die Nachbildung der in Wirklichkeit ablaufenden Vorgänge ist dabei völlig verzichtet worden. Eine Realisierung des Funktionsschemas mit elektronischen Mitteln ist ein Funktionsmodell [18], das eine Art Nachrichtenverarbeitung — z. B bei Eingabe von Sprache — durchführt und bei Versuchen zur automatischen Spracherkennung [19] und bei der Informationsübertragung akustischer Nachrichten auf den Tastsinn als aufnehmendes Sinnesorgan [20] mit Erfolg zum Einsatz gebracht werden konnte.

4. Dynamik der Mithörschwelle und akustischer Nachton

Zum Schluss soll noch auf die zur Zeit bearbeiteten Probleme hingewiesen werden. Der Dynamik der Mithörschwelle haben sich schon mehrere Forscher zugewendet. Der akustische Nachton, ein Effekt, der dem optischen negativen Nachbild entspricht, ist dagegen noch fast unerforscht und hat noch keine Erklärung gefunden.

Eine Möglichkeit, die dynamischen Eigenschaften des Gehörs zu studieren, ist die Messung der Mithörschwelle vor, während und nach dem Einschalten des Störschalles. Die Mithörschwelle bei dauernd eingeschaltetem Störschall ist sozusagen nur der eingeschwungene Zustand dessen, was jetzt besprochen werden soll.

In Fig. 11a ist der zeitliche Ablauf des Versuches dargestellt. Ein Störschallimpuls mit einer Dauer von 700 ms wird

eingeschaltet. Um die Zeit Δt, verzögert nach dem Einschalten, wird ein sehr kurzer Testschall dargeboten, auf den die Versuchsperson zu achten hat, und dessen Schwelle bestimmt wird. Wird als Störschall weisses Rauschen und als Testschall ein 5-kHz-Tonimpuls von 2 ms Dauer benutzt, dann ergibt sich in Abhängigkeit von der Verzögerungszeit Δt ein Verlauf des Schwellenpegels L_T, wie er in Fig. 11b dargestellt ist.

Drei Bereiche können unterschieden werden [2]: Bei negativen Verzögerungszeiten, wenn also der Testschall noch vor dem Einschalten des Störschalles dargeboten wird, liegt die sog. Vorhörschwelle. Sie steigt von grossen negativen Verzögerungszeiten kommend von der Ruhehörschwelle aus an und erreicht einen höchsten Wert, wenn der Störschall und der Testschall gleichzeitig eingeschaltet werden. Dort beginnt die Simultanhörschwelle, in deren Bereich Stör- und Testschall gleichzeitig dargeboten werden und in deren wesentlichem Teil (von Δt = 200 ms bis Δt = 700 ms) ein eingeschwungener Zustand erreicht ist, den man als normale Mithörschwelle bezeichnet. Nach dem Abschalten des Störschalles beginnt die Nachhörschwelle, in deren Bereich der zeitliche Übergang von der Mithörschwelle zur Ruhehörschwelle liegt. Allgemein ist der Bereich der Nachhörschwelle in der Dauer länger als derjenige der Vorhörschwelle. Worauf der ganze zeitliche Verlauf zurückgeführt werden kann, womit insbesondere die Überhöhung der Schwelle beim Einschalten des Störschalles zusammenhängt, die bei Benutzung eines breitbandigen Testschalles kaum auftritt [21], ist noch unklar. Mit der Einführung von einfachen Zeitkonstanten, wie dies z. B. bei der Erklärung der Mithörschwelle in Abhängigkeit von der Dauer des Testschalles möglich ist, lässt sich dieser komplizierte Zeitgang nicht interpretieren. Die Dynamik des Hörens ist ein Gebiet, in dem noch manche Forschungsarbeit geleistet werden muss.

Während die schon bekannten Eigenschaften des Gehörs bei weitem noch nicht alle theoretisch und quantitativ erklärt werden können, werden sogar noch neue Effekte, die beim Hören auftreten, entdeckt. Der subjektive Nachton soll als Beispiel dafür vorgeführt werden.

Wird weisses Rauschen über eine Bandsperre geleitet, so entsteht ein Bandsperrenrauschen, dessen Dichtepegel l_R als Funktion der Frequenz für eine Mittenfrequenz von 4 kHz und einer Bandsperrenbreite von etwa 1 kHz Fig. 12 zeigt. Wird ein solches Geräusch den Versuchspersonen etwa 30 s lang bei verhältnismässig niederem Gesamtschallpegel von

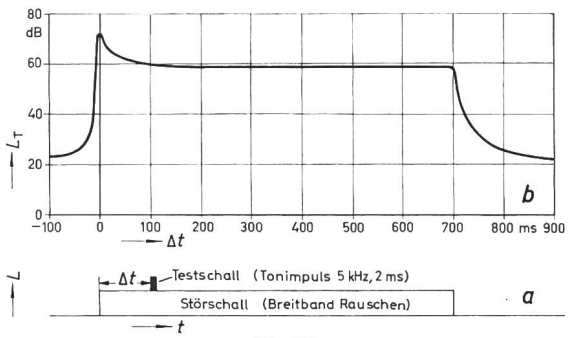

Fig. 11
Mithörschwelle L_T eines 2 ms langen 5-kHz-Tonimpulses
verdeckt durch Breitbandrauschen als Funktion der Verzögerungszeit Δt (*b*)
a Skizze für den zeitlichen Ablauf von Störschall und Testschall
Erklärungen siehe im Text

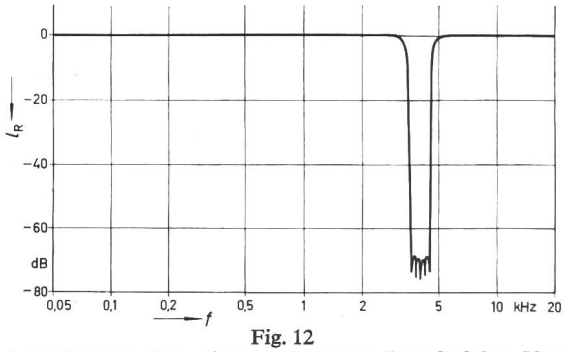

Fig. 12
Verlauf des Dichtepegels l_R eines zur Erzeugung des subjektiven Nachtones benutzten Bandsperrenrauschens als Funktion der Frequenz f

etwa 50 dB dargeboten und dann plötzlich abgeschaltet, so entsteht bei den Zuhörenden trotz der «physikalischen Ruhe» die Empfindung eines in etwa 5 s abklingenden Tones [22]. Wird den Versuchspersonen die Aufgabe gestellt, die Tonhöhe dieses nur subjektiv vorhandenen Nachtones durch Vergleich mit einem wirklichen Ton zu bestimmen, so hat dieser Ton eine Frequenz, die innerhalb des Sperrbereichs der Bandsperre liegt. Sie ist nicht konstant, sondern hängt vom Pegel des vorher dargebotenen Rauschens in der Weise ab, dass mit wachsendem Pegel die Tonhöhe des Nachtons ansteigt. Wird der Pegel des Rauschens über 70 dB hinaus gesteigert, tritt der Nachton garnicht mehr auf.

Die Verschiebung der Tonhöhe mit wachsendem Pegel könnte dadurch erklärt werden, dass sich das Minimum der vom Rauschen verursachten Erregungsverteilung mit wachsendem Pegel nach höheren Tonheiten verschiebt. Warum aber ein vorhergehendes Rauschen ein Nachklingen mit ausgeprägtem Toncharakter erzeugt, ist eine Frage, deren Beantwortung weitere Kenntnisse sowohl auf psychoakustischem als auch auf physiologischem Gebiet voraussetzt. Die Ähnlichkeit des beim Auge bekannten Effektes des negativen Nachbildes mit der gefundenen Erscheinung des Nachtones lässt lediglich vermuten, dass auch beim Gehör ein Bereich schwacher Anregung, der zwischen Bereichen starker Anregung liegt, nach dem Ende der Anregungen eine Überaktivität zeigt.

Die Vorführung des Effektes bei einer Bandsperrenmittenfrequenz von 4 kHz gelingt bei Studenten recht gut. Bei älteren Menschen ist es allerdings nicht immer möglich, den Nachton zu erzeugen, da mit zunehmendem Alter das Hören gerade der höheren Töne geschwächt wird. Die Möglichkeit jedoch, etwas zu hören, wo eigentlich gar nichts ist, sollte bleiben.

Literatur

[1] *W. Furrer:* Das Ohr und das Hören, eine Grundlage der Nachrichtentechnik. Techn. Mitt. PTT 21(1943), S. 201...217.

[2] *E. Zwicker* und *R. Feldtkeller:* Das Ohr als Nachrichtenempfänger. 2. Auflage, Stuttgart, Hirzel-Verlag, 1967.

[3] *H. Fletcher* and *W. A. Munson:* Loudness, its Definition, Measurement, and Calculation. J. Acoustical Society of America 5(1933), S. 82...108.

[4] *D. W. Robinson:* The Subjective Loudness Scale. Acustica 7(1957), S. 217...233.

[5] *R. Feldtkeller, E. Zwicker* und *E. Port:* Lautstärke, Verhältnislautheit und Summenlautheit. Frequenz 13(1959), S. 108...117.

[6] *S. S. Stevens:* On the Psycho-Physical Law. Psychological Review 64(1957), S. 153...181.

[7] *S. S. Stevens, J. Volkmann* and *E. B. Newman:* A Scale for the Measurement of Psychological Magnitude Pitch. J. Acoustical Society of America 8(1937), S. 185...190.

[8] *E. Zwicker:* Über psychologische und methodische Grundlagen der Lautheit. Acustica (Akustische Beihefte) 8(1958)1, S. 237...258.

[9] *D. Maiwald:* Ein Funktionsschema des Gehörs zur Beschreibung der Erkennbarkeit kleiner Frequenz- und Amplitudenänderungen. Acustica 18(1967), S. 81...92.

[10] *G. v. Békésy:* Über die Resonanzkurve und die Abklingzeit der verschiedenen Stellen der Schneckentrennwand. Akustische Zeitschrift 8(1943), S. 66...76.
[11] *R. Ötinger* und *H. Hauser:* Ein elektrischer Kettenleiter zur Untersuchung der mechanischen Schwingungsvorgänge im Innenrohr. Acustica 11(1961), S. 161...177.
[12] *G. v. Békésy:* Descriptions of some Mechanical Properties of the Organ of Corti. J. Acoustical Society of America 25(1953), S. 770...785.
[13] *E. Zwicker:* Temporal Effects in Simultaneous Masking and Loudness. J. Acoustical Society of America 38(1965), S. 132...141.
[14] Méthode de calcul du niveau d'isosonie. Recommandation ISO R 532-1966.
[15] *T. Pfeiffer:* Ein Lautstärke-Messgerät für breitbandige und impulshaltige Schalle. Acustica 17(1966), S. 322...334.
[16] *E. Zwicker:* Die elementaren Grundlagen zur Bestimmung der Informationskapazität des Gehörs. Acustica 6(1956), S. 365...381.
[17] *D. Maiwald:* Beziehungen zwischen Schallspektrum, Mithörschwelle und Erregung des Gehörs. Acustica 18(1967), S. 69...80.
[18] *E. Zwicker:* Über ein einfaches Funktionsschema des Gehörs. Acustica 12(1962), S. 22...28.
[19] *E. Zwicker, W. Hess* und *E. Terhardt:* Erkennung gesprochener Zahlworte mit Funktionsmodell und elektronischer Rechenanlage. Kybernetik 3(1966/67), S. 267...272.
[20] *E. Zwicker:* Möglichkeiten zur Spracherkennung über den Tastsinn mit Hilfe eines Funktionsmodells des Gehörs. Beihefte zur Zeitschrift «Elektronische Rechenanlagen» 7(1963), S. 239...244.
[21] *E. Zwicker:* Temporal Effects in Simultaneous Masking by White-Noise Bursts. J. acoustical Society of America 37(1965), S. 653...663.
[22] *E. Zwicker:* «Negative Afterimage» in Hearing. J. Acoustical Society of America 36(1964), S. 2413...2415.

Adresse des Autors:
Prof. Dr.-Ing. *Eberhard Zwicker,* Institut für Elektroakustik Technische Hochschule München, Franz-Josef-Strasse 38, D-8 München 13.

Berechnung des elektrischen Feldes von Bündelleitern

Von *H. Singer,* München, und *H. Bässler,* Memmingen

621.315.145:537.212

1. Einleitung

Die Vorzüge des Bündelleiters zeigten im Jahre 1932 erstmals *G. Markt* und *B. Mengele* auf [1][1]). Heute gehören Bündelleiter bereits zu den festen Konstruktionsmitteln der Hochspannungstechnik [4; 5].

Diese Stellung gewann der Bündelleiter durch Vorteile vielfacher Art gegenüber einem Einzelleiter [2]: Neben der Verringerung der elektrischen Feldstärke, der hohen Strahlungsfestigkeit und der Verminderung der Koronaverluste beseitigt er die technologischen Schwierigkeiten, Einzelleiter mit grossem Querschnitt herzustellen. Ausserdem sind Seile mit kleinerem Querschnitt wegen besserer Wärmeabfuhr höher belastbar. Bei einer Drehstromübertragung spielt auch die Grösse der natürlichen Leistung eine Rolle. Bündelleitungen weisen eine grössere Betriebskapazität und einen kleineren induktiven Widerstand auf als Einzelleitersysteme. Damit wird der Wellenwiderstand verringert, und die natürliche Leistung der Leitung steigt. So ist es verständlich, wenn sich bei hohen Übertragungsspannungen Bündelleiter wirtschaftlicher erweisen als Einzelleiter [2; 5]. Während also bei Gleichspannung das elektrische Feld die Abmessungen der Leitung bestimmt, wird bei Wechsel- oder Drehstromübertragung ein Abwägen von Feldeigenschaften und Wellenwiderstand notwendig.

In den letzten Jahren sind in der Literatur einige Beiträge zur Berechnung des elektrostatischen Feldes von Bündelleitern erschienen, wo entweder die konforme Abbildung benutzt [6; 8] oder mit den Maxwellschen Potentialkoeffizienten gerechnet wird [3; 7]. Auch Feldbilder von Bündeln wurden veröffentlicht [6; 8]. Freilich erstrecken sich diese Ergebnisse meist nur auf die Anordnung Bündel gegen Hüllzylinder, oder es wurden Lösungswege angedeutet ohne analytische Darstellung, soweit es sich um den Ausnutzungsfaktor und den feldstärkegleichen Ersatzradius handelt.

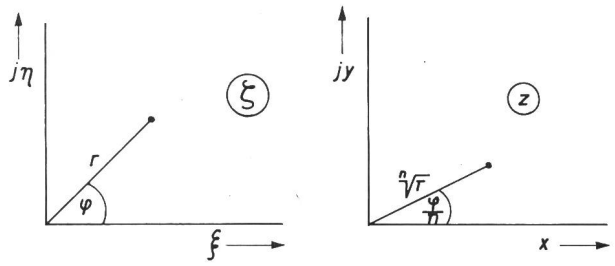

Fig. 1
Abbildung $z=\sqrt[n]{\zeta}$
ζ-Ebene mit $\zeta=\xi+j\eta$, Winkel φ und Strecke r; z-Ebene mit $z=x+jy$, Winkel φ/n und Strecke $\sqrt[n]{r}$

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Aufgabe des vorliegenden Beitrages soll es nun sein, mit Hilfe der konformen Abbildung das Feld der Anordnungen Bündel gegen Bündel und Bündel gegen Ebene zu berechnen.

2. Berechnung der Potentiallinien

Die Abbildung $z=\sqrt[n]{\zeta}$ faltet die gesamte ζ-Ebene auf den n-ten Teil der z-Ebene (Fig. 1) und bildet den Punkt A der

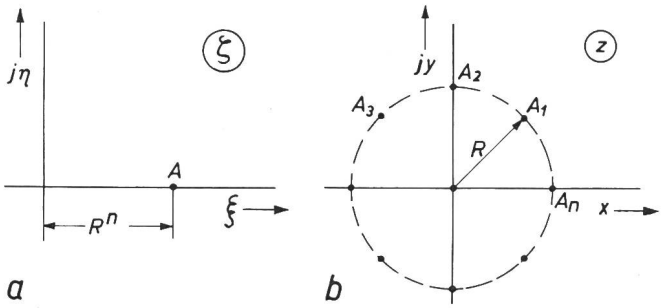

Fig. 2
Abbildung des Punktes A mit $z=\sqrt[n]{\zeta}$ auf $A_1, A_2, \ldots A_n$
a ζ-Ebene mit $\zeta=\xi+j\eta$; *b* z-Ebene mit $z=x+jy$

ζ-Ebene nach Fig. 2 auf die Punkte $A_1, A_2, \ldots A_n$ der z-Ebene ab. Die Abbildung

$$\zeta = z^n - R^n = \prod_{\nu=1}^{n} \left(z - R \cdot e^{j2\pi \frac{\nu}{n}} \right) \tag{1}$$

führt im Prinzip die gleiche Transformation durch; nur liegt hier der Punkt A im Ursprung der ζ-Ebene. Damit ist das Feld eines Bündels (Fig. 2b) auf das Feld eines einzelnen Punktes (Fig. 2a) zurückgeführt, dessen Potentiallinien bekanntlich konzentrische Kreise bilden. Diese Kreise lassen sich durch $w = \log \zeta$ auf einen Plattenkondensator abbilden. Wird schliesslich das Bündel um jH verschoben und an der x-Achse gespiegelt, so entsteht die Anordnung Bündel—Bündel oder Bündel—Ebene.

Die Abbildung dieses Bildes vermittelt die Transformation:

$$w = \sum_{\nu=1}^{n} \frac{z - jH - R \cdot e^{j\varphi_\nu}}{z + jH - R \cdot e^{-j\varphi_\nu}} \tag{2}$$

mit R als Bündelradius, H als Höhe des Bündelmittelpunkts über der Ebene und n als Anzahl der Teilleiter; φ_ν ist Winkel