

In dem hier vorliegenden dritten Teil der Artikelserie „Gehör-Mikrofon-Kopfhörer“ werden die psychoakustischen Eigenschaften des menschlichen Gehörs beschrieben

von Dr. Ivar Veit
SENNHEISER electronic KG,
3002 Wedemark

3. Psychoakustische Eigenschaften unseres Gehörs

Im vorangegangenen zweiten Teil dieser Aufsatzreihe wurde bereits über die physikalische Funktion unseres Gehörs berichtet. Des Weiteren wurde über die Folgen einer sehr intensiven und langandauernden Einwirkung von Schall oder besser gesagt von Lärm auf unser Gehör gesprochen. Der nachfolgende dritte Teil befaßt sich zunächst mit den Möglichkeiten einer meßtechnischen Untersuchung unseres Ohres sowie mit all' den Dingen, die in dem Zusammenhang wissenschaftlich erscheinen. Im Anschluß daran wird eine Reihe von besonders interessanten psychoakustischen Eigenschaften unseres Hörorgans vorgestellt und erläutert. Der Beitrag schließt mit einer Betrachtung über das Verhalten unseres Gehörs bei der Darbietung von nichtlinear verzerrten Signalen.

Wie wir aus Erfahrung wissen, kann unser Gehör akustische Ereignisse nur innerhalb eines ganz bestimmten Frequenz- und Schalldruckpegelbereichs wahrnehmen. Betrachtet man den Pegelbereich, so gibt es eine untere und eine obere Schalldruckpegelgrenze. Die untere Grenze bezeichnet man als Hörschwelle und die obere als Schmerzempfindungs- oder Schmerzgrenze. Das Gebiet zwischen diesen beiden Grenzen oder Schwellen nennt man Hörfläche. Das Bild 3.1 zeigt die Hörfläche von normalhö-

renden Personen. Die vertikale Ausdehnung dieser Fläche gibt den für das Hören nutzbaren Schalldruckpegel- oder auch Dynamikbereich an. Das normalhörende menschliche Ohr erreicht eine Hördynamik bis zu 130 dB.

Die Hörschwelle gibt denjenigen Schalldruck bzw. Schalldruckpegel an, bei dem unser Ohr den Schall gerade noch wahrzunehmen vermag. Diese Schwelle läßt sich meßtechnisch sehr genau ermitteln. Anders liegen die Verhältnisse bei der Schmerzschwelle; sie wird von den meisten Probanden nicht so eindeutig erkannt und angegeben. Hinzu kommt noch, daß ihre Bestimmung mit einer unzumutbar starken, wenn nicht gar bedenklich hohen Belastung des Innenohres verbunden ist. — Beide Schwellen sind frequenzabhängig. Die größte Empfindlichkeit besitzt unser Ohr im Frequenzbereich zwischen etwa 700 und 6000 Hz. Der kleinste Schalldruck, den wir in diesem Bereich noch wahrnehmen, beträgt etwa $20 \mu\text{N}/\text{m}^2$ (= Effektivwert). Dieser Wert wurde bekanntlich als Bezugswert p_0 für die Definition des Schalldruckpegels festgelegt.

Jede Beeinträchtigung des Hörvermögens äußert sich am auffallendsten im Verlauf der individuellen Hörschwelle. Die Messung der Hörschwelle mit reinen Tönen,

d. h. die Aufnahme eines sogenannten Tonaudiogramms, z. B. durch den Ohrenarzt oder den Hörgeräte-Akustiker, ist daher für die Diagnostik eines Hörschadens von erheblicher Bedeutung. Aus dem Frequenzgang des Hörverlustes — darunter versteht man den Schallpegelabstand zwischen der gemessenen Hörschwelle eines Hörgeschädigten und der Hörschwelle normalhörender Personen bei den verschiedenen Meßfrequenzen — kann oftmals schon auf die Art des individuellen Hörschadens geschlossen werden.

Neben der sogenannten Tonaudiometrie, bei der die Höhe eines eventuellen Hörverlustes für Töne (ausgedrückt in dB) quantitativ festgestellt wird, gibt es eine ganze Reihe anderer Methoden zur Gehörprüfung, die auch noch weitergehendere Aussagen über den Zustand des Hörvermögens abzugeben erlauben. Das sind insbesondere die verschiedenen Meßverfahren der sogenannten überschwelligen Audiometrie, der objektiven Audiometrie und der Sprachaudiometrie. Bei der überschwelligen Audiometrie arbeitet man, wie es der Name bereits verrät, mit akustischen Testsignalen, deren Pegel oberhalb der Hörschwelle liegen. Die Durchführung dieser Untersuchungen ist in jedem Falle — und das gilt gleichermaßen für die Tonaudiometrie wie auch für die Sprachaudiometrie — von der aktiven Mitwirkung des Probanden abhängig. Wenn der Proband während des Meßvorgangs unkonzentriert ist oder gar simuliert, ist das Ergebnis natürlich wertlos. Anders sieht es bei den diversen Verfahren der objektiven Audiometrie aus. Dort werden objektiv meßbare Größen quasi als Antwort auf eine vorangegangene Beschallung vom Probanden abgeleitet und ausgewertet. Hier hat der Proband keinen Einfluß auf das Resultat. Diese Meßverfahren eignen sich daher besonders auch zur Untersuchung von Kleinkindern.

Bei der Sprachaudiometrie prüft man neben dem reinen Hörvermögen auch das Verständnis von Sprache. Dazu bedient man sich eines sehr sorgfältig ausgewählten Sprach-Testmaterials. Die sprachaudiometrische Untersuchung erlaubt es, sehr verlässliche Hinweise darüber zu bekommen, ob die Ursache für einen Hörverlust noch im Innenohr oder bereits im retrochylären (= hinter der Innenohrschnecke gelegenen) Bereich zu suchen ist.

Liegt die Ursache für eine Hörstörung noch vor dem Innenohr, so handelt es sich i. a. um eine Schalleitungsstörung bzw. -schwerhörigkeit. In derartigen Fällen kann der HNO-Arzt in aller Regel helfen. Wird die

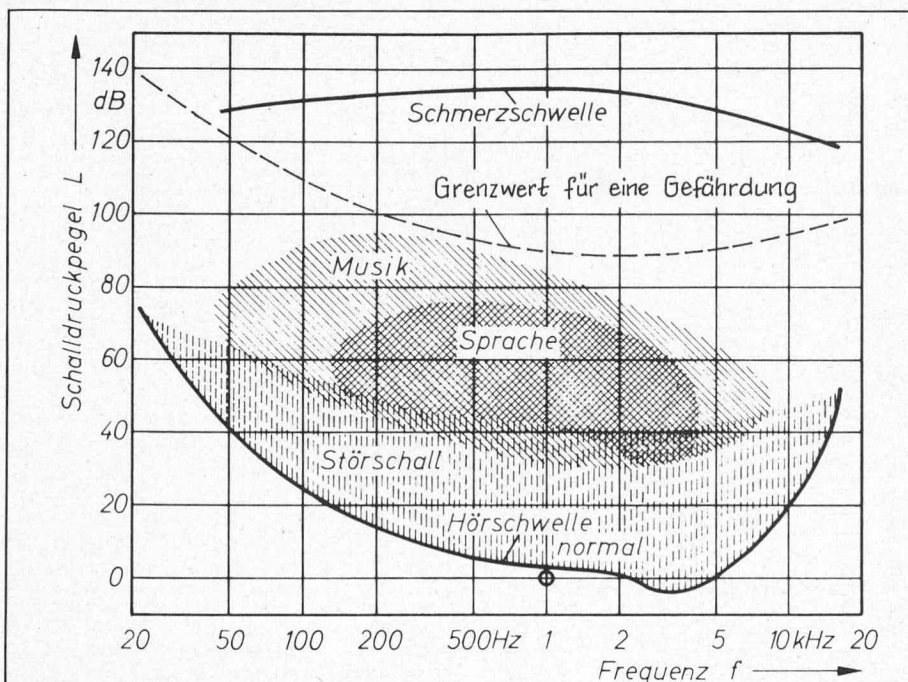


Bild 3.1
Hörschwelle, Schmerzschwelle und Hörfläche (Hördynamik) eines normalhörenden Ohres. Schraffiert eingezeichnet sind darin die spektralen Schallpegelverteilungen von Sprache (= menschliche Stimme im Abstand von ca. 1 m), Musik und üblicherweise vorhandenem Störschall

Ursache eines Hörschadens dagegen im Innenohr oder gar retrocochleär lokalisiert, so spricht man von einer Schallempfindungsschwerhörigkeit. In diesem Falle ist meist nur noch die Benutzung eines Hörgerätes möglich. Die Hörmittelindustrie bietet heutzutage eine Fülle von Geräten für die verschiedenartigsten Erfordernisse an, angefangen von den leistungsstarken Taschenhörgeräten über hinter-dem-Ohr (= HdO) zu tragende Geräte und Hörbrillen bis hin zu den Im-Ohr-Geräten.

Neben den herkömmlichen Hörhilfen gibt es außerdem auch noch andere elektroakustische Möglichkeiten, um Menschen mit Hörproblemen zu helfen. Bild 3.2. zeigt als Beispiel hierfür ein derartiges Gerät (Conferette C 2). Es handelt sich dabei um eine kleine stereophone Übertragungsanlage mit zwei eingebauten Elektretmikrofonen und zwei ebenfalls eingebauten elektrodynamischen Hörsystemen. Zur Inbetriebnahme wird das Gerät lediglich in beide Gehörgangöffnungen eingehängt. Der Pegel der eigenen Stimme wird hierbei übrigens durch eine besondere Kompensationsschaltung herabgesetzt. Das Gerät kann je nach Situation und Bedarf zu Hause, bei Konferenzen oder auch anderswo im Berufsleben sehr hilfreich sein. Neben der rein akustischen Übertragung bietet diese kleine Conferette zusätzlich noch die Möglichkeit eines drahtlosen Empfangs von Sprache oder Musik, und zwar mit Hilfe von entsprechend moduliertem Infrarotlicht. Wird z. B. am NF-Ausgang eines Fernsehgerätes ein geeigneter Infrarot-Sender (Trägerfrequenz: 95 kHz) angeschlossen, so kann man mit diesem Gerät beispielsweise den Fernsehton drahtlos empfangen.

Wenden wir uns nun der Beurteilung von Schallereignissen durch unser Gehör zu. Wie aus dem Bild 3.1 ersichtlich ist, wird unsere Hörfläche von zwei meßbaren Größen bestimmt, und zwar von der Höhe des Schalldruckpegels (stellvertretend für die Intensität des mit unseren Ohren empfangenen Schalls) und von der Frequenz. Diese beiden Größen begegnen uns in inhaltlich durchaus verwandter, wenn auch nur selten präzise und zutreffend angewandter Form auch im täglichen Sprachgebrauch, nämlich als ‚Lautstärke‘ und als ‚Tonhöhe‘. Beide Begriffe sind dennoch physikalisch sehr genau definiert. Was der Akustiker unter Lautstärke und Tonhöhe tatsächlich versteht, soll nachfolgend etwas eingehender beleuchtet werden.

Zunächst zur Lautstärke: Im Bild 3.1 erkennt man sehr deutlich, daß unsere Hörschwellenkurve sehr stark frequenzabhängig ist. Wir empfinden daher zwei Schallergebnisse (z. B. zwei verschiedene ‚musikalische‘ Töne) gleichen Schalldruckpegels jedoch unterschiedlicher Frequenz nicht als gleich laut. Um dennoch subjektive Lautstärkeempfindungen quantitativ richtig beurteilen und angeben zu können, hat man neben den rein physikalischen Größen des Schalls (Schalldruckpegel und Frequenz) auch zwei entsprechende hörphysiologische Größen eingeführt. Eine davon ist die Lautstärke. Die Ermittlung der Lautstärke eines Schallereignisses — das kann ein rei-

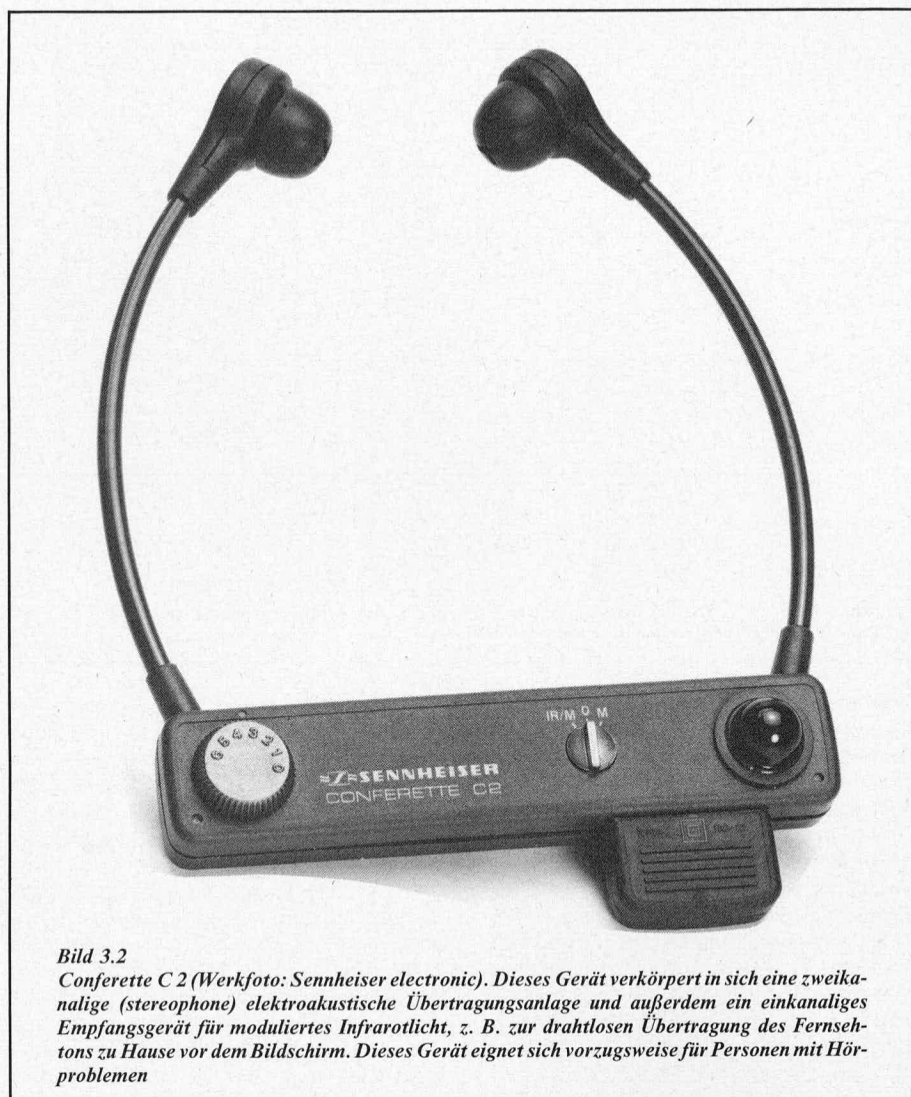


Bild 3.2
Conferette C 2 (Werkfoto: Sennheiser electronic). Dieses Gerät verkörpert in sich eine zweikanalige (stereophone) elektroakustische Übertragungsanlage und außerdem ein einkanaliges Empfangsgerät für moduliertes Infrarotlicht, z. B. zur drahtlosen Übertragung des Fernsehtons zu Hause vor dem Bildschirm. Dieses Gerät eignet sich vorzugsweise für Personen mit Hörproblemen

ner Ton beliebiger Frequenz, ein Tongemisch oder auch ein Geräusch sein — wird auf einen subjektiven Vergleich mit einem kalibrierten Bezugs- oder Normschall zurückgeführt, dessen Schalldruckpegel variabel ist; auf ihn wird die zu bestimmende Lautstärke durch einen Hörvergleich eingestellt und anschließend abgelesen. Die Frequenz des Bezugsschalls beträgt 1 kHz. Der nach seiner Lautstärke zu beurteilende Schall sowie der Bezugsschall werden von einer normalhörenden Versuchsperson in wechselnder Folge abgehört. Der Schalldruckpegel des Normschalls wird dabei so eingestellt, daß er gleich laut empfunden wird wie der nach seiner Lautstärke zu bewertende Schall. Der Pegel des gleich lauten Bezugstones wurde als Maß für die Lautstärke des zu messenden Schallereignisses (von beliebiger Frequenz bzw. von beliebiger spektraler Zusammensetzung) festgelegt. Die Einheit der Lautstärke ist das „phon“. Unter der Lautstärke von beispielsweise 80 phon versteht man einen Schall, der genau so laut empfunden wird wie ein 1-kHz-Sinuston mit einem Schalldruckpegel von 80 dB.

Den Zusammenhang zwischen der so definierten Lautstärke und dem Schalldruckpegel haben seinerzeit für sämtliche Frequenzen des Hörschallbereichs H. Fletcher und A. W. Munson mit sinusförmigen Einzeltönen untersucht und durch Kurven

gleicher Lautstärke (auch: Isophonen genannt) dargestellt, siehe Bild 3.3. Diese Kurven wurden 1961 als ISO-Empfehlung R 226 international eingeführt. Sie veranschaulichen die spektrale Empfindlichkeit unseres Gehörs. Die Kurve für 0 phon ist identisch mit dem Frequenzgang der Hörschwelle. Bei kleinen Lautstärken ist die Frequenzabhängigkeit ausgeprägter als bei großen Lautstärken.

Den ersten anerkannten Vorschlag für die Wahl eines Lautstärkemaßstabes machte H. Barkhausen im Jahre 1926. Von ihm stammt auch der erste Lautstärkemesser auf der Basis des subjektiven Hörvergleichs. Zur Vermeidung der umständlichen und fehleranfälligen subjektiven Messung wurden später objektiv arbeitende und anzeigende Meßgeräte entwickelt und gebaut, wie z. B. der DIN-Lautstärkemesser. Sie enthalten ähnlich wie Schallpegelmesser ein Mikrofon, einen Meßverstärker und eine Meßwertanzeige. Darüber hinaus besitzen sie zusätzlich noch sogenannte Ohrfilter, mit denen für die verschiedenen Pegelbereiche die Kurven gleicher Lautstärke angenähert werden. Die Eigenschaften des menschlichen Ohres können hiermit naturgemäß nur unvollkommen nachgebildet werden, so daß die auf diese Weise erzielten Meßergebnisse sich von denjenigen der rein subjektiven Lautstärkemessung durchaus unterscheiden können.

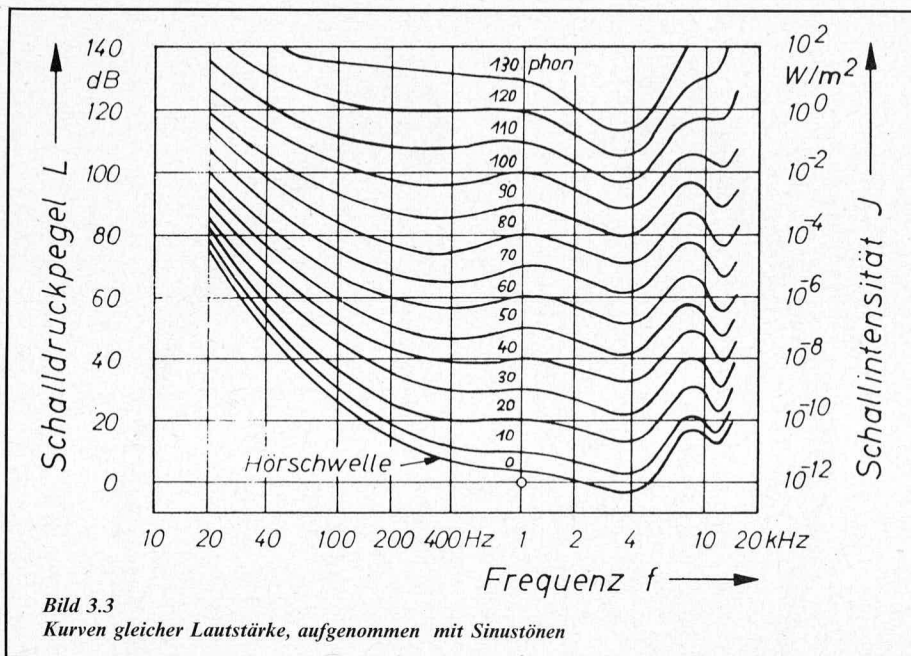


Bild 3.3
Kurven gleicher Lautstärke, aufgenommen mit Sinustönen

Mit dem DIN-Lautstärkemesser mißt man Lautstärkepegel in DIN-phon. Der DIN-Lautstärkemesser besitzt drei Ohrkurvenfilter, und zwar für die Bereiche 0...30 DIN-phon, 30...60 DIN-phon und über 60 DIN-phon. Durch die Angabe des Lautstärkepegels in DIN-phon ist eine Verwechslung mit dem objektiv gemessenen Schalldruckpegel in dB ausgeschlossen. Bei 1 kHz sind der Lautstärkepegel und der Schalldruckpegel zahlenmäßig einander gleich. — Die heute üblichen objektiv arbeitenden Schall(druck)pegel-Meßgeräte haben ebenfalls — ähnlich wie die Ohrkurvenfilter bei den DIN-Lautstärkemessern — drei international festgelegte Bewertungsfiler (A, B und C), deren Frequenzgänge mit denen der Ohrfilter weitgehend übereinstimmen, siehe Bild 3.4. Die Wahl

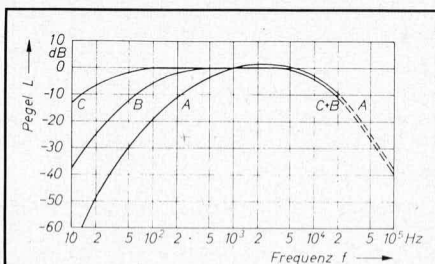


Bild 3.4
International festgelegte Bewertungskurven für Schallpegelmesser mit den Bewertungsfiltern A, B und C nach IEC

der Bewertungskurve ist dabei nicht mehr starr an bestimmte Pegelbereiche gebunden. Es wird für viele Anwendungsbereiche der Praxis sogar empfohlen, möglichst nur noch mit der Bewertungskurve A zu messen und den so bewerteten Schalldruckpegel L_A in dB (A) anzugeben.

Die logarithmische phon- bzw. dB-Skala bereitet dem Praktiker gelegentlich Schwierigkeiten, insbesondere wenn es darum geht, die Wirkung von mehreren gleichzeitig betriebenen Schallquellen auch zahlenmäßig anschaulich zu dokumentieren. Dazu folgendes Beispiel:

Der Lärm einer Maschine habe in einer bestimmten Entfernung beispielsweise einen Lautstärkepegel von 77 phon. Setzt man eine zweite gleichweit entfernte und gleichlaute Maschine in Betrieb, so steigt der gesamte Lautstärkepegel wegen der Verdopplung der Energie auf „nur“ 80 phon an, d. h. die Verdopplung der Energie äußert sich nicht in einer Verdopplung des Lautstärke-Zahlenwertes; mit anderen Worten, man vermißt eine Übereinstimmung zwischen der Empfindungsänderung und der Änderung des die Empfindung beschreibenden Zahlenwertes. Der Praktiker wünscht sich lieber einen verhältnismäßigen Zusammenhang zwischen der subjektiven Empfindung und dem dazugehörigen Zahlenwert. Einen solchen Zusammenhang bekommt man durch die Einführung der sogenannten Lautheit (Symbol: N) mit der Einheit sone. Die Lautheit von 1 sone entspricht definitionsgemäß einer Lautstärke von 40 phon. Der doppelt so laut empfundene Schall hat die Lautheit 2 sone, der vierfach so laut empfundene 4 sone, usw. Oberhalb von 40 phon entspricht jeder Lautheitsverdopplung ein Lautstärkezuwachs um etwa 10 phon. Damit ergibt sich die folgende Umrechnungsbeziehung zwischen der Lautheit N in sone und der Lautstärke bzw. dem Lautstärkepegel L_N in phon:

$$L_N - 40 = 10 \cdot \lg N \approx 33 \cdot \lg N$$

Das Diagramm in Bild 3.5 zeigt diesen Zusammenhang grafisch.

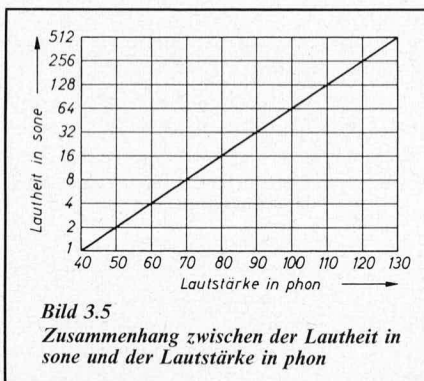


Bild 3.5
Zusammenhang zwischen der Lautheit in sone und der Lautstärke in phon

Die zweite psychoakustische Empfindungsgröße, die neben der Lautstärke für die subjektive Beurteilung eines — vorzugsweise musikalischen — Schallereignisses bedeutsam ist, wird mit dem Begriff Tonhöhe umschrieben. Zwischen der Frequenz eines (tonalen) Schallsignals und seiner subjektiv empfundenen Tonhöhe besteht im Tonfrequenzbereich unterhalb von etwa 500 Hz ein linearer Zusammenhang. Bei höheren Frequenzen ist das nicht mehr der Fall. Das Bild 3.6 veranschaulicht diese Eigenart unseres Tonhöhenempfindens grafisch. Die

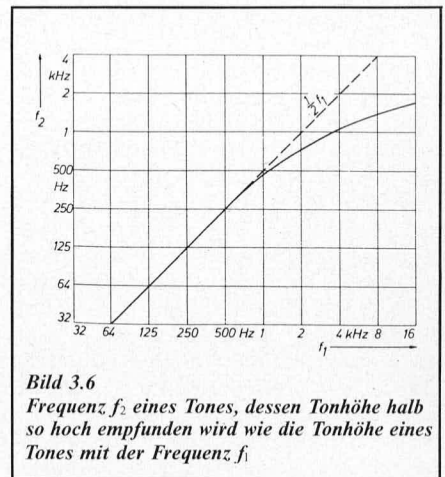


Bild 3.6
Frequenz f_2 eines Tones, dessen Tonhöhe halb so hoch empfunden wird wie die Tonhöhe eines Tones mit der Frequenz f_1

dort dargestellte Kurve wurde folgendermaßen bestimmt: Man bietet einer Versuchsperson über einen Lautsprecher einige Sekunden lang ein sehr schmalbandiges Rauschsignal an, das schon einen ausgeprägten Toncharakter besitzt. Anschließend bringt man derselben Versuchsperson Töne verschiedener Frequenz zu Gehör mit der Aufgabe, denjenigen Ton herauszufinden und anzugeben, dessen Tonhöhe als halb so groß empfunden wird wie die Tonhöhe des schmalbandigen Rauschsignals. Führt man diesen Versuch für verschiedene Rauschsignale durch, deren Mittenfrequenz über den gesamten hörbaren Bereich verteilt sind, so bekommt man das in Bild 3.6 gezeigte Ergebnis: Unterhalb von 500 Hz ist $f_2 = \frac{1}{2} \cdot f_1$, oberhalb von 500 Hz bleibt f_2 mehr und mehr hinter $\frac{1}{2} \cdot f_1$ zurück. Hier trennt sich die „Empfindungsgröße Tonhöhe“ von der „Reizgröße Frequenz“.

Die Frequenz von 500 Hz stellt auch hinsichtlich unseres Tonhöhenunterscheidungsvermögens eine Art „Eckfrequenz“ dar. Untersucht man nämlich die kleinsten von unserem Gehör noch wahrnehmbaren Frequenzänderungen Δf (bei einer sinusförmigen Frequenzmodulation mit einer Modulationsfrequenz f_{mod}), so stellt man fest, daß dieses Δf unterhalb von etwa 500 Hz nahezu frequenzunabhängig ist; oberhalb von 500 Hz dagegen steigt Δf mit der Tonfrequenz f an. Das Bild 3.7 veranschaulicht dieses Verhalten am Beispiel eines konkreten Meßergebnisses, wie es bei einem Schalldruckpegel von 70 dB und einer Modulationsfrequenz $f_{mod} = 4$ Hz gemessen worden ist.

Des weiteren wissen wir heute, daß unser Gehör die akustische Leistung eines Schallereignisses (z. B. von weißem Rauschen) in Frequenzabschnitte einteilt und bewertet,

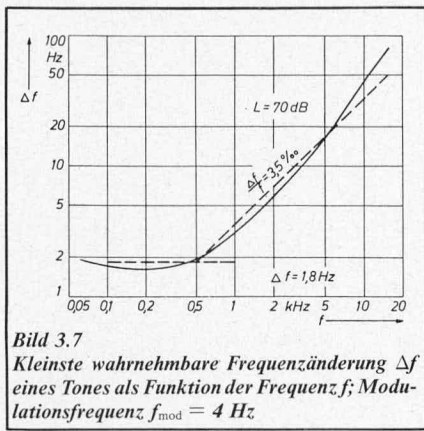


Bild 3.7
Kleinste wahrnehmbare Frequenzänderung Δf eines Tones als Funktion der Frequenz f ; Modulationsfrequenz $f_{\text{mod}} = 4 \text{ Hz}$

die unterhalb von — wiederum — 500 Hz eine Breite haben, die von der jeweiligen Bandmittenfrequenz f_m unabhängig ist. Oberhalb von 500 Hz nimmt die Breite dieser Frequenzbänder zu, und zwar proportional mit f_m . — Es gibt noch eine ganze Reihe weiterer Beispiele dafür, daß das psychoakustische Verhalten unseres Gehörs unterhalb und oberhalb von etwa 500 Hz qualitativ verschieden voneinander ist. Eine erschöpfende Behandlung dieser Thematik ist im Rahmen dieser Aufsatzreihe verständlicherweise nicht möglich. Der interessierte Leser sei daher auf die einschlägige Literatur*) hingewiesen.

Zur Abgrenzung der Tonhöhe als Empfindungsgröße gegenüber allem anderen, was sonst im allgemeinen Sprachgebrauch als „Tonhöhe“ bezeichnet wird, hat man den Begriff der „Tonheit“ (Symbol: z) eingeführt. Wie der Kurvenverlauf in Bild 3.6 schon zeigte, kann man unterhalb von 500 Hz der „halben Frequenz“ auch die „halbe Tonhöhe“ zuschreiben. In diesem Frequenzgebiet sollten daher auch die Zahlenwerte von Empfindungsgröße und Reizgröße übereinstimmen. Nach einem Vorschlag von S. S. Stevens wurde für die Tonheit die Einheit „mel“ eingeführt. Unterhalb von 500 Hz ist der Zahlenwert der Tonheit in mel gleich dem Zahlenwert der Frequenz in Hz, siehe Bild 3.8. Oberhalb von 500 Hz stimmen die Zahlenwerte nicht mehr überein: Während die Frequenzen des hörbaren Bereichs bis zu 16 kHz gleichmäßig ansteigen, wächst die Tonheit nur bis zu etwa 2400 mel an.

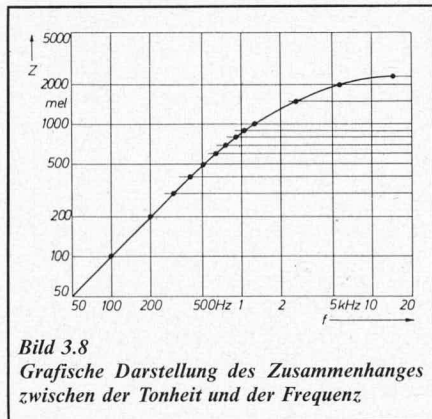


Bild 3.8
Grafische Darstellung des Zusammenhanges zwischen der Tonheit und der Frequenz

Ein anderer Themenkomplex, der bei der Erörterung psychoakustischer Fragen auf keinen Fall ausgelassen werden darf, betrifft die sogenannte „Verdeckung“ (oder

auch: Maskierung) eines Schallereignisses durch ein anderes. Dazu ein Beispiel aus dem Alltag: In einer ruhigen Umgebung können wir einen Gesprächspartner erfahrungsgemäß noch gut hören und verstehen, selbst wenn dieser relativ leise spricht. Die Situation ändert sich aber schlagartig, sobald eine Lärmschallquelle in Betrieb gesetzt wird. Unser Gesprächspartner kann dabei — je nach den Pegelverhältnissen — für uns plötzlich unhörbar werden. Wir hören seine Stimme erst wieder, wenn er erheblich lauter spricht, d. h. wenn er seinen Sprachschallpegel entsprechend steigert. Zuvor war seine Stimme — wie es in der Sprache des Akustikers heißt — vom Lärm (= Störschall) „verdeckt“ oder „maskiert“.

Das Ausmaß einer solchen Verdeckung läßt sich quantitativ am deutlichsten an der durch sie hervorgerufenen Veränderung unserer (Ruhe) Hörschwelle erkennen und studieren. Je nach der Höhe des Pegels und je nach der spektralen Zusammensetzung des verdeckenden Schalls erfährt die Hörschwelle stets eine mehr oder weniger ausgeprägte Anhebung, so daß der Testschall für die Schwellenbestimmung in diesem jeweiligen Bereich entsprechend lauter gewählt werden muß, um trotz des verdeckenden Signals noch „mitgehört“ zu werden. Aus diesem Grunde nennt man die unter diesen Umständen gemessene Hörschwelle auch „Mithörschwelle“, siehe Bild 3.9. Wird für die Verdeckung ein monofrequentes oder sehr schmalbandiges (Rausch)-Signal benutzt, so zeigt auch die Mithörschwelle nur in einem relativ schmalen Frequenzbereich eine entsprechende Schwellenanhebung (s. Bild 3.9a). Ist der verdeckende Schall dagegen breitbandiger Natur (z. B. Breitbandrauschen), so ist auch die Anhebung der daraus resultierenden Mithörschwelle entsprechend breitbandig (Bild 3.9b). Bei einer Verdeckung durch weißes Rauschen (= Rauschen mit frequenzunabhängiger Schallintensitäts-

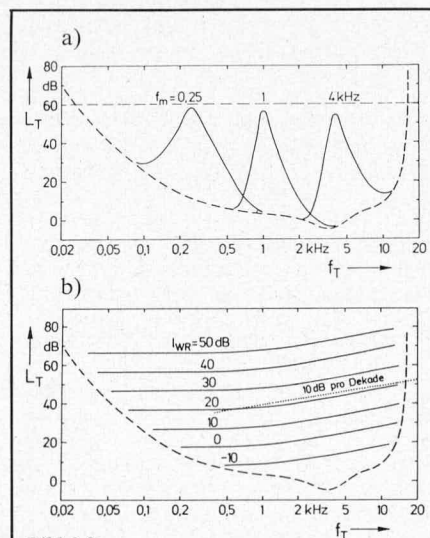


Bild 3.9
Mithörschwellen L_T von Testtönen (nach E. Zwicker: „Psychoakustik“)
a) verdeckt durch Schmalbandrauschen mit einem Pegel von 60 dB und Bandmittenfrequenzen f_m von 250 Hz, 1 kHz und 4 kHz — sowie b) verdeckt durch weißes Rauschen mit verschiedenen Schallintensitätsdichtepiegeln. Gestrichelt dargestellt: Ruhe-Hörschwelle

dichte) zeigen übrigens auch die Mithörschwellen einen Verlauf, der unterhalb der schon mehrfach erwähnten 500 Hz-Eckfrequenz (!) frequenzunabhängig ist und oberhalb dieser Frequenz mit 10 dB pro Frequenzdekade ansteigt.

Abschließend noch einige Anmerkungen zum Thema Verzerrungen und — wie unser Ohr darauf reagiert. Wird ein Schallvorgang auf elektroakustischem Wege übertragen, so können dabei Verzerrungen auftreten, sofern Nichtlinearitäten an irgendeiner Stelle der Übertragungsstrecke wirksam werden. Verzerrungen äußern sich stets durch die Entstehung zusätzlicher Signalfrequenzen, die im Originalsignal nicht vorhanden waren. Das können sowohl harmonische Frequenzen (= harmonische Verzerrungen; meßbar als Klirrfaktor) als auch Differenzfrequenzen (ausgewiesen durch den Differenztonfaktor und/oder durch den Intermodulationsfaktor) sein. Aus psychoakustischer Sicht ist dabei interessant festzustellen, wie unser Gehör verzerrte Schallsignale analysiert.

Aus der Fülle der inzwischen bekannt gewordenen Untersuchungsergebnisse aus diesem Gebiet sei hier nur ein Beispiel herausgegriffen. Stellen wir uns eine Sprachübertragung vor, bei der die Sprachsignale auf zwei verschiedene Arten verzerrt seien, und zwar a) durch eine Amplitudenbegrenzung und b) durch eine Signalbegrenzung in den Nulldurchgängen, wie das z. B. bei falsch dimensionierten Gegentakt-Leistungsendstufen vorkommen kann (= Stromübernahmeverzerrungen). Bestimmt man die Wirkung von zwei derart verzerrten Sprachschallsignalen auf unser Ohr durch Messung der dabei noch erzielbaren Silbenverständlichkeit, so bekommt man ein Ergebnis, wie es im Bild 3.10 zu sehen

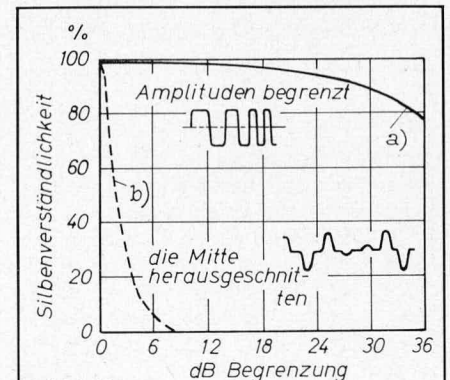


Bild 3.10
Abhängigkeit der Silbenverständlichkeit von der Art der Verzerrung (= Begrenzung in dB) eines akustischen Signals
a) bei einer Amplitudenbegrenzung — und b) bei einer Begrenzung an den Nulldurchgängen eines Schallsignals

ist. Während eine leichte bis mittlere Begrenzung in den Amplituden sich nur unwesentlich auf die Verständlichkeit der übertragenen Sprache auswirkt, reagiert unser Gehör schon sehr empfindlich bei den geringsten Beeinträchtigungen der Signal-Nulldurchgänge.

*) R. Feldtkeller und E. Zwicker: „Das Ohr als Nachrichtenempfänger“, S. Hirzel-Verlag, Stuttgart, 1967
E. Zwicker: „Psychoakustik“, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1982