

ZUM EINFLUSS DER KOPFHÖRERENTZERRUNG BEI DER MESSUNG DER FREQUENZGRUPPENBREITE DES GEHÖRS

Edwin Schorer

Institut für Elektroakustik, Technische Universität München

1. EINLEITUNG

Die Frequenzgruppenbreite und die davon abgeleitete Tonheitsskala sind in der Psychoakustik von zentraler Bedeutung und bilden die Grundlage wichtiger Modelle zur Beschreibung von Empfindungsgrößen wie z.B. der Lautheit oder der Tonhöhe. Zahlreiche Maskierungs- und Lautheitsexperimente zur Erfassung der Frequenzgruppenbreite wurden u.a. von Zwicker et al. /1/ durchgeführt und 1957 zusammenfassend dargestellt. Gerundete Zahlenwerte für die Frequenzgruppenbreite wurden daraufhin 1960 von einem internationalen ISO Komitee empfohlen /2/. Moore und Glasberg /3/ gaben 1983 eine Formel zur Berechnung der sog. "equivalent rectangular bandwidth" (ERB) an, die sich auf Ergebnisse einiger Autoren stützt, die Maskierungsexperimente mit Bandsperrenrauschen - allerdings überwiegend mit nicht entzerrtem Kopfhörer - durchgeführt haben. Da zwischen Frequenzgruppenbreite und ERB besonders bei tiefen Frequenzen erhebliche Diskrepanzen bestehen, erschien es sinnvoll, die Frequenzgruppenbreite neu zu vermessen.

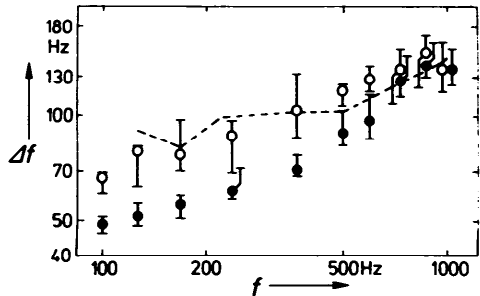
2. MESSMETHODEN

2.1. Grenze für die Rauigkeit zweier Sinustöne

Die Darbietung zweier Sinustöne gleichen Lautstärkepegels, deren Frequenzabstand von Null an langsam vergrößert wird, wird zunächst als schwankend, dann als rau empfunden. Bei größeren Frequenzabständen verschwindet die Rauigkeit wieder. Der für das Verschwinden der Rauigkeit notwendige Frequenzabstand ist bei tiefen Frequenzen ein Maß für die Frequenzgruppenbreite (vgl./4/ und /5/).

Der Versuchsaufbau bestand aus zwei spannungsgesteuerten Generatoren, deren Frequenzen von der Versuchsperson durch einen Drehknopf symmetrisch zu einer Mittenfrequenz verstimmt werden konnten, wobei der arithmetische Mittelwert beider Frequenzen konstant blieb. Aufgabe der Versuchsperson war es, den Frequenzabstand einzustellen, bei dem die Rauigkeitsempfindung eben verschwindet. Um einen frequenzunabhängigen Lautstärkepegel von etwa 65phon/Ton zu erhalten, wurden die Signale über einen Tiefpas 1. Ordnung mit 25Hz Grenzfrequenz geleitet.

Fig.1 Frequenzabstand Δf zweier Sinustöne, bei dem der Rauigkeitseindruck gerade verschwindet, als Funktion der Mittenfrequenz f der beiden Töne. Lautstärkepegel 65phon je Ton, binaurale Kopfhörerrückwiedergabe über BEYER DT48. Offene Symbole: Messung mit Freifeldentzerrer, Gefüllte Symbole: Messung ohne Freifeldentzerrer, gestrichelt: Grenze der Rauigkeit nach Terhardt /4/.



Die Darbietung der Schalle erfolgte in einer schallisolierten Meßkabine binaural über den Kopfhörer BEYER DT 4: der sowohl mit als auch ohne Freifeld-Entzerrer /6, S.40/ betrieben wurde. Von vier normalhörenden Versuchspersonen wurden je Mittenfrequenz vier Einstellungen vorgenommen.

Fig. 1 zeigt die Meßergebnisse in Abhängigkeit von der Mittenfrequenz der beiden Sinustöne. Es sind Zentralwerte und Wahrscheinliche Schwankungen von je 16 Einstellungen dargestellt, wobei die offenen Symbole für die Messungen mit Freifeld-Entzerrer gelten; die gefüllten Symbole sind Ergebnisse der Messreihe ohne Freifeld-Entzerrer. Terhardt /4/ hat 1968 die Grenze der Rauigkeit ebenfalls mit Freifeld-Entzerrer gemessen. Seine Ergebnisse sind in Fig.1 gestrichelt eingetragen und stimmen mit den Daten, die wir mit Freifeld-Entzerrer gewonnen haben, sehr gut überein. Die Messungen ohne Freifeld-Entzerrer führen bis hinauf zu Mittenfrequenzen von 600Hz zu 30-35% niedrigeren Werten. Nur die Messung mit freifeld-äquivalenter Schalldarbietung ist von der "Filtercharakteristik" des Kopfhörers unbeeinflusst und kann zur Abschätzung der Frequenzgruppenbreite herangezogen werden.

2.2. Schmalbandrauschen verdeckt durch Sinustöne

Bei diesem von Zwicker 1954 vorgeschlagenen Experiment /7/ wird die Mithörschwelle eines Schmalbandrauschens gemessen, das von zwei Sinustönen maskiert wird, deren Frequenzen symmetrisch zur Mittenfrequenz des Schmalbandrauschens liegen. Die Mithörschwelle bleibt konstant, solange der veränderliche Frequenzabstand Δf der beiden Sinustöne kleiner als die Frequenzgruppenbreite Δf_G ist, und fällt für größere Frequenzabstände ab.

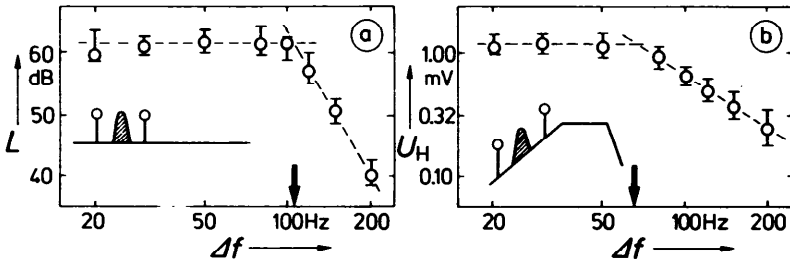


Fig.2 Mithörschwelle eines Schmalbandrauschens von 125Hz Mittenfrequenz in Abhängigkeit vom Frequenzabstand Δf zweier maskierender Sinustöne, gemessen von acht Versuchspersonen mit Kopfhörer TELEPHONICS TDH49. Fig.2a Messung mit Freifeldentzerrer. Fig.2b Messung ohne Freifeldentzerrer. Frequenzgruppenbreite durch Pfeil markiert. Bandbreite des Schmalbandrauschens: 10Hz, Pegel der Sinustöne: je 70dB.

Messungen wurden bei 125, 250, 500Hz und 1, 2, und 8kHz Mittenfrequenz durchgeführt, wobei die maskierenden Sinustöne Pegel von 70, 60, 50 bzw. 50, 70 und 70dB/Ton hatten. Das Schmalbandrauschen hatte bei einer Mittenfrequenz von 125Hz eine Bandbreite von 10Hz, sonst 30Hz. Der Einfluß der Kopfhörer-Entzerrung wurde bei den Mittenfrequenzen 125Hz und 250Hz untersucht, wobei zwei gebräuchliche Kopfhörer - BEYER DT48 und TELEPHONICS TDH49 - sowohl mit als auch ohne Freifeld-Entzerrer verwendet wurden.

Fig.2 zeigt die Ergebnisse für 125Hz Mittenfrequenz, gemessen mit acht Versuchspersonen und Kopfhörer TDH49. Der Verlauf der Mithörschwellen in Abhängigkeit vom Frequenzabstand Δf ist durch zwei Tangenten einem konstanten und einem abfallenden Teil zugeordnet; der Tangentschnittpunkt dient zur Ermittlung der Frequenzgruppenbreite Δf_G . Der entsprechende Wert ist auf der Abszisse durch einen Pfeil markiert. Fig.2a zeigt die Ergebnisse der Meßreihe mit Freifeld-entzerrer /8/; es ergibt sich eine Frequenzgruppenbreite von 105Hz. Bei der Messung ohne Freifeld-Entzerrer (Fig.2b) ist der Abfall der Mithörschwelle durch den Einfluß der Hochpaß-Flanke im Kopfhörer-Frequenzgang (siehe Einfügung) deutlich verflacht. Der Schnittpunkt mit dem konstanten Teil der Mithörschwelle erfolgt bei einem wesentlich kleineren Wert von 66Hz. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Vergleichsmessungen zusammengefaßt.

Tabelle 1 Frequenzgruppenbreite bei Messung mit und ohne Entzerrer

Mitten- frequenz	I	DT48 mit Entz.	DT48 ohne Entz.	TDH49 mit Entz.	TDH49 ohne Entz.
125Hz	I	105Hz	73Hz	105Hz	66Hz
250Hz	I	150Hz	110Hz	--	114Hz

Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt, daß sich bei Messung ohne Entzerrer Frequenzgruppenbreiten ergeben, die 27 bis 37% kleiner sind als die Werte mit Entzerrer. Mit Entzerrer erhielten wir für beide Kopfhörertypen das gleiche Ergebnis.

Bei 500 und 1000Hz wurde ausschließlich mit entzerrtem Kopfhörer DT48 gemessen. Die Frequenzgruppenbreite ergibt sich hier zu 150 bzw. 205Hz.

2.3. Sinuston verdeckt durch zwei Schmalbandrauschen

Dieses Experiment ist dem oben beschriebenen sehr ähnlich (vergl./6/,S.75). Der Unterschied besteht darin, daß hier die Mithörschwelle eines Sinustones gemessen wird, der von zwei symmetrisch angeordneten Schmalbandrauschen veränderlichen Frequenzabstandes verdeckt wird. Acht Versuchspersonen nahmen an der Messung teil. Es wurde mit pendelndem Einregeln und entzerrtem Kopfhörer DT48 bei 125, 250, 500 und 1000Hz Mittenfrequenz gemessen. Die Frequenzgruppenbreite ergibt sich hier zu 55, 105, 103 und 180Hz (vergl./9/).

2.4. Frequenzgruppenbreite aus der Bestimmung der Phasengrenzfrequenz

Bei der Bestimmung der eben wahrnehmbaren Modulationstiefe werden für AM und FM verschiedene Werte gemessen, solange die Modulationsfrequenz einen kritischen Wert nicht überschreitet /10/. Wird dieser Wert - die Phasengrenzfrequenz f_{gph} - überschritten, erhält man für AM und FM gleiche Grenzmodulationstiefen. Die Grenzsituation ist dadurch gegeben, daß die Seitenlinien des AM bzw. FM-Spektrums die Frequenzgruppenbreite überschreiten. Die Phasengrenzfrequenz ist daher halb so groß wie die Frequenzgruppenbreite.

Die Phasengrenzfrequenz wurde im Frequenzbereich von 125Hz bis 8kHz mit acht Versuchspersonen gemessen. Eine genaue Beschreibung der Ergebnisse findet sich in /11/. Tabelle 2 gibt eine Übersicht der daraus abgeleiteten Frequenzgruppenbreiten.

Tabelle 2 Frequenzgruppenbreite abgeleitet aus der Phasengrenzfrequenz

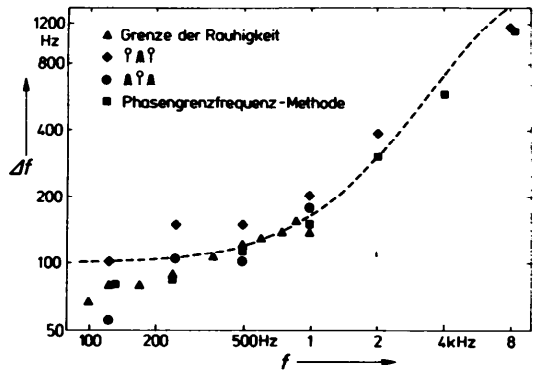
Mittenfrequenz (kHz): I	.125	.250	.5	1	2	4	8
F-gruppenbreite (Hz): I	80	84	113	149	302	580	1120

3. ZUSAMMENFASSUNG

In Fig.3 sind die Meßergebnisse zusammenfassend dargestellt. Die verschiedenen Meßmethoden sind durch Symbole gekennzeichnet: Grenze der Rauigkeit (Dreiecke), Schmalbandrauschen verdeckt durch Sinustöne (Romben), Sinuston verdeckt durch zwei Schmalbandrauschen (Kreise), Frequenzgruppenbreite aus der Phasengrenzfrequenz (Quadrate). Die gestrichelte Kurve repräsentiert die klassischen Werte für die Frequenzgruppenbreite. Bei sämtlichen Frequenzen stimmen die neueren Ergebnisse mit den klassischen Daten im Mittel sehr gut überein. Lediglich bei 125Hz Mittenfrequenz sprechen unsere Resultate mehr für eine Frequenzgruppenbreite von 80Hz, was den Originaldaten (siehe z.B./6/, Fig.27.2) sehr nahe kommt. Die Diskrepanz zu dem von der ISO empfohlenen Wert (100Hz) kam dadurch zustande, daß durch "großzügiges Runden" glatte Zahlenwerte angestrebt

wurden /2/. Die von Moore und Glasberg /3/ postulierten kleinen Analysebandbreiten von unter 40Hz konnten durch unsere Messungen in keinem Fall bestätigt werden.

Fig.3 Meßergebnisse zur Frequenzgruppenbreite aus vier verschiedenen Meßverfahren. Bedeutung der Symbole: siehe Einfügung. Die Meßergebnisse stimmen mit den klassischen Werten für die Frequenzgruppenbreite (gestrichelt) gut überein. Die Ergebnisse bei 125Hz bestätigen ebenfalls die Originaldaten von Zwicker /1/. Für die Abweichung von der Standardkurve: siehe Text.



Es wurde gezeigt, daß ein frequenzabhängiges Übertragungsmaß von Kopfhörern bei tiefen Frequenzen zu großen Meßfehlern von bis zu -40% bei der Messung der Frequenzgruppenbreite führt, wenn nicht durch geeignete Entzerrung für eine freifeldäquivalente Schalldarbietung gesorgt wird. Das ist bei der Betrachtung der "ERB" zu beachten, da ein großer Teil der Meßwerte mit nicht entzerrtem Kopfhörer erhoben wurde. Ein direkter Vergleich der Frequenzgruppenbreite mit der "equivalent rectangular bandwidth", ERB, ist schon aus diesem Grunde nicht möglich.

Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des SFB 204 "Gehör" unterstützt.

Literatur

- /1/ Zwicker, E., Flottorp, G., and Stevens, S.S., Critical band width in loudness summation. J.Acoust.Soc.Am., 29, 648-557, 1957
- /2/ Zwicker, E., Subdivision of the audible frequency range into critical bands (Frequenzgruppen). J.Acoust.Soc.Am., 33, 248, 1961
- /3/ Moore, B.C.J. and Glasberg, B.R., Suggested formulae for calculating auditory filter bandwidth and excitation patterns. J.Acoust.Soc.Am., 74, 750-753, 1983
- /4/ Terhardt, E., Über die durch amplitudenmodulierte Sinustöne hervorgerufene Hörempfindung. Acustica, 20, 210-214, 1968
- /5/ Plomp, R. and Steeneken, H.J.M., Interference between two simple tones. J.Acoust.Soc.Am., 43, 883-884, 1968
- /6/ Zwicker, E. and Feldtkeller, R., Das Ohr als Nachrichtenempfänger. Hirzel, Stuttgart, 1967
- /7/ Zwicker, E., Die Verdeckung von Schmalbandgeräuschen durch Sinustöne. Acustica, Akustische Beihefte 1, 415-420, 1954
- /8/ Fastl, H. and Zwicker, E., A free-field equalizer for TDH 39 headphones. J.Acoust.Soc.Am., 73, 312-314, 1983
- /9/ Fastl, H. and Schorer, E., Critical bandwidth at low frequencies re-considered. In: Moore and Patterson, Auditory frequency selectivity, 1986
- /10/ Zwicker, E., Die Grenzen der Hörbarkeit der Amplitudenmodulation und der Frequenzmodulation eines Tones. Acustica, Akustische Beihefte 3, 125-133, 1952
- /11/ Schorer, E., Critical modulation frequency based on detection of AM versus FM tones. J.Acoust.Soc.Am., im Druck