

GEDROSSELTE LAUTHEIT BEI TIEFEN, MITTLEREN UND HOHEN FREQUENZEN

K. Deuter

Institut für Elektroakustik, Technische Universität München

1. EINLEITUNG

Die Lautheit von Schallen unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung wird seit mehr als 50 Jahren untersucht; außer durch psychoakustische Experimente kann sie auch durch Berechnung /1/ oder Messung /2/ mit großer Genauigkeit bestimmt werden. Wird jedoch gleichzeitig mit einem Testschall ein maskierendes Rauschen dargeboten, so wird- abhängig von Pegel und spektraler Verteilung des Rauschens- die Lautheit des Testschalls gedrosselt werden /3/. Dieser Effekt ist für die Wiedergabe von Nutzschallen wie Musik und Sprache in störgeräuschbelasteter Umgebung von großer Bedeutung, da er den Pegelbereich, innerhalb dessen Nutzschalle wahrnehmbar dargeboten werden können, drastisch einschränken kann.

2. BESCHREIBUNG DER VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Nach einem von Zwicker 1963 vorgeschlagenen Verfahren /3/ wurde die gedrosselte Lautheit von Sinustönen der Frequenzen 250Hz, 1kHz und 4kHz und verschiedener Pegel durch Lautheitsvergleich mit ungedrosselten Sinustönen gleicher Frequenz gemessen. Als drosselnder Schall wurde frequenzgruppenbreites Schmalbandrauschen SBR gleicher Mittenfrequenz wie auch gleichmäßig anregendes Rauschen GAR bei jeweils zwei verschiedenen Pegeln verwendet. Den zeitlichen Ablauf des Versuchsprogramms zeigt Fig.1.

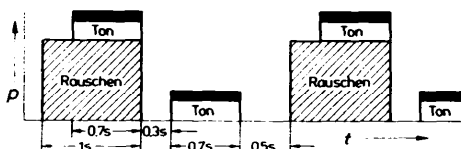


Fig. 1: Zeitlicher Ablauf des Versuchsprogramms

Der gedrosselte Ton wurde erst 0,3s nach dem Rauschen eingeschaltet; dies erleichtert der Versuchsperson, sich auf den Testton zu konzentrieren. Zu einer Reihe vorgegebener Vergleichston-Pegel L_{TV} wurden durch die acht Versuchspersonen im Alter zwischen 20 und 32 Jahren mit der Methode des pendelnden Einregelns die Pegel L_{TG} der Testtöne bestimmt, die als gleich laut beurteilt wurden. Bei den meisten Versuchsreihen wurden in einem zweiten Durchgang die Testton-Pegel L_{TG} vorgegeben und die Vergleichston-Pegel L_{TV} bestimmt. Die Darbietung der Schalle erfolgte beidohrig über freifeldentzerrte Kopfhörer (Beyer DT 48).

3. ERGEBNISSE DER MESSUNGEN MIT SINUSTÖNEN

In Fig.2a sind die Ergebnisse der Messung mit Sinustönen der Frequenz 4kHz gedrosselt von frequenzgruppenbreitem Schmalbandrauschen der Mittenfrequenz 4kHz dargestellt. Angetragen sind der Pegel L_{TV} des als gleichlaut bewerteten Vergleichstons über dem Pegel L_{TG} des gedrosselten Testtons; Parameter ist der Pegel des Rauschens von 40dB und 60dB.

Angegeben sind Zentralwerte und wahrscheinliche Schwankungen. Die ausgezogenen Kurven sind geschätzte Mittelwerte. Beide Kurven beginnen in Fußpunkten, deren Abszissenlage von der Mithörschwelle MHS, also dem Maskiererpegel vermindert um das Verdeckungsmaß a_V (von 4,5dB bei 4kHz), bestimmt ist; an dieser Stelle ist die Lautheit des gedrosselten Tones gerade Null. Dem Ordinatenwert der Fußpunkte entspricht die Ruhehörschwelle RHS (von -4dB bei 4kHz); hier wird der Vergleichston eben unhörbar. Wird der Pegel L_{TG} des Testtons über die Mithörschwelle hinaus erhöht, so wächst dessen gedrosselte Lautheit sehr schnell an. Bereits 20 - 25dB über der Mithörschwelle mündet die Kurve in die diagonale Gerade der ungedrosselten Lautheit ein; an diesem Einmündpunkt hat also das drosselnde Rauschen seinen Einfluß verloren.

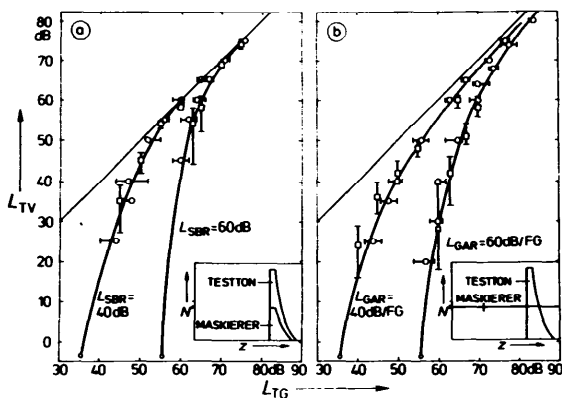


Fig. 2: Subjektiv durch Lautstärkevergleich gemessene gedrosselte Lautheit von 4000Hz-Tönen, (a) gedrosselt von Schmalbandrauschen der Pegel 40dB und 60dB sowie (b) von gleichmäßig anregendem Rauschen der Pegel 40dB und 60dB je Frequenzgruppe. Rechts unten ist jeweils eine schematische Darstellung von Maskierer und Testton im Spezifische-Lautheits-Tonheitsmuster eingesetzt.

Die Ergebnisse der **Messung mit gleichmäßig anregendem Rauschen** als Maskierer erläutert Fig.2b. Parameter ist der in eine Frequenzgruppe fallende Pegel des Rauschens, die übrigen Parameter sind unverändert. Die in den gleichgebliebenen Fußpunkten beginnenden Kurven verlaufen nun ein wenig flacher und münden nicht mehr in die Diagonale der ungedrosselten Lautheit ein. Dies läßt sich durch Vergleich der jeweils eingezeichneten Spezifische-Lautheits-Tonheits-Muster in Fig.2a und Fig.2b leicht erklären: Das drosselnde Schmalbandrauschen kann bei genügend großem Pegel des Testtons von diesem selbst verdeckt werden; damit hat es keine drosselnde Wirkung mehr. Das gleichmäßig anregende Rauschen hingegen wird auch ein Testton sehr großen Pegels nicht verdecken können; vielmehr wird stets in den Flanken des Testtons eine Drosselung erfolgen und damit dessen Gesamtlautheit reduziert.

Fig.3a und Fig.3b zeigen die Ergebnisse der **Messungen bei den Test- und Vergleichston-Frequenzen 250Hz, 1kHz und 4kHz**. Um einen Vergleich zu ermöglichen, wurden die Pegel der Töne auf ihre jeweiligen Ruhehörschwellen bezogen, die Kurven wurden auf gleiche Maskiererpegel über Ruhehörschwelle extrapoliert. Die Einzelkurven innerhalb der vier Kurvenscharen verlaufen ganz ähnlich. Die 250 Hz-Kurve ist jedoch stets die steilste und nähert sich in Fig.3b am dichtesten der Diagonale an. Die 1kHz-Kurve hingegen verläuft am flachsten und bleibt im größten Abstand zur Diagonale.

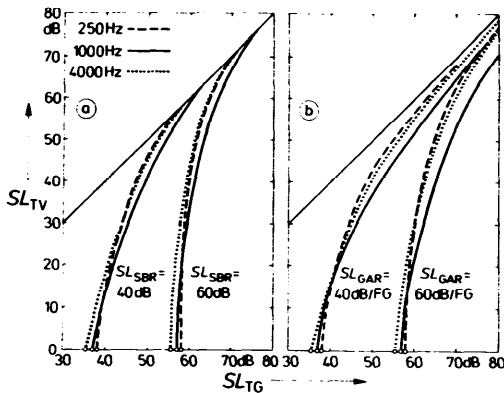


Fig. 3: Subjektiv durch Lautstärkevergleich gemessene gedrosselte Lautheit von 250Hz-, 1000Hz- und 4000Hz-Tönen, gedrosselt (a) von Schmalbandrauschen der Pegel 40dB und 60dB sowie (b) von gleichmäßig anregendem Rauschen der Pegel 40dB und 60dB je Frequenzgruppe. Alle Pegelangaben sind normiert auf Pegel über Ruheshwelle (Sensation Level).

4. ERGEBNISSE DER MESSUNGEN MIT FÜNFTON-KOMPLEXEN

Die Spektren von realen Nutzschällen wie Musik und Sprache verlaufen überwiegend breitbandig. Um über die dabei auftretenden Drosselungseffekte besseren Aufschluß zu erhalten wurden drei Versuchsreihen mit Fünfton-Komplexen bei tiefen, mittleren und hohen Frequenzen als Test- und Vergleichsschalle durchgeführt. Die Pegelangaben für L_{TG} und L_{TV} beziehen sich auf den (für die fünf Einzeltöne gleichen) Pegel pro Ton; die Frequenzabstände der Töne sind jeweils etwa gleich der Breite einer Frequenzgruppe. Parameter ist der Frequenzgruppenpegel des maskierenden gleichmäßig anregenden Rauschens.

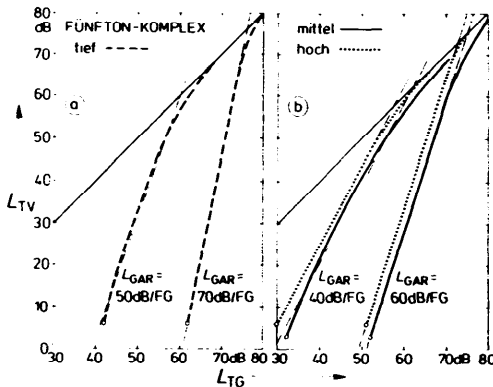


Fig. 4: Von gleichmäßig anregendem Rauschen (a) der Pegel 50dB und 70dB bzw. (b) 40dB und 60dB je Frequenzgruppe gedrosselte, subjektiv durch Lautstärkevergleich gemessene Lautheit von Fünfton-Komplexen. Gestrichelt eingetragen sind Geraden, die den Kurvenverlauf annähern.

Einzeltön-Frequenzen:

tief:

140/260/320/460/570Hz

mittel:

690/830/1000/1200/1400Hz

hoch:

4730/5830/7260/8910/10780Hz

Fig.4a zeigt die Ergebnisse bei tiefen, Fig.4b bei mittleren und hohen Frequenzen. Die Mithörschwellen (Abszissenwert der Fußpunkte) liegen jetzt wegen des Zusammenwirkens der fünf Töne niedriger. Auffällig ist vor allem, daß die Kurven vom Fußpunkt aus im doppelt logarithmischen Maßstab etwa linear ansteigen und trotz des breitbandigen Maskierers in die

ungedrosselte Lautheit einmünden; die Kurven für mittlere Frequenzen bilden hier ein Ausnahme, doch nähern sich auch diese viel dichter an als in Fig.3b. Dies läßt sich daraus erklären, daß die Kernerregung der Tonkomplexe bereits einen breiten Tonheitsbereich von 5 Bark überdeckt, sodaß die Flankenerregungen keinen wesentlichen Beitrag zur Gesamtlautheit mehr liefern. Damit wird auch die Drosselung der Flanken vernachlässigbar: die Kurven münden ein.

Die Näherungs-Geraden legen durch ihre Steigungen eine Potenz fest, die im Gehör innerhalb des Einflußbereichs der Drosselung zwischen der Mithörschwelle und dem Einmündpunkt wirksam wird und als Expansions-Faktor k für Pegeldifferenzen interpretiert werden kann. Tab.1 gibt die hierfür ermittelten Werte an:

Fünfton-Komplex	Expansions-Faktor k bei Maskiererpegel L_M (dB)				Einflußbereich der Drosselung über MHS in dB bei Maskiererpegel L_M (dB)			
	40	50	60	70	40	50	60	70
tief	/	2,9	/	5,0	/	18	/	15
mittel	1,9	/	3,1	/	30	/	23	/
hoch	1,9	/	3,1	/	28	/	22	/

Tabelle 1.

5. FOLGERUNGEN

Bei der Wiedergabe von Nutzschallen wie Musik und Sprache in Anwesenheit von Störschallen wirkt das Gehör innerhalb des Einflußbereichs der Drosselung als Dynamikexpander, dessen Expansionsfaktor gleich der Steigung der angenäherten Drosselungsgerade (siehe Tab.1) ist und mit zunehmendem Pegel des Störschalls sowie abnehmender Frequenz größer wird. Es ist zweckmäßig, bei der Wiedergabe innerhalb des Einflußbereichs der Drosselung zur Wiederherstellung der Original-Dynamik eine Frequenz- und Störpegelabhängige Vor-Kompression um den jeweiligen Wert des Expansionsfaktors durchzuführen.

LITERATUR

- /1/ DIN 45631, Berechnung des Lautstärkepegels aus dem Geräuschspektrum, Verfahren nach E. Zwicker
- /2/ Zwicker, E., Deuter, K., Peisl, W., Loudness meters based on ISO 532B with large dynamic range. Proc. inter-noise '85, Vol II, 1119-1122 (1985)
- /3/ Zwicker, E., Über die Lautheit von ungedrosselten und gedrosselten Schallen. Acustica 13, 194-211 (1963)