

Konrad Prof. Greiner

HEINRICH-HERTZ-INSTITUT FÜR SCHWINGUNGSFORSCHUNG
BERLIN-CHARLOTTENBURG

Technischer Bericht Nr. 56

Über die Lautstärke von Doppelimpulsen

Dipl.-Ing. D. SCHWARZE

H56

Berlin
1 9 6 1

Über die Lautstärke von Doppelimpulsen.

Zusammenfassung

Nach einer einleitenden Übersicht über die zum Aigner-Strutt - Effekt bisher erschienenen Arbeiten wird eine Begriffsstimmung der für die vorliegende Untersuchung verwendeten Gaußtöne mathematisch durchgeführt. Nach dem Békésy - Verfahren werden frequenzgruppenbreite Einzelgaußtöne mit gleichen verzögerten Doppelgaußtönen subjektiv verglichen. Die Messungen werden mit Modulationsfrequenzen der Gaußtöne von 250 Hz, 1000 Hz und 4000 Hz bei Spitzenpegeln von 70 dB, 80 dB, 90 dB und 100 dB ausgeführt. Das Energieadditionsgesetz wird bei Doppelgaußtönen nur bei Spitzenpegeln von 100 dB und der Modulationsfrequenz von 250 Hz verletzt, bei allen anderen Frequenzen und Pegeln jedoch nicht.

Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung

Der Bearbeiter

gez. D. Schwarze

(Dipl.-Ing.D.Schwarze)

Der Abteilungsleiter

gez. L. Cremer

(Prof.Dr.-Ing.L.Cremer)

Der Institutsdirektor

gez. L. Cremer

(Prof.Dr.-Ing.L.Cremer)

Berlin - Charlottenburg, den 28.9.1961



I. Einleitung und Veranlassung der Untersuchungen

Wirken zwei gleiche, aber phasenunabhängige Schallereignisse auf einen Beobachter ein, dann entspricht der resultierende subjektive Lautstärkeindruck einer Addition der Leistungen. Dies bedeutet eine Zunahme des Schallpegels um 3 dB,

Diese Gesetzmäßigkeit wurde in Versuchen von AIGNER und STRUTT^{1/} mit Musik, von LÜBCKE^{2/} mit Heultönen und Klopfgeräuschen und von HAAS^{3/} mit Sprache bestätigt. Durch Verwendung von mehreren Lautsprechern, die in verschiedener Entfernung von den Beobachtern aufgestellt waren und zugleich unterschiedliche Klangfarbe aufwiesen, glaubten AIGNER und STRUTT jedoch feststellen zu können, daß, wenn derselbe Schall verzögert beim Beobachter eintrifft, eine größere Lautstärkezunahme als 3 Phon empfunden wird. Im Mittel ergab sich nach ihren Angaben eine Lautstärkezunahme von 10 - 12 Phon. Die zeitliche Verzögerung der Schallsignale war, bedingt durch die Verwischungsschwelle, auf 50 msec begrenzt. Bei größeren Verzögerungszeiten wird das verzögerte Signal als Echo wahrgenommen, wodurch ein Lautstärkevergleich sehr schwierig ist.

Während AIGNER und STRUTT^{1/} unterschiedliche Klangfarbe von Primärschall und Rückwurf voraussetzten, fand LÜBCKE^{2/} die subjektive Überschreitung der Energieaddition auch bei Gleichheit der Klangfarbe. Die Überschreitung der Energieaddition betrug bei LÜBCKE im Mittel 3 Phon.

Diese Untersuchungen wurden bei AIGNER und STRUTT in der Größenordnung von 60 Phon und bei LÜBCKE zwischen 60 und 80 Phon durchgeführt.

HAAS konnte im Gegensatz zu den vorgenannten Autoren diesen Effekt bei Sprache nicht bestätigen. Er führte die Untersuchungen bei einer Lautstärke von 55 Phon durch. MEYER und SCHODDER^{4/} haben die Versuche von HAAS wiederholt und festgestellt, daß das Energieadditionsgesetz bei kleinen Lautstärken nicht verletzt wird, aber bei grösseren Lautstärken, wo die Überschreitung der Energieaddition bei einer Verzögerungszeit von 50 msec des Rückwurfs gegenüber dem Primärschall 1,8 Phon betrug.

Die sich aus dieser Situation ergebende Fragestellung soll in

der vorliegenden Arbeit mit definierten Impulsen behandelt werden. Daneben soll neben der Pegelabhängigkeit auch die Frequenzabhängigkeit bei der Lautstärkebeurteilung berücksichtigt werden.

II. Definitionen

Für die Untersuchungen wurden Sinustöne verwendet, die mit einer Gauß'schen Fehlerfunktion moduliert sind. Diese Impulse werden im folgenden Gaußtöne genannt. /5/ /6/ /7/

Mathematisch ist die Gaußfunktion eine "selbstreziproke Funktion", die ihre Eigenschaft bei einer Fouriertransformation nicht ändert, d.h. die Funktion hat als Variable der Zeit (Zeitfunktion) den gleichen Verlauf wie als Variable der Frequenz (Spektralfunktion). Schreibt man den Zeitverlauf der Gaußfunktion in der Form an

$$s(t) = \hat{s} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{\Delta t^2}} \quad (1)$$

dann ist Δt als die Impulsbreite definiert, die sich auf den 0,456 fachen Wert des Spitzenwertes bezieht. Zugleich läßt sich über der Impulsbreite Δt ein Rechteck errichten, das flächengleich der Fläche unter der Gaußfunktion ist, in dem man nach Gl.(1) integriert. Es ist dann die Impulsstärke I nach K.W.Wagner

$$I = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s} \cdot e^{-\frac{t^2}{\Delta t^2}} \cdot \pi \, dt = \hat{s} \sqrt{\frac{\pi}{\pi/\Delta t^2}} = \hat{s} \Delta t \quad (2)$$

(Der Zeitpunkt des Gipfels t_0 ist hier gleich dem Nullpunkt gesetzt.)

Normiert man nach der klassischen Unschärferelation

$$\Delta t \cdot \Delta f = 1 \quad (3)$$

dann ergibt sich aus der Fouriertransformation für die Spektralfunktion

$$A(f) = A_0 e^{-\frac{(f-f_0)^2}{\Delta f^2}} \pi \quad (4)$$

Da die Exponenten im Spektralverlauf und im Zeitverlauf gleich aufgebaut sind, wenn man Zeit und Frequenz entsprechend austauscht, bedeutet dies, daß sich sowohl die Bandbreite Δf wie die Impulsbreite Δt auf den 0,456 fachen Wert des Spitzenwertes beziehen.

Durch die Unschärferelation wird bekanntlich ausgesagt, daß je weniger ein Impuls zeitlich begrenzt ist, um so ausgedehnter ist sein Spektrum. Wenn $\Delta t \rightarrow 0$ geht, dann geht $\Delta f \rightarrow \infty$, d.h. in einem unendlich kurzem Impuls der Stärke I sind alle Frequenzen von 0 bis ∞ mit gleicher Amplitude I/π vertreten.

Gaußtöne entstehen dann, wenn Sinustöne mit einer Gauß'schen Fehlerkurve moduliert werden. Die Gl.(2) geht dann über in

$$\Phi(t) = \hat{s} \cdot e^{-\frac{t^2}{\Delta t^2} \cdot \frac{\pi}{2}} \cos(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

Es ist zu fragen, welche Amplitudenfunktion sich einstellt.

$$\Phi(t) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} [C(u) \cos ut + S(u) \sin ut] du \quad (5a)$$

$$C(u) = \frac{\hat{s}}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\pi \frac{t^2}{\Delta t^2}} \cos(\omega t + \varphi) \cos ua \, da \quad (6)$$

$$S(u) = \frac{\hat{s}}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\pi \frac{t^2}{\Delta t^2}} \cos(\omega t + \varphi) \sin ua \, da \quad (7)$$

Die Gesamtamplitude beträgt:

$$A(u) = \sqrt{[C(u)]^2 + [S(u)]^2} \quad (8)$$

Als Abkürzung wird eingeführt:

$$-\pi \frac{t^2}{\Delta t^2} = -k^2 t^2$$

Dann ist

$$C(u) = \frac{\hat{s}}{2k \sqrt{\pi}} \cos \varphi \left(e^{-\frac{(\omega+u)^2}{4k^2}} + e^{-\frac{(\omega-u)^2}{4k^2}} \right) \quad (9)$$

und

$$S(u) = \frac{\hat{s}}{2k \sqrt{\pi}} \sin \varphi \left(e^{-\frac{(\omega+u)^2}{4k^2}} - e^{-\frac{(\omega-u)^2}{4k^2}} \right) \quad (10)$$

Die Gesamtamplitude beträgt dann:

$$A^2(u) = \left(\frac{\hat{s}}{2\pi\Delta f} \right)^2 \left[e^{-\frac{2(\omega+u)^2}{4\pi\Delta f^2}} + e^{-\frac{2(\omega-u)^2}{4\pi\Delta f^2}} + 2e^{-\frac{(\omega^2+u^2)}{4\pi\Delta f^2}} \cos 2\varphi \right] \quad (11)$$

Es seien eingeführt: f für die Trägerfrequenz

F für die laufende Frequenz

Dann geht (11) über in

$$A^2(F) = \left(\frac{\hat{s}}{2\pi\Delta f} \right)^2 \left[e^{-2\pi\frac{(f+F)^2}{\Delta f^2}} + e^{-2\pi\frac{(f-F)^2}{\Delta f^2}} + 2e^{-\pi\frac{(f^2+F^2)}{\Delta f^2}} \cos 2\varphi \right] \quad (11a)$$

Sonderfälle:

1. $\varphi = 45^\circ$

$$A(F) = \frac{\hat{s}}{2\pi\Delta f} \left(e^{-\pi\frac{(f+F)^2}{\Delta f^2}} + e^{-\pi\frac{(f-F)^2}{\Delta f^2}} \right) \quad (11b)$$

2. $f = F$; $\varphi = 45^\circ$

$$A(F) = \frac{\hat{s}}{2\pi\Delta f} \sqrt{e^{-\frac{8\pi f^2}{\Delta f^2}} + 1} \quad (11c)$$

3. $f = 0$; $\varphi = 0^\circ$ (Gaußimpuls)

$$A(F) = \frac{\hat{s}}{\pi\Delta f} e^{-\frac{\pi F^2}{\Delta f^2}} \quad (12)$$

In diesem Zusammenhang interessiert noch die Energie eines Gaußtones. Es folgt aus Gl.(5):

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Phi^2(t) dt = \hat{s}^2 \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi\frac{t^2}{\Delta t^2}} \cdot \cos^2(\omega t + \varphi) dt \quad (13)$$

Es ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Phi^2(t) dt = \frac{\hat{s}^2 \Delta t}{2\sqrt{2}} \left(1 + e^{-2\pi f^2 t^2} \cos 2\varphi \right) \quad (14)$$

Wenn $2\pi f^2 \cdot \Delta t^2 \gg 1$, dann wird der Einfluß der Phase φ auf die Energie des Gaußtones gering, so daß (14) übergeht in

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Phi^2(t) dt = \frac{\Delta^2 \Delta t}{2 \sqrt{2}} \quad (14a)$$

Die Gleichung (14) beinhaltet zugleich den Effektivwert des Gaußtones, der mit Gl.(14a) vereinfacht angegeben wird. Die für die Untersuchung benutzten Gaußtöne entsprachen in Ihrer Bandbreite den von FELDTKELLER und ZWICKER^{8/}, für den Lautheitseindruck ermittelten Frequenzgruppenbreiten. Die Trägerfrequenz war zugleich Mittenfrequenz der zugehörigen Frequenzgruppe. Der durch Vereinfachung aus Gl.(14) entstandene Ausdruck (14a) für den Effektivwert des Gaußtones kann für die hier vorliegenden Messungen als gültig angesehen werden. Die tiefste hier benutzte Frequenzgruppe (200-295Hz) mit der Mittenfrequenz 243 Hz enthält 2,75 Sinusschwingungen. Dadurch verschwindet der Einfluß der Einschaltphase auf die Schallenergie. Das Ohr kann diese Einschaltphasenunterschiede nicht mehr wahrnehmen. Die Anfangsphasen der hier benutzten Gaußtöne sind beliebig.

III. Die Durchführung der Versuche

Eine in einem gut isolierten Testraum sitzende Versuchsperson erhält über elektrisch entzerrte dynamische Kopfhörer folgende Schallereignisse dargeboten:

1. Einzelgaußtöne, deren Mittenfrequenzen 250 Hz, 1000 Hz und 4000 Hz betragen, mit konstantem Spitzenwert und einer Folgefrequenz von 1 Hz. Eine so kleine Folgefrequenz wurde gewählt, damit die Vorgänge im Ohr wirklich abgeklungen sind und jeder Gaußton für sich bewertet wird. Die Abb. 1a zeigt als Beispiel frequenzgruppenbreite Gaußtöne, deren Modulationsfrequenzen 1000 Hz betragen, im Oszillogramm.

2. Zwei einanderfolgende Gaußtöne, die eine variable Verzögerungszeit von 10-100 msec aufweisen. Die Folgefrequenz der Doppelgaußtöne beträgt ebenfalls 1 Hz. Der Spitzenwert beider Gaußtöne ist gleich. Ebenso ist die Modulationsfrequenz gleich und beträgt 250 Hz, 1000 Hz und 4000 Hz. Die Abb. 1b zeigt gleiche um 30 msec verzögerte frequenzgruppenbreite Gaußtöne, deren Modulationsfrequenzen ebenfalls 1000 Hz betragen, im Oszillogramm.

Diese beiden Schallereignisse werden so abwechselnd dargeboten, daß jeweils drei oder vier Einzel- oder Doppelgaußtöne in einer Darbietungsphase enthalten sind. Die Versuchsperson hat diese beiden Schallereignisse nach ^{dem} Békésy-Verfahren^{9/} auf 'lauter als' bzw. 'leiser als' zu beurteilen. Zwei Schallereignisse auf gleiche Lautstärke einzustellen, ermüdet die Versuchsperson. Außerdem sind die Streuungen der Meßwerte, die nach dem letztgenannten Verfahren ermittelt werden, wesentlich größer.

Jede Versuchsperson wurde über den Sinn der Untersuchung vor der Messung unterrichtet. Die Einzel-Gaußtöne und die Doppel-Gaußtöne wurden einzeln vorgestellt, damit sich die Versuchsperson einhören konnte. Dann wurden abwechselnd die Einzel- und Doppel-Gaußtöne dargeboten und der Pegel der Doppel-Gaußtöne langsam stufenweise gesenkt, während der Pegel der Einzel-Gaußtöne konstant blieb. Sobald die Versuchsperson den Eindruck hatte, daß die Doppel-Gaußtöne leiser als die Einzel-Gaußtöne sind, gab sie durch Betätigung einer Taste ein Signal, es erfolgte automatisch eine Umsteuerung des Umschaltgerätes und der Pegel der Doppel-Gaußtöne wurde langsam schrittweise so weit erhöht, bis die Versuchsperson den Eindruck hatte, daß die Doppel-Gaußtöne lauter als die Einzel-Gaußtöne sind. Der Punkt des wahrscheinlichen gleichlauten Eindrucks wurde mindestens dreimal umfahren.

Diese Maxima und Minima wurden auf einem Pegelschreiber registriert, wobei der Schieber des zu den Doppel-Gaußtönen gehörenden Pegelreglers auf dem Umschaltgerät starr mit einem parallel zu diesem angeordneten gleichen Regler verbunden war, der eine Rauschspannung regelte. Diese geregelte Rauschspannung wurde an den Pegelschreiber abgegeben.

Nach jeder Messung, die ca 3 Minuten dauerte, wurde eine kurze Pause eingelegt und anschliessend das nächste Gaußtonpaar mit einer anderen Verzögerungszeit im Wechsel mit den Einzel-Gaußtönen der Versuchsperson dargeboten. Die Reihenfolge der Meßpunkte wurde so gewählt, daß mit der Verzögerungszeit der Doppel-Gaußtöne von 100 msec begonnen und zu kleineren Zeiten übergegangen wurde. Die Verzögerungszeit konnte nicht unter 10 msec verringert werden, da sich die Doppel-Gaußtöne im Signal überdecken würden. Alle Versuchspersonen hatten aber auch

noch den Höreindruck, daß es zwei gleiche Gaußtöne sind, obwohl sie sich nicht mehr genau trennen liessen. Es entstand also nicht, wie zu erwarten war, der Eindruck, daß das Gaußtonpaar zu einem Einzel-Gaußton oder ähnlichen Impuls verwischt wird.

Es wurde bezüglich des Lautstärkeindrucks untersucht, ob es richtiger ist, einen Einzel-Gaußton gegen ein Gaußtonpaar zu vergleichen oder ob es günstiger ist, mehrere Einzel-Gaußtöne gegen mehrere Gaußtonpaare zu vergleichen. Es hat sich jedoch bei zwei sehr geübten Versuchspersonen gezeigt, daß ein Lautstärkevergleich eines Einzel-Gaußtones mit einem Gaußtonpaar zu Ergebnissen führt, die sehr hohe Streuungen aufweisen und nicht reproduzierbar sind. Die Methode, mehrere Gaußtöne gegen mehrere Gaußtonpaare zu vergleichen, führte zu dem Ergebnis, daß 3 bis 4 Gaußtöne bzw. Paare in einer Darbietungsphase enthalten sein müssen. Diese Art der Messung führte zu reproduzierbaren Ergebnissen.

Es hat den Anschein, als ob der Beobachter eine gewisse Zeit und eine gewisse Zahl von Impulsen braucht, um bei dieser Art von Schallereignissen eine Aussage über die Lautstärke machen zu können. Ein Einzelimpuls ergibt anscheinend keine eindeutig erkennbare Lautstärke.

Wie eingangs schon gesagt, untersuchten AIGNER und STRUTT, LUBCKE, HAAS, MEYER und SCHODDER den Effekt bei verschiedenen Lautstärken. In der vorliegenden Arbeit wird nicht von der Lautstärke, sondern vom Spitzenpegel ausgegangen und dieser im Bereich von 70 dB bis 100 dB in Schritten von 10 zu 10 dB variiert. In einer Test Sitzung wurde nur jeweils eine Kurve bei einem Pegel und bei einer Frequenz gemessen.

IV. Die Apparatur

Die Anordnung der einzelnen Geräte zeigt das Blockschaltbild Abb.2 Einzel- und Doppel-Gaußtöne wurden vorher auf Magnettonbändern aufgezeichnet. Als Tonbandgeräte wurden 2 Magnetophone M 5 verwendet, die nach dem DIN-Bezugsband für die Geschwindigkeit von 38,1 cm/sec eingemessen waren. Um keine Frequenzverschiebungen zu erhalten, wurde peinlich darauf geachtet, daß beide Maschinen mit genau der gleichen Geschwindigkeit liefen. Diese beiden Schallereignisse wurden über zwei Regler einem

Umschaltgerät/10/zugeführt, das die Aufschaltung nach einem vorgegebenem Rhythmus auf den Einspielkanal (V72, W 68, V 72, V 69a, Kopfhörerentzerrer, Kopfhörer) besorgte.

Von einem Rauschgenerator, der ein weißes Rauschen abgibt, wird ein Teil der Rauschspannung über ein Filter, welches das weiße Rauschen in gleichmäßig verdeckendes Rauschen umformt, dem Einspielkanal zugeführt. Die andere Teilspannung wird über einen Regler, der mit einem Kanalregler des Umschaltgerätes starr verbunden ist, zur Anzeige an einen Pegelschreiber weitergegeben. Vor der Messung wurden die Einzel- und Doppel-Gaußtöne mittels eines Oszillographen so eingestellt, daß sie den gleichen Spitzenwert am Eingang des Kopfhörerentzerrers aufwiesen. Der Bezugswert auf dem Pegelschreiber wurde ebenfalls danach eingestellt. Die Anordnung der Kommandoanlage und des Einspielkanals sind aus dem Blockschaltbild ersichtlich.

50 dB unter dem Spitzenwert der Einzel-Gaußtöne liegt als künstliche Hörschwelle ein gleichmäßig verdeckendes Rauschen. Dies hat sich als zweckmäßig erwiesen, um auftretende Knackgeräusche, die aus dem Netz einstreuen und das undefinierte Bandrauschen zu verdecken.

Zur Messung wurden dynamische Kopfhörer der Firma BEYER verwendet, die durch Vorschalten eines Entzerrers in ihrem Frequenzgang so entzerrt waren, daß die Abweichungen innerhalb von 30 Hz - 20 kHz \pm 3 dB betragen. Der Übertragungsfaktor wurde nach einer Freifeldeichung zu 3,8 Volt/ μ b ermittelt.¹¹⁾

Der Lautstärke-vergleich wurde im schallisolierten Raum des Heinrich-Hertz-Instituts für Schwingungsforschung durchgeführt. Zur Verfügung stand der im selben Institut entwickelte Meßplatz für Hörvergleiche.¹²⁾ Der Meßplatz und der Testraum waren räumlich voneinander getrennt, optisch aber durch ein sogenanntes Regiefenster verbunden, so daß der Versuchsleiter die Versuchsperson dauernd beobachten konnte. Dadurch, daß die zu vergleichenden Schallereignisse vorher auf Magnetbändern gespeichert waren, liefen die Versuche automatisch ab. Über eine Gegensprecheinrichtung (Kommandoanlage) konnte sich der Versuchsleiter mit der Versuchsperson verständigen. So konnten dem Versuchsleiter von der Versuchsperson Beobachtun-

gen hinsichtlich der zum Lautstärkevergleich dargebotenen Gaußtonfolgen mitgeteilt werden.

Der Spitzenpegel der Einzel-Gaußtöne wurde auf die Werte 70, 80, 90 und 100 dB eingestellt. Die Modulationsfrequenz der frequenzgruppenbreiten Gaußtöne betrug jeweils 250 Hz, 1000 Hz und 4000 Hz. Die Doppelgaußtöne waren zeitlich um 10 - 100 msec bei 1000 Hz und 4000 Hz und um 20 - 100 msec bei 250 Hz gegeneinander verzögert. Die Versuche wurden im wesentlichen mit 6 für subjektive Vergleiche geübte Personen aus dem Institut durchgeführt.

V. Ergebnisse

Die Ergebnisse für die verschiedenen Pegel, Modulationsfrequenzen und Verzögerungszeiten sind in den Abbildungen 3, 4 und 5 aufgetragen. Die mittlere quadratische Abweichung der eingestellten Pegel errechnet sich nach folgender Beziehung:

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \left(\sum_1^N L_i^2 - L_i^2 \sum_1^N L_i \right) \quad (15)$$

Diese Abweichungen sind jeweils bei den zugehörigen Meßpunkten eingetragen.

Folgende Kurven wurden nur mit 2 Versuchspersonen durchgeführt, wobei eine Person der Versuchsleiter selbst war:

f = 250 Hz

L = 70 dB

f = 4000 Hz

L = 70 dB und L = 100 dB

In diesen Fällen wurden nicht die quadratische Abweichungen, sondern die Meßpunkte der beiden Versuchspersonen eingetragen und die Kurve als arithmetischer Mittelwert angegeben. Die Übereinstimmung der beiden Ergebnisse war so gut, daß auf weitere Messungen verzichtet werden konnte.

VI. Diskussion der Ergebnisse

Bei den in den Abbildungen 2, 3 und 4 aufgetragenen Ergebnissen fällt auf, daß bei der größten hier verwendeten Verzögerungszeit von $t = 100$ msec die Doppel-Gaußtöne lautstärkemäßig zerfallen und praktisch so bewertet werden, als ob es sich um Einzel-Gaußtöne handelt. Da dies bereits bei Vorversuchen ermittelt wurde, brauchte die Untersuchung nicht über größere Verzögerungszeiten als 100 msec ausgedehnt zu werden. NIESE^{13/} kam bei der Untersuchung mit modulierten Rechteckimpul-

sen zum selben Ergebnis. Auch er glaubt, daß die Trägheit des Ohres die einzelnen Impulslücken nicht mehr zu überbrücken vermag. Die Begrenzung der kürzesten Verzögerungszeit von 10 msec bei 1000 Hz und 4000 Hz und 20 msec bei 250 Hz war durch die Gaußtonbreite gegeben. Die Gaußtonbreite beträgt bei den verwendeten Modulationsfrequenzen:

250 Hz	11 msec
1000 Hz	6,5 msec
4000 Hz	1,5 msec

Es sollte gewährleistet sein, daß sich die Gaußtöne elektrisch nicht überdecken.

Mit Ausnahme einer einzigen Kurve, haben alle die gleiche Tendenz. Bei kleinen Verzögerungszeiten bis etwa 30 msec beträgt der von der Versuchsperson eingestellte Pegelunterschied zwischen Einfach- und Doppelgaußtönen im Mittel 3 dB. Das besagt, daß der resultierende subjektive Lautstärkeindruck zweier um die oben angegebene Zeit verzögerter Gaußtöne einer Addition der Leistungen entspricht. Mit zunehmender Verzögerungszeit der Gaußtöne nimmt der eingestellte Pegelunterschied ab und wird bei 100 msec Verzögerungszeit praktisch Null. Diese Gesetzmäßigkeit ist bei den Spitzenpegeln im Bereich von 70-90 dB gleich und frequenzunabhängig.

Bei einem Spitzenpegel des Einzel-Gaußtones von 100 dB und der Modulationsfrequenz von 250 Hz scheint das Energieadditionsgesetz jedoch verletzt zu sein. Es beträgt der Pegelunterschied in diesem Fall nicht 3 dB, sondern 4,2 dB zwischen den Verzögerungszeiten von 20 - 40 msec. Dieser Effekt zeigt sich bei den beiden anderen untersuchten Frequenzen bei dem Pegel von 100 dB jedoch nicht.

Um Aufschluß über die Lautstärke der Gaußtöne zu erhalten, wurde mit 6 Personen der Versuch unternommen, einen reinen 1000 Hz Ton mit einem frequenzgruppenbreiten Gaußton um 1000 Hz nach dem Békésy-Verfahren zu vergleichen. Obwohl es sehr schwierig ist, zwei grundverschiedene Schallereignisse lautstärkemäßig zu beurteilen, stellten die Versuchspersonen doch recht genau den 1000 Hz Ton 'lauter als' und 'leiser als', als den im Spitzenpegel konstant gelassenen Gaußton ein. Es wurde ein effektiver Schalldruckpegel von - 20 dB unter dem Spitzenpegel des Gaußtones eingestellt. Dann entspricht einem Spitzenpegel

des Gaußtones von 70 dB der Lautstärke 50 Phon und einem von 100 dB der Lautstärke 80 Phon.

Damit lassen sich die vorliegenden Ergebnisse mit den in der Einleitung angegebenen Arbeiten vergleichen. Die Ergebnisse von AIGNER und STRUTT¹⁾ sowie von LÜBCKE²⁾ können mit Gaußtönen nicht bestätigt werden. Dagegen stehen die Untersuchungen von HAAS³⁾, die mit einem Einfachrückwurf und Sprache unter genau definierten Bedingungen durchgeführt wurden und die von MEYER und SCHODDER⁴⁾ mit den hier gefundenen Resultaten in Einklang. HAAS führte seine Untersuchungen bei einer kleinen Lautstärke (ca 55 Phon) durch. MEYER und SCHODDER untersuchten unter denselben Bedingungen wie HAAS, aber auch bei größeren Lautstärken und fanden, daß das Energieadditionsgesetz nur bei größeren Lautstärken verletzt wird.

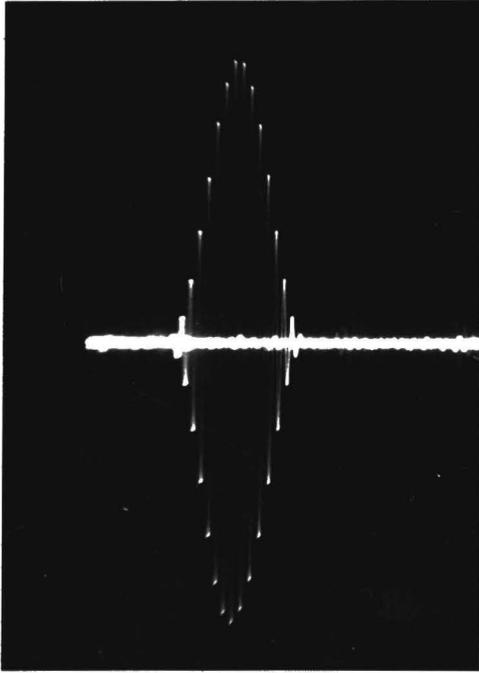
Die vorliegende Arbeit zeigt nun, unter welchen Bedingungen der resultierende subjektive Lautstärkeindruck nicht mehr der Addition der Leistungen entspricht. Die Verletzung dieses Gesetzes tritt dann ein, wenn zwei um weniger als 40 msec verzögerte Schallereignisse vornehmlich tieffrequente Anteile aufweisen und die Lautstärke 80 Phon überschreiten. Weisen die verzögerten Schallereignisse höhere Frequenzanteile auf, dann wird das Energieadditionsgesetz auch bei größeren Lautstärken nicht verletzt.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei an dieser Stelle für die Bereitstellung der Mittel gedankt. Ebenso danke ich den Mitarbeitern des Instituts, insbesondere Herrn Tonmeister Georg PLENGE für die Zeit, die sie sich für Versuche zur Verfügung gestellt haben.

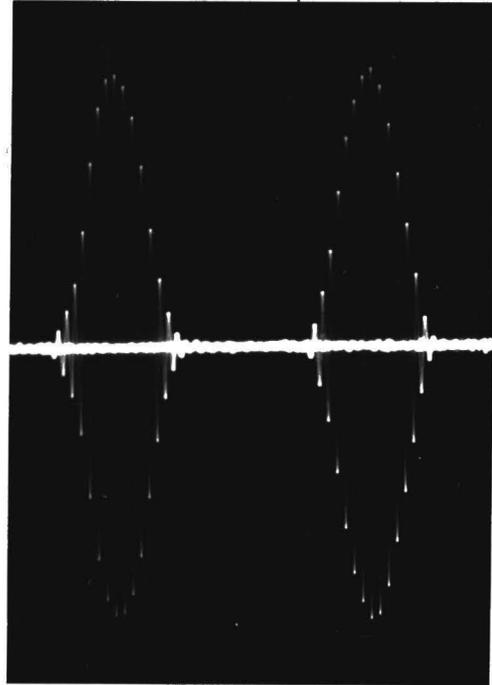
Literatur

- /1/ AIGNER, F. und STRUTT, M.J.O. "Über die Physiologische Wirkung mehrerer Schallquellen auf das Ohr und ihre Anwendung auf die Raumakustik"
Zeitschrift für technische Physik 1934 Nr. 9, Seite 355 - 360
- /2/ LÜBCKE, E. "Über die Zunahme der Lautstärke bei mehreren Schallquellen"
Zeitschrift für technische Physik 1935 Nr. 3, Seite 77 - 80
- /3/ HAAS, H. "Über den Einfluß eines Einfach-~~edra~~ auf die Hörsamkeit von Sprache"
Acustica 1951, Vol.1, Nr. 2
Seite 49 - 58
- /4/ MEYER, E. und SCHODDER, G.R. "Über den Einfluß von Schallrückwürfen auf Richtungslokalisation und Lautstärke"
Nachr. d. Akademie der Wissenschaften Göttingen Kl. IIa, Nr. 6 1952
Seite 31 - 42
- /5/ ROHDE, FIRMIN "Erzeugung von Tonimpulsen mit einer Gauß'schen Fehlerkurve als Hallkurve"
Bericht an die Deutsche Forschungsgemeinschaft August 1958
- /6/ BERTULEIT, H. "Vorzüge der Gaußfunktionen gegenüber anderen selbstreziproken Funktionen"
Techn. Bericht Nr. 44 aus dem Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung, Berlin-Charlottenburg, 1960
- /7/ BOERGER, G. "Ein Generator zur Erzeugung von Gaußimpulsen"
Techn. Bericht Nr. 54 aus dem Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung, Berlin-Charlottenburg, 1961
- /8/ FELDTKELLER, R. und ZWICKER, E. "Das Ohr des Nachrichtenempfängers"
S. Hirzel, 1956
- /9/ BEKESY, G. von "Über ein neues Audiometer"
AEÜ, 1947 Seite 13 - 16

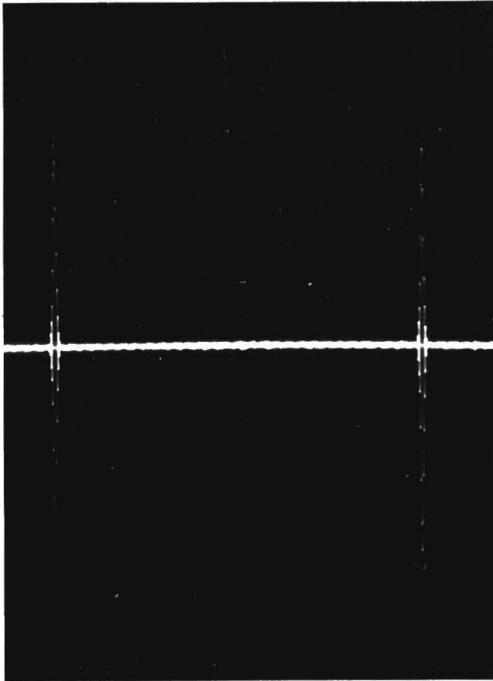
- /10/ CREMER, L.,
PLENGE, G. und
SCHWARZE, D. " Kurven gleicher Lautstärke mit ok-
tav-gefiltertem Rauschen im diffu-
sen Schallfeld"
Acustica 1959, Vol. 9 Seite 65 - 75
- /11/ ZWICKER, E. und
GÄSSLER, G. " Die Eignung des dynamischen Kopf-
hörers zur Untersuchung frequenz-
modulierter Töne"
Acustica 2 (1952) Beiheft 3
- /12/ PLENGE, G. und
SCHWARZE, D. " Über den Aufbau eines Meßplatzes
für Hörversuche"
Techn. Bericht Nr. 48 aus dem
Heinrich-Hertz-Institut für
Schwingungsforschung, Berlin-Char-
lottenburg, 1961
- /13/ NIESE, H. " Die lautstarke Empfindung von
rhythmischen Geräuschen sehr ge-
ringer Periodizität"
Hochfrequenz- und Elektroakustik,
Band 67, Seite 26 - 34



Einzel-Gaußton
 $f_m = 1000 \text{ Hz}$

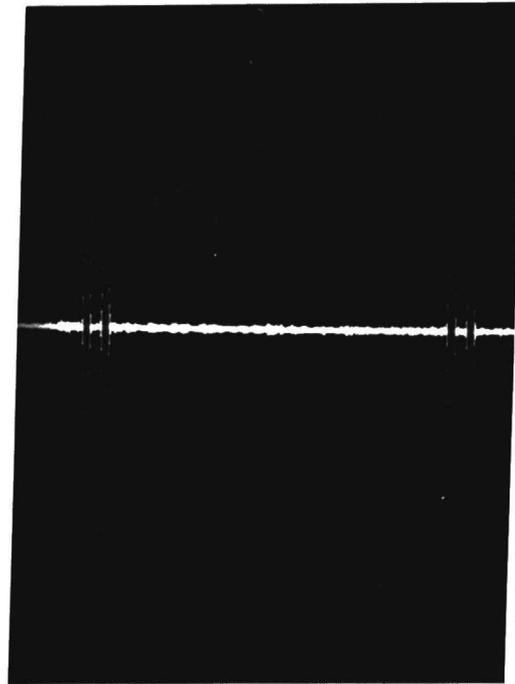


Doppel-Gaußtöne um 30 msec
verzögert. $f_m = 1000 \text{ Hz}$



Einzel-Gaußtöne mit einer
Folgefrequenz von 1 Hz

Abb.1a



Gaußtonpaare mit einer Folge-
frequenz von 1 Hz

Abb.1b

Oszillogramme der Schalldruckzeitfunktion der zum Lautstär-
kevergleich dargebotenen Gaußtöne.

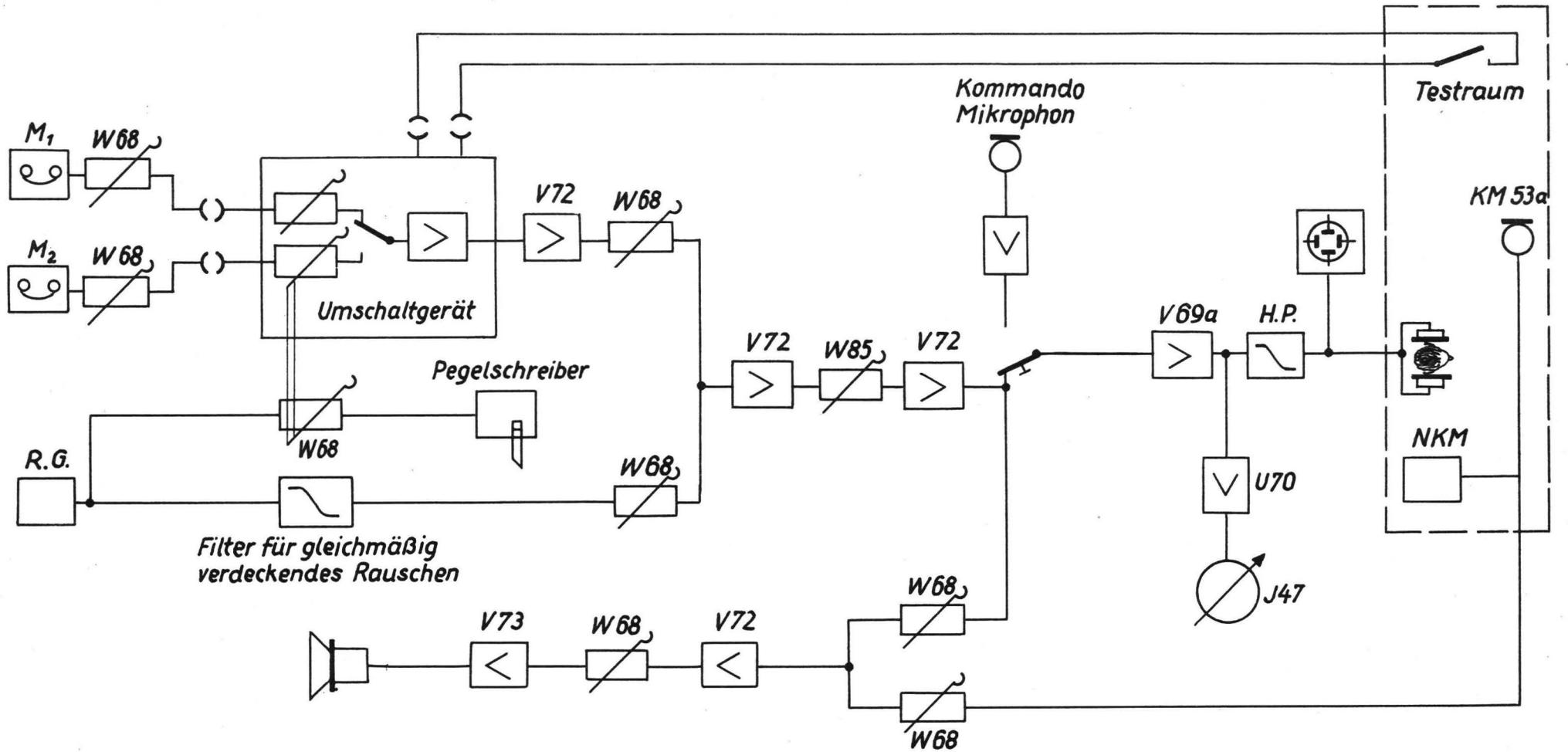


Abb.2 Blockschaltbild

ΔL
[dB]

Lautstärkevergleich eines Einzelgaußtones mit einem Gaußtonpaar in Abhängigkeit von der Verzögerungszeit δt der Doppelgaußtöne, Parameter ist der Spitzenpegel der Einzelgaußtöne.

$f = 250 \text{ Hz}$

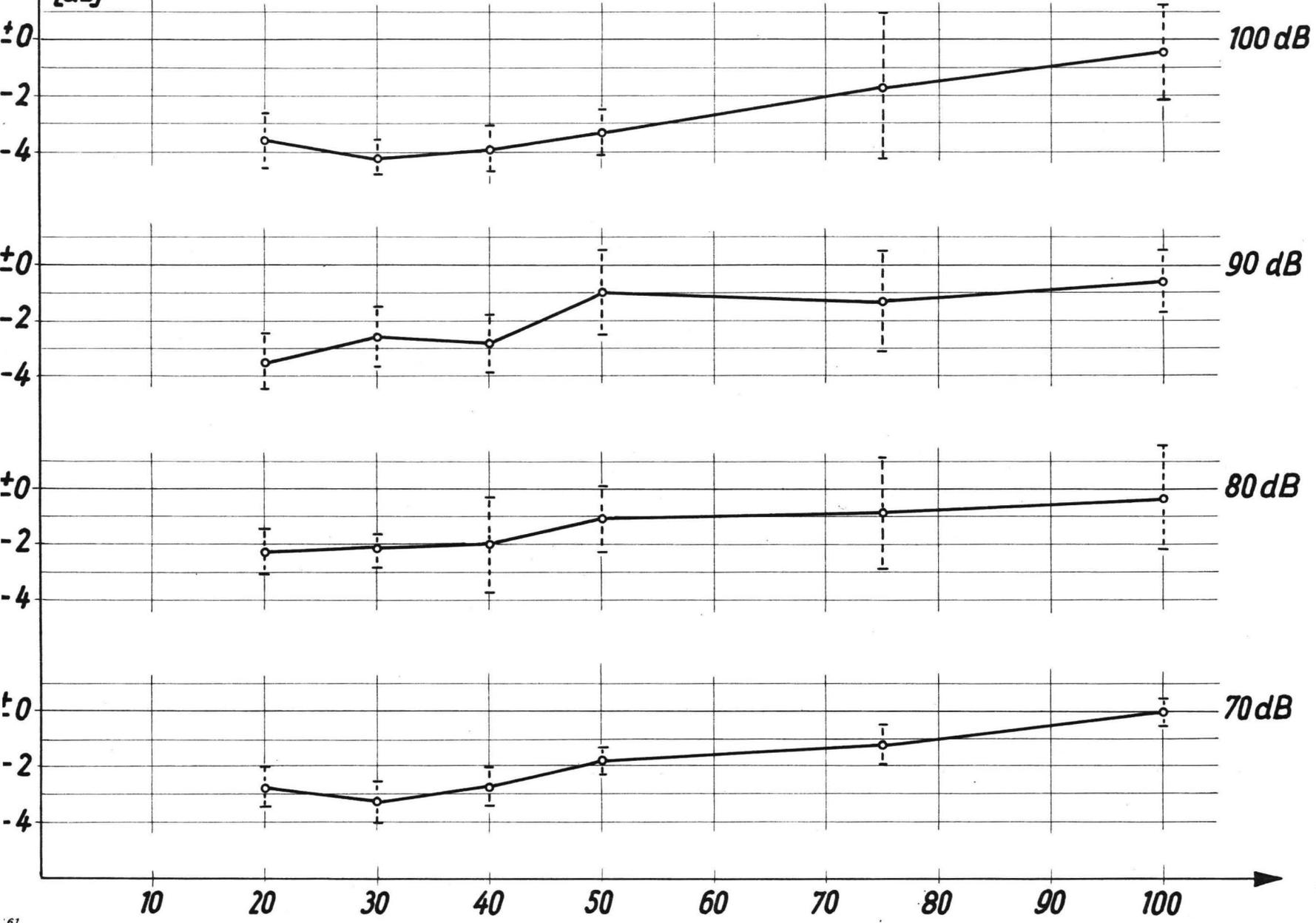


Abb. 3

δt [msec]

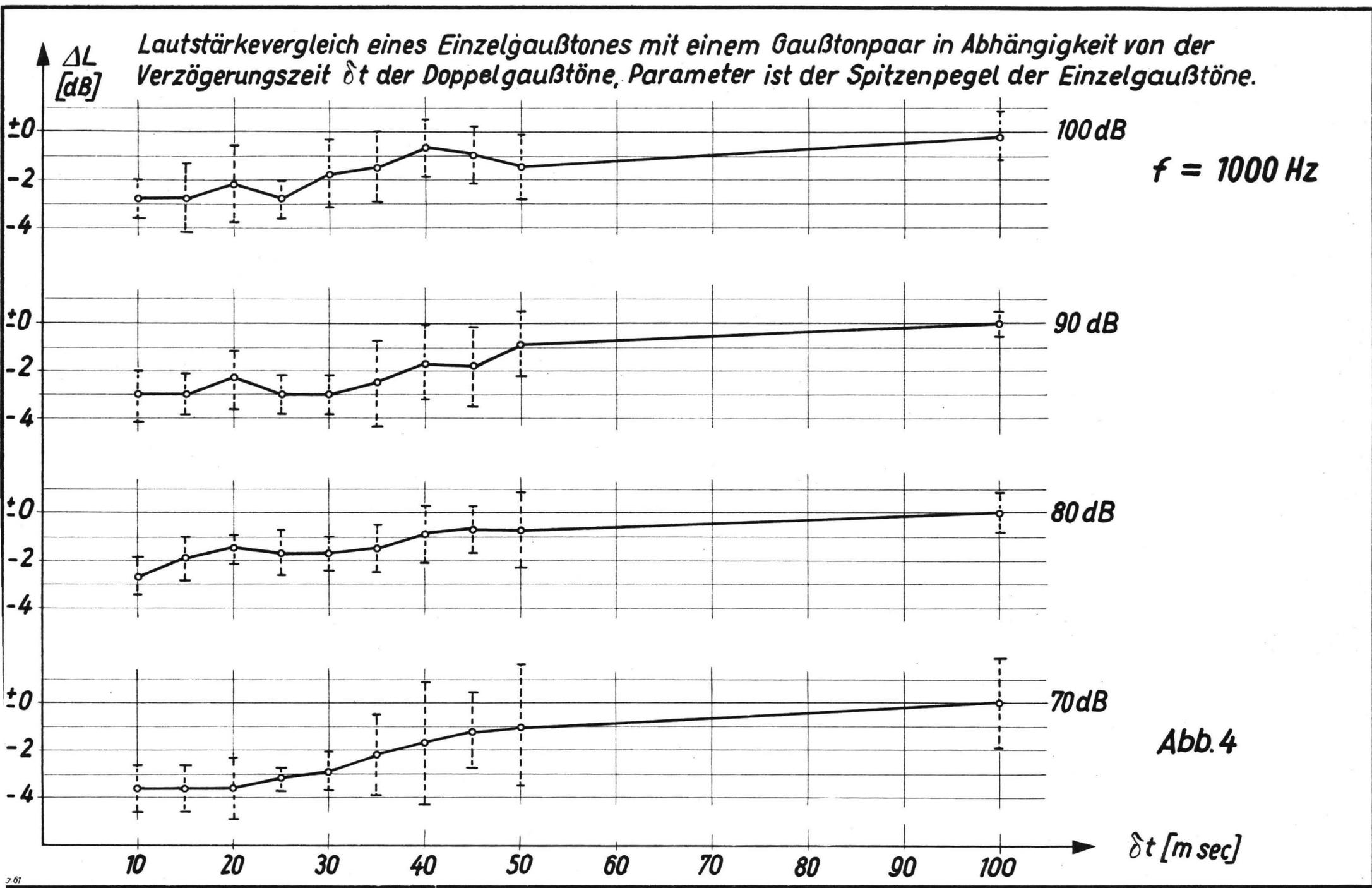


Abb. 4

ΔL [dB] Lautstärkevergleich eines Einzelgaußtones mit einem Gaußtonpaar in Abhängigkeit von der Verzögerungszeit δt der Doppelgaußtöne, Parameter ist der Spitzenpegel der Einzeltöne.

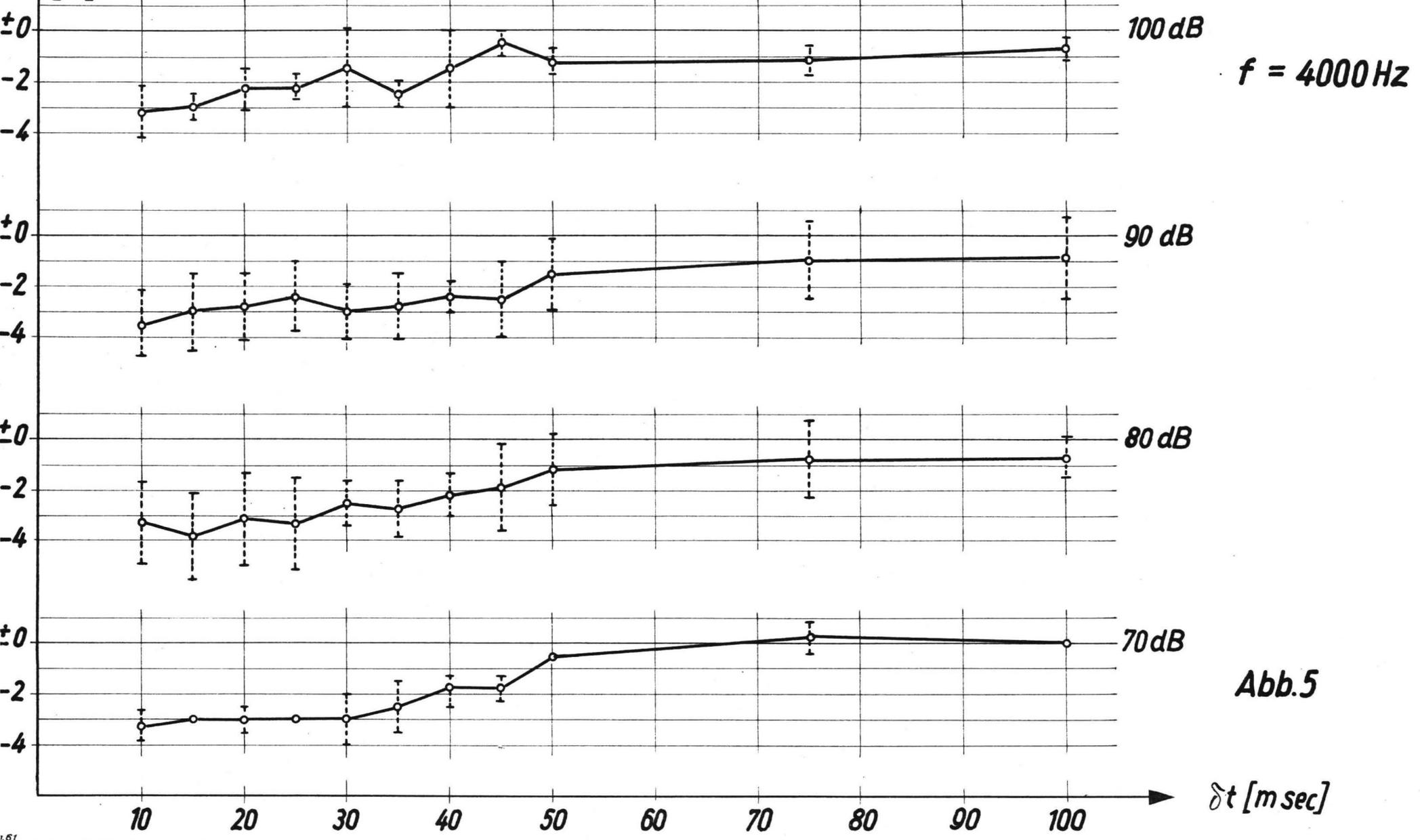


Abb.5

