

**LAUTSTÄRKEPEGEL BEI 400 Hz  
PSYCHOAKUSTISCHE MESSUNG UND BERECHNUNG NACH ISO 532 B**

Hugo Fastl und Eberhard Zwicker  
Institut für Elektroakustik, Technische Universität München

**1. Einführung**

Das menschliche Gehör ist bei mittleren Frequenzen (um 4000 Hz) empfindlicher als bei tieferen bzw. höheren Frequenzen. Für schmalbandige Schalle mit einer Bandbreite innerhalb einer Frequenzgruppe (Zwicker 1961) bedeutet dies, daß ein Sinuston oder ein Schmalbandrauschen bei tiefen Frequenzen (z.B. 100 Hz) einen höheren Schallpegel aufweisen muß als ein schmalbandiger Schall bei mittleren Frequenzen (z.B. 1000 Hz), damit beide Schalle als gleichlaut wahrgenommen werden. Kurvenzüge, welche die Schallpegel von gleich lauten schmalbandigen Schallen bei verschiedenen Frequenzen verbinden, werden als Kurven gleichen Lautstärkepegels bezeichnet. Als Grenzwert (Lautheit Null) ergibt sich dann die Ruheshchwelle. Die Kurvenzüge werden durch den Schallpegel des gleichlauten schmalbandigen Schalles bei 1 kHz gekennzeichnet; der Zahlenwert dieses Schallpegels wird - mit der Dimension phon versehen - als Lautstärkepegel bezeichnet. Die Kurven gleicher Lautstärke werden sowohl in nationalen (DIN 45630) als auch in internationalen (ISO 226) Normen behandelt. Obwohl bereits umfangreiche Messungen zum Lautstärkepegel durchgeführt wurden (z.B. Fletcher und Munson 1933, Robinson und Dadson 1956), sind die Daten für die Ruheshchwelle sowie für die Lautstärkepegel im Frequenzbereich um 400 Hz umstritten (Berger 1981, Zwicker und Feldtkeller 1955, Zwicker 1966). Hier ist dringend Abhilfe geboten, da die Kurven gleicher Lautstärke von immenser praktischer Bedeutung sind: Beispielsweise beruhen fast alle Vorschriften und Normen über die Lärmbeurteilung auf dem A-bewerteten Schallpegel, der einer Kurve gleichen Lautstärkepegels von etwa 20 phon nachempfunden ist.

In dieser Arbeit werden psychoakustische Messungen zum Lautstärkepegel bei 400 Hz im freien Schallfeld beschrieben. Die psychoakustisch gemessenen Werte werden mit physikalischen, gemäß ISO 532 B berechneten Werten verglichen. Darüber hinaus werden Lautheitsunterschiede für Töne berechnet, die gemäß ISO 226 gleich laut sein sollten.

**2. Messungen****2.1 Subjektive Messungen**

An allen subjektiven Messungen nahmen acht normalhörende Versuchspersonen im Alter von 24 bis 28 Jahren (Median 26 Jahre) teil. Die Messungen wurden im reflexionsarmen Raum des Instituts für Elektroakustik der Technischen Universität München durchgeführt. Als Testschalle wurden Sinustöne von 400 Hz bzw. 1000 Hz verwendet, die über einen elektrodynamischen Lautsprecher abgestrahlt wurden. Bei beiden Testfrequenzen lag der Pegel der zweiten bzw. dritten Harmonischen um mehr als 45 dB unter dem Pegel der ersten Harmonischen (Grundwelle). Um Nahfeldeinflüsse zu reduzieren und die Bedingungen einer eben fortschreitenden Welle anzunähern wurde zwischen Lautsprecher und Versuchsperson ein Abstand von 3 m gewählt. Der Lautsprecher befand sich in Blickrichtung der Versuchsperson. Die Töne von 400 Hz bzw. 1000 Hz wurden in Paaren dargeboten. Dabei betrug die Dauer der Töne jeweils 1000 ms, zwischen den Tönen eines Paares lag eine Pause von 800 ms Dauer. Die Tonpaare waren durch Pausen von 4000 ms Dauer getrennt. Um Schaltknacke zu vermeiden, wurde beim Ein- und Ausschalten der Töne eine Gaußförmige Übergangsfunktion mit 50 ms Anstiegszeit gewählt. Nach der Darbietung von 3 Tonpaaren mußte die Versuchsperson ein Urteil abgeben.

Insgesamt wurden vier Teilversuche durchgeführt: Im ersten Teilversuch wurde als erster Schall eines Paares ein 1000 Hz-Ton mit 70 dB Schallpegel und als zweiter Schall eines Paares ein 400 Hz-Ton mit Schallpegeln zwischen 62 und 78 dB bei einer Stufengröße von 2 dB dargeboten. Die Versuchsperson mußte mit "ja" oder "nein" auf die Frage antworten: "Ist der zweite Schall lauter als der erste Schall?" Im zweiten Teilversuch wurde die Schalldarbietung des ersten Teilversuchs beibehalten; die Frage an die Versuchsperson lautete jetzt aber: "Ist der zweite Schall leiser als der erste Schall?" Im dritten Teilversuch wurde ein 400 Hz-Ton von 70 dB Schallpegel als erster Schall eines Paares und ein 1000 Hz-Ton mit Schallpegeln zwischen 62 und 78 dB (2 dB-Schritte) als zweiter Schall eines Paares dargeboten. Die Versuchsperson hatte wieder mit "ja" oder "nein" auf die Frage "Ist der zweite Schall lauter als der erste Schall?" zu antworten. Im vierten Teilversuch wurde die gleiche Schalldarbietung wie beim dritten Teilversuch gewählt, die Fragestellung jedoch wieder umgekehrt: "Ist der zweite Schall leiser als der erste Schall?" Jedes Schallpaar wurde von jeder der acht Versuchspersonen in jedem Teilversuch jeweils viermal beurteilt. Die Häufigkeit der positiven ("ja") Antworten wurde als Funktion des jeweils variierten Schallpegels dargestellt. Demnach entsprechen der Häufigkeit 100% in den Figuren 32 positive Antworten. Insgesamt beruhen die Ergebnisse auf  $8 \times 3 \times 4 \times 9 \times 4 = 3456$  Paarvergleichen.

### 2.2 Lautheitsberechnungen

Für die in den subjektiven Messungen für den Fall gleicher Lautheit eines 400 Hz-Tones mit einem 1000 Hz-Ton ermittelten Schallpegel wurden die zugehörigen Lautstärkepegel und Lautheiten anhand eines BASIC-Programms von Zwicker, Fastl und Dallmayr (1984) berechnet. Darüber hinaus wurden für einen 400 Hz-Ton von 65,8 dB und einen 1000 Hz-Ton von 70 dB die Lautstärkepegel und Lautheiten berechnet, da die in ISO 226 dargestellten Daten suggerieren, daß diese Töne denselben Lautstärkepegel von 70 phon aufweisen sollten. Bei den Lautheitsberechnungen ist zu beachten, daß ein 1000 Hz-Ton von 70 dB nicht nur in der Terz um 1000 Hz sondern - wegen der endlichen Flankensteilheit der Terzfilter- auch in den benachbarten Kanälen zu Pegelanzeigen führt. Typische Werte der Dämpfung liegen um 20 dB je Nachbarterz. Dies bedeutet, daß ein 1000 Hz-Ton von 70 dB bei handelsüblichen Terzanalysationen meist zu folgenden Pegelanzeigen führt.

$f_{\text{terz}}$	500	630	800	1000	1250	1600	2000 Hz
$L_{\text{terz}}$	10	30	50	70	50	30	10 dB

Wegen der flachen oberen Flanke der Lautheits-Tonheits-Muster kommt nur den Terzpegeln bei Frequenzen unterhalb 1000 Hz für die Lautheitsberechnung Bedeutung zu.

### 3. Ergebnisse

In Fig. 1a sind die Ergebnisse der ersten beiden Teilversuche dargestellt. Die Häufigkeit  $h$  positiver Antworten ist als Funktion des Pegels  $L_{400\text{Hz}}$  des 400 Hz-Tones angegeben. Mit durchgezogenen Linien verbundene Dreiecke gelten für die Fragestellung "Ist der zweite Schall lauter als der erste Schall", mit gestrichelten Linien verbundene Kreise gelten für die Fragestellung "Ist der zweite Schall leiser als der erste Schall". Die 50%-Werte der psychometrischen Funktionen in Fig. 1a geben die Schallpegel für gleiche Lautheit eines 400 Hz-Tones und eines 1000 Hz-Tones von 70 dB an. Für den ersten Teilversuch (Dreiecke) ergibt sich ein Wert von  $L_{400\text{Hz}} = 71.6$  dB, für den zweiten Teilversuch (Kreise) ein Wert von  $L_{400\text{Hz}} = 71.2$  dB. Dies bedeutet, daß im Mittel ein 400 Hz-Ton mit 71.4 dB Schallpegel als gleich laut wahrgenommen wird wie ein 1000 Hz-Ton von 70 dB Schallpegel. Die zugehörigen Lautheits-Tonheitsmuster sind in

Fig. 1b für den 1000 Hz-Ton und in Fig. 1c für den 400 Hz-Ton dargestellt. Als Lautstärkepegel werden gemäß ISO 532 B Werte von  $L_N=70.4$  phon für  $L=70$  dB bei 1000 Hz und  $L_N = 70.6$  phon für  $L=71.4$  dB bei 400 Hz berechnet. Die zugehörigen berechneten Lautheiten betragen  $N = 8.21$  sone bzw.  $N = 8.34$  sone. Dies bedeutet, daß das Berechnungsverfahren nach ISO 532 B die Beurteilung der Lautstärke der beiden Töne ausgezeichnet nachvollzieht. Im Idealfall müßten sich für die gleich lauten Töne bei 1000 Hz bzw. 400 Hz die gleichen Werte des Lautstärkepegels und der Lautheit ergeben. Von diesem Idealfall weichen die berechneten Werte nur um 0.2 phon bzw. 0.13 sone entsprechend 1.6 % ab!

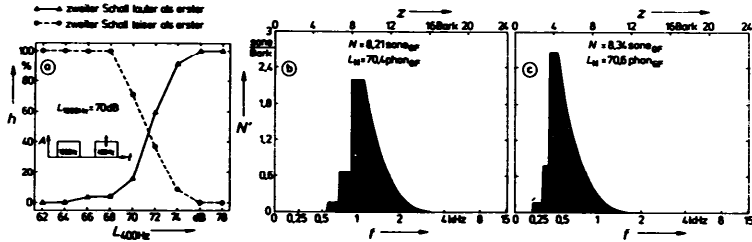


Fig. 1: Lautheitsvergleich zwischen einem 1000 Hz-Ton und einem 400 Hz-Ton. Psychometrische Funktionen (a), Lautheits-Tonheits-Muster sowie berechnete Lautstärkepegel  $L_N$  und Lautheiten  $N$  (b) und (c) für gleiche Lautstärkewahrnehmung.

Fig. 2 zeigt die entsprechend aufbereiteten Ergebnisse für den dritten und vierten Teilversuch. Die relative Häufigkeit positiver Antworten  $h$  ist als Funktion des Schallpegels  $L_{1000\text{Hz}}$  des 1000 Hz-Tones dargestellt. Für die Fragestellung "Zweiter Schall lauter" (Dreiecke) ergibt sich ein 50%-Wert von  $L_{1000\text{Hz}} = 69.3$  dB, für die Fragestellung "Zweiter Ton leiser" (Kreise) ein 50%-Wert von  $L_{1000\text{Hz}} = 68$  dB. Im Mittel wird demnach ein 1000 Hz-Ton von 68.7 dB als gleich laut wahrgenommen wie ein 400 Hz-Ton von 70 dB. Aus Fig. 2b und Fig. 2c kann entnommen werden, daß sich die zugehörigen berechneten Lautstärkepegel  $L_N$  um lediglich 69.3 phon - 69.1 phon = 0.2 phon und die entsprechenden Lautheiten  $N$  nur um 7.63 sone - 7.50 sone = 0.13 sone bzw. 1.7 % unterscheiden. Dies bedeutet, daß auch in diesem Fall das Verfahren nach ISO 532 B den subjektiven Lautstärkevergleich ausgezeichnet nachbilden kann.

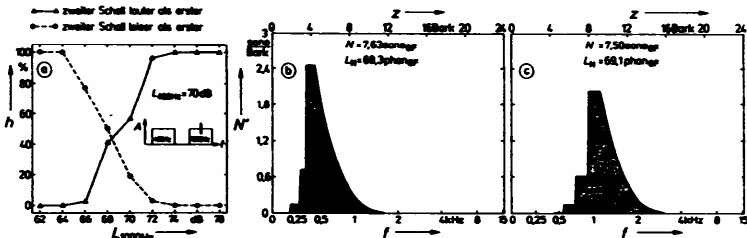
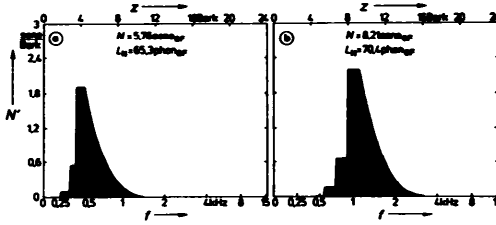


Fig. 2: Lautheitsvergleich zwischen einem 400 Hz-Ton und einem 1000 Hz-Ton. Sonst wie bei Fig. 1 beschrieben.



**Fig.3:** Lautheits-Tonheits-Muster mit zugehörigen Lautstärkepegeln  $L_N$  und Lautheiten  $N$  für Töne bei 1000 Hz bzw. 400 Hz, die gemäß ISO 226 gleich laut sein sollten.

Fig. 3 zeigt Lautheits-Tonheitsmuster von Tönen bei 400 Hz bzw. 1000 Hz, die gemäß ISO 226 die gleiche Lautheit hervorrufen sollten. Der Schallpegel des 400 Hz-Tones beträgt dabei 65,8 dB, der Pegel des 1000 Hz-Tones 70 dB. Die zugehörigen berechneten Lautstärkepegel  $L_N$  betragen 65,3 phon bzw. 70,4 phon, die entsprechenden Lautheiten  $N$  ergeben 5,76 sone bzw. 8,21 sone. Somit unterscheiden sich die Lautstärkepegel um 5,1 phon und die Lautheiten um 2,45 sone bzw. 29,8 %. Für gleich laute Töne sind solch große Unterschiede undenkbar. Die in Fig. 1 und Fig. 2 dargestellten Ergebnisse deuten darauf hin, daß die Ursachen für die Diskrepanzen nicht im Berechnungsverfahren, sondern bei der Ermittlung der ISO 226 zugrunde liegenden subjektiven Werte zu suchen sind. Diese Annahme bestätigen neueste subjektive Ergebnisse zum Lautstärkepegel um 400 Hz (Richter und Brinkmann 1987, Betke et al. 1987), die mit geübten Versuchspersonen gewonnen wurden. Daher soll in bereits angelaufenen internationalen Meßreihen geklärt werden, wie die in ISO 226 publizierten subjektiven Daten modifiziert werden müssen, um auch neuere Meßergebnisse mit abzudecken.

### Literatur

- Berger, E.H. (1981) Re-examination of the low-frequency (50-1000 Hz) normal threshold of hearing in free and diffuse sound fields. *J.Acoust.Soc.Am.* 70, 1635-1645.
- Betke, K., Schulte-Fortkamp, B. und Remmers, H. (1987) Kurven gleicher Lautheit im Frequenzbereich 50 Hz bis 1 kHz. DAGA '87, Aachen.
- Fletcher, H. and Munson, W.A. (1933) Loudness, its definition, measurement and calculation. *J.Acoust.Soc.Am.* 5, 82-108.
- Richter, U. und Brinkmann, K. (1987) Persönliche Mitteilung.
- Robinson, D.W. and Dadson, R.S. (1956) A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones. *Brit.J.Applied Physics* 7, 166-181.
- Zwicker, E. (1961) Subdivision of the audible frequency range into critical bands (Frequenzgruppen). *J.Acoust.Soc.Am.* 33, 248.
- Zwicker, E. (1966) Lautstärkeberechnungsverfahren im Vergleich. *Acustica* 17, 278-284.
- Zwicker, E. und Feldtkeller, R. (1955) Über die Lautstärke von gleichförmigen Geräuschen. *Acustica* 5, 303-316.
- Zwicker, E., Fastl, H. and Dallmayr, C. (1984) BASIC-Program for calculating the loudness of sounds from their 1/3-oct. band spectra according to ISO 532 B. *Acustica* 55, 63-67.