

Zum Zwicker-Ton bei unterschiedlicher Bandbreite der Anregung

G. KRUMP*

Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, Technische Universität München

* jetzt: NOKIA Audio Electronics, Straubing

1. Einführung

Nach dem Abschalten von Schallreizen mit geeigneter spektraler Zusammensetzung kann ein leiser, abklingender Nachton (Zwicker-Ton) wahrgenommen werden [6]. Als Zwicker-Ton-Erzeugerschalle werden rechnergenerierte Linienspektren mit konstanten Amplituden (Spektrallinienabstand: 1 Hz) und zufällig verteilten Phasenlagen verwendet. In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluß der Bandbreite der Anregung auf die Tonhöhe und die Qualität des Nachtones untersucht.

Die Erzeugerschalle wurden den fünf bzw. sechs normalhörenden Versuchspersonen im Alter zwischen 22 und 33 Jahren monaural über Kopfhörer (Beyer DT 48) mit Freifeldentzerrer [5] statistisch verteilt jeweils viermal dargeboten. Durch Drehen eines Stufenschalters konnte die Versuchsperson zwischen drei Positionen wählen: In Schalterstellung 1 wurde ihr der Erzeugerschall dargeboten, den sie sich einige Sekunden lang anhören sollte. In Position 2 wurde die Anregung abrupt abgeschaltet und es sollte ein Nachton wahrzunehmen sein, dessen Tonhöhe und Lautheit durch Einstellen eines Vergleichssinustones in Schalterposition 3 ermittelt wurde. Zusätzlich sollten die Versuchspersonen die Qualität des Zwicker-Tones, welche sich hauptsächlich aus Dauer, Lautheit und Ausgeprägtheit der Tonhöhe des Nachtones zusammensetzt, beurteilen und in sechs verschiedene Kategorien von „nicht gehört“ bis „sehr gut“ einteilen. Die einzelnen Qualitätsbeurteilungen jeder Person wurden in eine Liste mit den entsprechenden Kategorien eingetragen und durch Abzählen Zentralwert und Wahrscheinliche Schwankung bestimmt. Aus den vier Frequenzeinstellungen jeder Versuchsperson wurde der Zentralwert berechnet, der in den nachfolgenden Abbildungen jeweils in Form eines Symbols dargestellt ist.

Die Erzeugerschalle wurden mit Ausnahme der Versuchsreihe nach Fig. 4b mit stets gleichem Intensitätsdichtepegel bzw. gleichem Pegel einer Spektrallinie dargeboten, so daß der Pegel der ersten

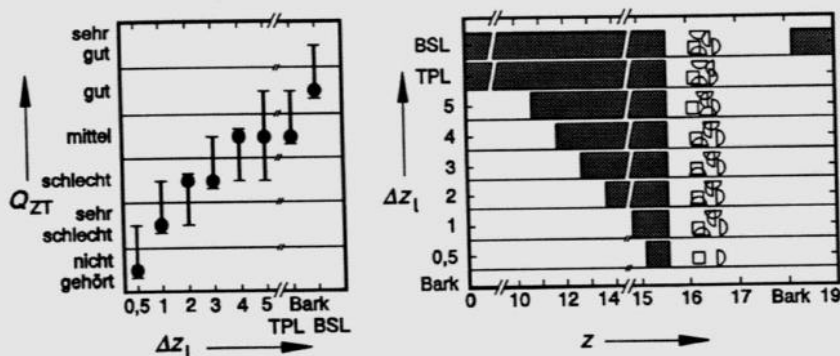


Fig. 1: Tonheit z (rechts) und Qualität Q_{ZT} (links) des Zwicker-Tones bei Linienspektren verschiedener Bandbreite Δz_1 bzw. bei tiefpaß- und bandsperrbegrenztem Linienspektrum. Zentralwerte (ausgefüllte Kreise und Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Balken). Spektrale Lücke zwischen 15,6 Bark (3000 Hz) und 18,1 Bark (4630 Hz) beim Bandsperr-Linienspektrum (BSL). Pegel einer Spektrallinie: -1,5 dB (bei $\Delta z_1 = 0,5$ Bark: 1,5 dB).

Frequenzgruppe unterhalb der spektralen Lücke jeweils konstant blieb. Ist diese Frequenzgruppe nur zur Hälfte mit Spektrallinien aufgefüllt (Δz_l bzw. $\Delta z_{TP} = 0,5$ Bark), so wurde die Anregung dementsprechend mit einem um 3 dB höheren Pegel dargeboten.

2. Bandpaß-Linienspektren als Erzeugerschalle

Da der Nachton nach Lummis und Guttman [4] bereits mit Tiefpaßrauschen erzeugt werden kann, wurde zunächst untersucht, inwieweit Bandpaß-Linienspektren als Zwicker-Ton-Erzeugerschalle verwendet werden können. Die obere Grenze der Bandpaß-Linienspektren wurde auf 15,6 Bark (3000 Hz) festgelegt, während die Bandbreite gemäß Fig. 1 von 0,5 bis 5 Bark variiert wurde. Zusätzlich wurde das zugehörige Tiefpaß-Linienspektrum (TPL) mit $\Delta z_l = 15,6$ Bark und das entsprechende Bandsperre-Linienspektrum (BSL) in die Versuchsreihe aufgenommen.

Die Tonhöhe des Zwicker-Tones ändert sich infolge des stets gleichen Pegels der ersten Frequenzgruppe unterhalb der oberen Grenze der Anregung bzw. unterhalb der spektralen Lücke bei verschiedenen Bandbreiten kaum. Der Nachton wurde immer über der oberen Grenzfrequenz des Bandpaß-Linienspektrums wahrgenommen. Ab 1 Bark Bandbreite kann der Zwicker-Ton bereits von allen Versuchspersonen gehört werden. Mit zunehmender Bandbreite verbessert sich die Qualität des Nachtones bis sie bei 5 Bark weitgehend der des Tiefpaß-Linienspektrums entspricht. Durch Zusetzen eines Hochpaßanteiles steigert sich die Qualität nochmals um eine Kategorie, so daß ein Bandsperre-Linienspektrum die beste Anregung für einen Zwicker-Ton darstellt.

3. Bandsperre-Linienspektren als Erzeugerschalle

In einem weiteren Experiment wurde gemäß Fig. 2 zu einem wie im vorhergehenden Versuch in der Breite variierten Bandpaß-Linienspektrum ein Hochpaßanteil hinzugefügt. Dadurch entsteht ein Bandsperre-Linienspektrum mit einer spektralen Lücke von 2,5 Bark. Der Frequenzbereich unterhalb der spektralen Lücke wird im folgenden als Tiefpaßanteil, der oberhalb der Lücke als Hochpaßanteil des Erzeugerschalles bezeichnet. Die obere Grenze des Tiefpaßbereiches, dessen Bandbreite Δz_{TP} verändert wird, liegt nun wie bei den nachfolgenden Versuchen bei 15,9 Bark (3150 Hz). Wegen des zugesetzten Hochpaß-Linienspektrums erhöht sich die Qualität im Vergleich zu Fig. 1 durchschnittlich

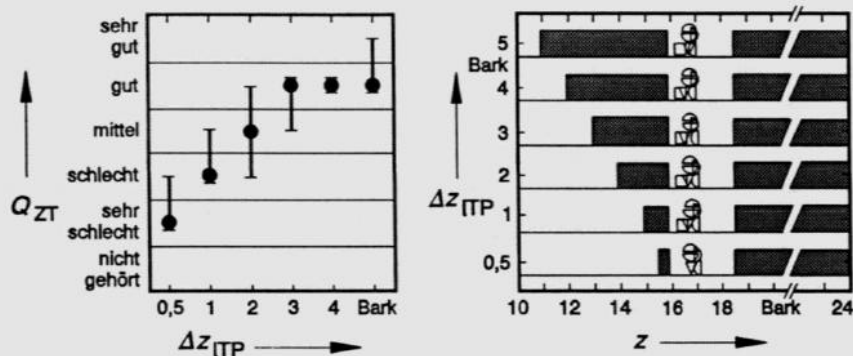


Fig. 2: Tonheit z (rechts) und Qualität Q_{ZT} (links) des Zwicker-Tones bei Bandsperre-Linienspektren mit unterschiedlicher Bandbreite Δz_{TP} des Tiefpaßanteiles. Zentralwerte (ausgefüllte Kreise und Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Balken). Spektrale Lücke zwischen 15,9 Bark (3150 Hz) und 18,4 Bark (4850 Hz). Pegel einer Spektrallinie: -1,5 dB (bei $\Delta z_{TP} = 0,5$ Bark: 1,5 dB).

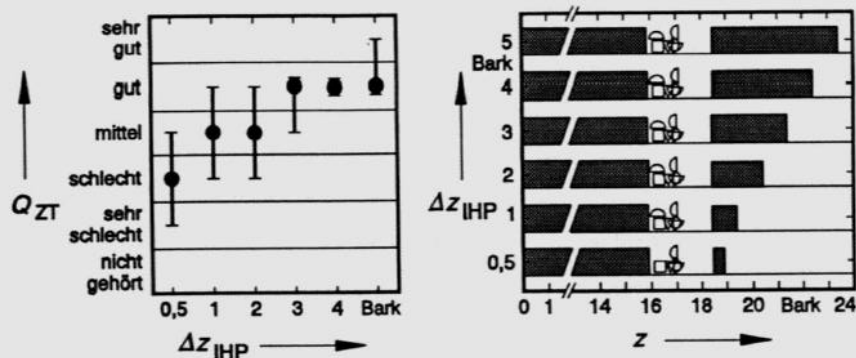


Fig. 3: Tonheit z (rechts) und Qualität Q_{ZT} (links) des Zwicker-Tones bei Bandsperre-Linienspektren mit unterschiedlicher Bandbreite Δz_{IHP} des Hochpaßanteiles. Zentralwerte (ausgefüllte Kreise und Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Balken). Spektrale Lücke zwischen 15,9 Bark (3150 Hz) und 18,4 Bark (4850 Hz). Pegel einer Spektrallinie: -1,5 dB.

um eine Kategorie, während die Tonhöhe des Zwicker-Tones von der Bandbreite unbeeinflusst bleibt. Der Nachton kann von 5 der 6 Versuchspersonen bereits bei $\Delta z_{IHP} = 0,5$ Bark gehört werden. Mit steigender Breite des Tiefpaßbereiches erhöht sich die Qualitätsbeurteilung. Bei Δz_{IHP} gleich 5 Bark erreicht der Zwicker-Ton die Qualität des entsprechenden Linienspektrums maximaler Bandbreite. Die stark unterschiedlichen Qualitäten sind in dieser Versuchsreihe eindeutig auf die verschiedenen Bandbreiten des Tiefpaßanteiles und nicht auf eine Änderung des Gesamtpegels der Erzeugerschalle zurückzuführen, da der Hochpaßanteil alleine bereits einen Darbietungspegel von 39 dB verursacht. Beim nächsten Versuch wurde, wie in Fig. 3 angedeutet, der Hochpaßanteil des Bandsperre-Linienspektrums in der Bandbreite variiert. Die eingestellten Vergleichsfrequenzen ändern sich bei jeweils gleichem Intensitätsdichtepiegel nicht. Die Qualität des Nachtones entspricht in etwa dem Verlauf in der vorausgegangenen Abbildung. Lediglich bei einem Δz_{IHP} von 0,5 und 1 Bark scheint ein breitbandiger Tiefpaßanteil eine bessere Qualität zu bewirken als der umgekehrte Fall in Fig. 2. Ab einer Breite von 5 Bark kann der Zwicker-Ton genauso gut wahrgenommen werden wie bei breitbandiger Anregung.

In weiteren Untersuchungen wurde schließlich die Bandbreite sowohl des Tiefpaß- als auch des Hochpaßanteiles von 0,5 bis 4 Bark verändert, so daß in der Tonheit zur spektralen Lücke symmetrische Bandsperre-Linienspektren entstanden. Zum Vergleich wurde auch ein Linienspektrum mit maximaler Bandbreite dargeboten. Hierbei wurde in einer Versuchsreihe gemäß Fig. 4a der Pegel der Frequenzgruppe zwischen 14,9 und 15,9 Bark jeweils konstant auf 25 dB gehalten, während in einer Versuchsreihe nach Fig. 4b die Erzeugerschalle stets mit gleichem Gesamtpegel von 40 dB dargeboten wurden.

Die Tonhöhen des Nachtones bleiben infolge des stets gleichen Frequenzgruppenpegels in Fig. 4a weitgehend unabhängig von der Bandbreite. In Fig. 4b hingegen nimmt bei konstantem Gesamtpegel der Intensitätsdichtepiegel und damit der Frequenzgruppenpegel mit abnehmender Bandbreite zu ($\Delta L_{\Delta f_{Gmax}} = 13$ dB), so daß eine geringfügige Verschiebung der Tonhöhe des Zwicker-Tones zu höheren Tonheiten zu beobachten ist [1,2]. Der Qualitätsverlauf in Fig. 4a stimmt im wesentlichen mit dem in Fig. 1 überein, wobei jedoch die Wahrscheinlichen Schwankungen aufgrund des zusätzlichen Hochpaßanteiles jeweils zur höheren Kategorie neigen. Ein Vergleich mit Fig. 2 und

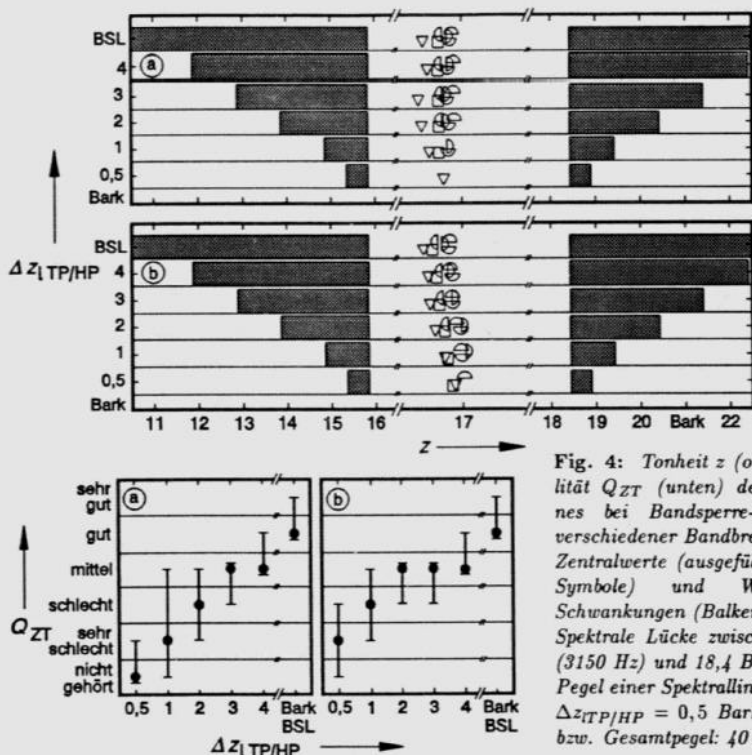


Fig. 4: Tonheit z (oben) und Qualität Q_{ZT} (unten) des Zwicker-Tones bei Bandsperre-Linienspektren verschiedener Bandbreite $\Delta z_{TP/HP}$. Zentralwerte (ausgefüllte Kreise und Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Balken). Spektrale Lücke zwischen 15,9 Bark (3150 Hz) und 18,4 Bark (4850 Hz). Pegel einer Spektrallinie: -1,5 dB (bei $\Delta z_{TP/HP} = 0,5$ Bark: 1,5 dB) (a) bzw. Gesamtpegel: 40 dB (b).

Fig. 3 macht deutlich, daß ein Erzeugerschall mit breitbandigem Hochpaß- bzw. Tiefpaßanteil einen besseren Zwicker-Ton erzeugt als ein symmetrisch bandbegrenztes Linienspektrum. Ein Gesamtpegel von 40 dB (Fig. 4b) bewirkt bei Bandbreiten unter 2 Bark eine Verbesserung der Qualität des Zwicker-Tones um eine Kategorie, so daß dieser Darbietungspegel in Übereinstimmung mit anderen Untersuchungen [1,2,3] als optimal anzusehen ist.

Der Autor dankt allen Versuchspersonen für die geduldige Teilnahme an den Experimenten, insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Fastl für zahlreiche Anregungen und Hinweise. Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft über den SFB 204 „Gehör“, München gefördert.

Literatur

- [1] Fastl H., Zum Zwicker-Ton bei Linienspektren mit spektralen Lücken. *Acustica* 67, 177-186 (1989).
- [2] Krump G., Zum akustischen Nachton bei Linienspektren. In: Fortschritte der Akustik, DAGA'90, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 767-770 (1990).
- [3] Krump G., Zum Zwicker-Ton bei zeitlich gepulsten Erzeugerschallen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA'92, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 889-892 (1992).
- [4] Lummis R.C. und Guttman N., *Exploratory Studies of Zwicker's "Negative Afterimage" in Hearing*. J. Acoust. Soc. Amer. 51, 1930-1944 (1972).
- [5] Zwicker E. und Fastl H., *Psychoacoustics - Facts and Models*. Springer-Verlag, Heidelberg (1990).
- [6] Zwicker E., "Negative Afterimage" in Hearing. J. Acoust. Soc. Amer. 36, 2413-2415 (1964).